



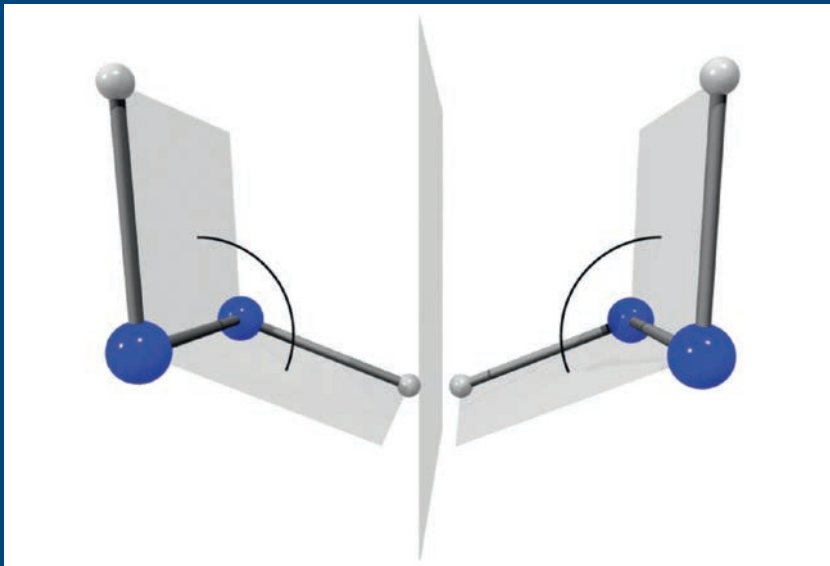
Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Neue Folge | Nummer 412

Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst

Herausgegeben von Martin Quack und Jörg Hacker



Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina –
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2016

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina

Herausgegeben von Jörg HACKER, Präsident der Akademie

NEUE FOLGE

NUMMER 412

Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst

Vorträge anlässlich der Jahresversammlung
am 18. und 19. September 2015 in Halle (Saale)

Herausgegeben von:

Martin QUACK (Zürich)
Mitglied des Präsidiums der Leopoldina

Jörg HACKER (Halle/Saale)
Präsident der Leopoldina



Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2016
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Redaktion: Dr. Michael KAASCH und Dr. Joachim KAASCH
Fotos von der Jahresversammlung „Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst“:
Christof RIEKEN – S. 21.
Markus SCHOLZ – S. 9, 29, 45, 75, 91, 99, 119, 167, 187, 211, 231, 241, 261.

Das Titelbild zeigt ein helikal oder axial chirales Molekül, wie Wasserstoffperoxid (HOOH) oder Dichlordisulfid (ClSSCl). Siehe Beitrag von Martin QUACK in diesem Band, S. 134.

Die Schriftenreihe Nova Acta Leopoldina erscheint bei der Wissenschaftlichen Verlagsgesellschaft Stuttgart, Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland.

Die Schriftenreihe wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie das Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitalisierung des Landes Sachsen-Anhalt.

Wir danken der Alfried Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung für die finanzielle Unterstützung der Veranstaltung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Die Abkürzung ML hinter dem Namen der Autoren steht für Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften.

© 2016 Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. – Nationale Akademie der Wissenschaften
Postadresse: Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale), Postfachadresse: 110543, 06019 Halle (Saale)
Hausadresse der Redaktion: Emil-Abderhalden-Straße 37, 06108 Halle (Saale)
Tel.: +49 3 45 47 23 91 34, Fax: +49 3 45 47 23 91 39
Herausgeber: Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Jörg HACKER, Präsident der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften
Printed in Germany 2016
Gesamtherstellung: stm|media GmbH + druckhaus köthen GmbH & Co. KG
ISBN: 978-3-8047-3610-8
ISSN: 0369-5034
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Inhalt

| | |
|---|-----|
| QUACK, Martin, und HACKER, Jörg: Vorwort | 7 |
| HACKER, Jörg: | |
| Ansprache des Leopoldina-Präsidenten | 9 |
| Begrüßung der Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel | 17 |
| MERKEL, Angela: Rede der Bundeskanzlerin | 21 |
| BIRNBACHER, Dieter: Symmetriebrüche in der Moral | 29 |
| HON, Giora, and GOLDSTEIN, Bernard R.: The Double-Face of Symmetry: A Conceptual History | 45 |
| FRITZSCH, Harald: Symmetrien in der Physik | 75 |
| GABRIELSE, Gerald: Probing Nature's Fundamental Symmetries. One Slow Particle at a Time | 91 |
| JENNI, Peter: The Long Journey to the Higgs Boson and Beyond at the Large Hadron Collider (LHC) | 99 |
| QUACK, Martin: Die Spiegelsymmetrie des Raumes und die Chiralität in Chemie, Physik und in der biologischen Evolution | 119 |
| HASINGER, Günther: Ist der Himmel symmetrisch? | 167 |
| BREDEKAMP, Horst: Ohne Abweichung kein Leben – Die bildende Kunst und die Symmetrie | 187 |
| BÜSCHGES, Ansgar: Neuronale Kontrolle der Fortbewegung – Erzeugung adaptiver Bewegungsmuster auf Basis struktureller Symmetrien | 211 |
| WERNER, Sabine: Krebsentstehung als überschießende Wundheilung: Verlust einer wichtigen Balance | 231 |
| KABLITZ, Andreas: Symmetrie als strukturelles Prinzip des Denkens in der Moderne . . . | 241 |
| WIENHARD, Anna: Geometrie durch Symmetrie | 261 |

Vorwort

Symmetrien und Asymmetrien lassen sich in allen Bereichen der Wirklichkeit entdecken. Die Neugier des Menschen, ihr Wechselspiel zu verstehen, verbindet nicht nur die Wissenschaften untereinander, sondern verknüpft die Wissenschaften auch eng mit den Künsten. Symmetrie und Asymmetrie – das sind zwei Strukturprinzipien, die einerseits von Mathematikern und Philosophen abstrakt definiert werden und die andererseits den empirischen Wissenschaften helfen, eine große Vielfalt von Phänomenen in Natur und Kultur zu erklären. Besonders in der Physik spielen Symmetrien und ihre Verletzungen eine auch erkenntnistheoretisch grundlegende Rolle, was Konsequenzen in der Chemie und Biologie hat. Darüber hinaus erschafft jede Kunstform – von der Musik bis zur Architektur – auf ihre ganz eigene Weise Werke, in denen Symmetrien und Symmetriebrüche von wesentlicher Bedeutung sind. Die Festrede der Bundeskanzlerin Angela MERKEL stellt auch einen Bezug zu Symmetrien und Asymmetrien in unterschiedlichen politischen Zusammenhängen her.

Mit dem Thema „Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst“ hat sich in seiner ganzen Breite und großer Tiefe die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften auf ihrer Jahresversammlung 2015 auseinandergesetzt. Vom 18. bis 19. September 2015 behandelten in Halle (Saale) hervorragende Vertreter der unterschiedlichsten Disziplinen natur-, lebens- und verhaltenswissenschaftliche, physikalisch-chemische, medizinische, philosophische und ästhetische Fragen des Wechselspiels von Symmetrie und Asymmetrie. Der vorliegende Tagungsband enthält ausführliche schriftliche Versionen nahezu aller Vorträge, die auf der Jahresversammlung gehalten wurden. Der Vortrag von Petra SCHWILLE wurde schon früher einmal in ähnlicher Form gehalten und publiziert (Nova Acta Leopoldina Bd. 116, Nr. 394, 119–130 [2012]). Der Beitrag von Daniel SHECHTMAN soll nach Transkription des mündlichen Vortrages noch separat in schriftlicher Form als Supplement zum vorliegenden Band gedruckt werden.

Wir möchten allen an diesem Tagungsband beteiligten Personen unseren Dank aussprechen. Dies gilt vor allem den Rednern, die uns freundlicherweise schriftliche Fassungen ihrer Vorträge zur Verfügung gestellt haben. Darüber hinaus danken wir den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Geschäftsstelle der Leopoldina, die an diesem Tagungsband mitgearbeitet haben. Besonders erwähnen möchten wir auch Joachim und Michael KAASCH, welche die Erstellung des Tagungsbandes redaktionell betreut haben.

Prof. Dr. Dr. h. c. Martin QUACK
Mitglied des Präsidiums der
Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Jörg HACKER
Präsident der
Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Ansprache des Leopoldina-Präsidenten

Jörg HACKER ML (Haale/Saale)
Präsident der Akademie



Sehr geehrter Herr Vizepräsident,
sehr geehrte Vertreter von Bund, Ländern und Kommunen,
sehr geehrte Repräsentanten deutscher und internationaler Wissenschaftsakademien und
-organisationen,
sehr geehrte Senatoren und Obleute,
sehr geehrte Mitglieder und Freunde der Leopoldina,
liebe Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Akademie,
hochansehnliche Festversammlung!

1. Begrüßung und Danksagungen

Nachdem unser Vizepräsident Herr LOHSE Sie zu dieser Jahresversammlung 2015 willkommen geheißen hat, möchte ich mich seinen Worten anschließen und meine große Freude darüber ausdrücken, dass Sie sich heute Morgen so zahlreich hier am Hauptsitz der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina eingefunden haben. Seien Sie also, meine Damen und Herren, auch meinerseits herzlich in Halle willkommen! Ich danke Ihnen, lieber Herr LOHSE, für Ihre Begrüßung, die uns auf das diesjährige Thema „Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst“ eingestimmt hat.

In diesem Jahr erwartet uns ein Thema, das alle Bereiche der Wirklichkeit betrifft und damit nicht nur die Wissenschaften untereinander verbindet, sondern sie auch eng mit den Künsten verknüpft. Symmetrie und Asymmetrie – das sind zwei Strukturprinzipien, die einerseits von Mathematikern und Philosophen abstrakt definiert werden und die andererseits den empirischen Wissenschaften helfen, eine große Vielfalt von Phänomenen in Natur und Kultur zu erklären. Darüber hinaus erschafft jede Kunstform – von der Musik bis zur Architektur – auf ihre ganz eigene Weise Werke, in denen Symmetrien und Symmetriebrüche von wesentlicher Bedeutung sind. Ich bin mir sicher: Wir werden dank der Vorträge auf dieser Jahresversammlung überraschende wissenschaftlich-ästhetische Analogien entdecken.

Ich möchte im Namen des Präsidiums der Leopoldina Herrn QUACK und Herrn BERG für ihren Einsatz bei der Konzeption und Organisation dieser Jahresversammlung ganz herzlich danken. Unterstützt wurden sie dabei tatkräftig von der Geschäftsstelle der Akademie. Für die Vorbereitung dieser Jahresversammlung danke ich herzlich unserer Generalsekretärin Frau SCHNITZER-UNGEFUG, Herrn HEENEMANN sowie allen anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Leopoldina.

In diesem Jahr waren wir bei der Vorbereitung unserer Jahresversammlung nicht zuletzt deshalb besonders motiviert, weil wir am heutigen Vormittag Frau Bundeskanzlerin MERKEL nach vier Jahren erneut als unseren Gast empfangen dürfen. Ich bin mir gewiss, dass Sie ebenso wie ich bereits jetzt auf ihre Festrede gespannt sind.

Sehr verehrte Frau Kuratoriumsvorsitzende, liebe Frau GATHER, ich möchte Ihnen versichern, dass die Leopoldina der Alfried Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung für ihre Unterstützung in tiefer Dankbarkeit verbunden ist. Ohne das langjährige und äußerst großzügige Engagement Ihrer Stiftung hätten vor und nach der deutschen Einheit zahlreiche wichtige Projekte der Leopoldina das Planungsstadium nicht verlassen können.

Sehr geehrte Präsidentin, liebe Frau NEHER, unser großer Dank gilt auch der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte für die gemeinsame Realisierung unseres Schü-

lerprogramms, das von der Wilhelm und Ilse Heraeus-Stiftung großzügig finanziell unterstützt wird. Ausgewählte Schülerinnen und Schülern können hierdurch an der Leopoldina-Jahresversammlung teilnehmen. Ich möchte unsere jungen Gäste und den Organisator des Schülerprogramms, Herrn MÜHLENHOFF, herzlich begrüßen!

Mein ganz besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang unserem Mitglied Herrn SELA, der mit seiner Gemahlin aus Israel nach Halle angereist ist, um heute Nachmittag mit den Schülern Einsichten und Erfahrungen aus seinem beeindruckenden Lebensweg zu teilen. Herzlich willkommen in der Leopoldina, sehr geehrter Herr SELA, sehr verehrte Frau SELA!

2. Totengedenken

Meine Damen und Herren,

unsere Akademie ist eine Gemeinschaft von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich seit Jahrhunderten weiterentwickelt, weil ihre Mitglieder auf der Arbeit einer langen Reihe von Vorgängern aufbauen können. Daher erinnern wir immer zu Beginn unserer Jahresversammlungen an diejenigen Mitglieder, die in den vergangenen zwölf Monaten verstorben sind. Seit der letzten Jahresversammlung 2014 in Rostock sind 27 Mitglieder der Leopoldina von uns gegangen.

Gestatten Sie mir, an dieser Stelle insbesondere unseres Mitglieds Herrn MARKL zu gedenken, der nach langer schwerer Krankheit im Januar dieses Jahres verstarb. Sein Wirken insbesondere für die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Max-Planck-Gesellschaft und die deutschen Wissenschaftsakademien hat wesentlich zur Entwicklung des deutschen Wissenschaftssystems beigetragen. Er argumentierte immer sehr überzeugend für eine aktive Rolle der Wissenschaft bei der Gestaltung unserer Gesellschaft. Daran können wir auch in Zukunft bei unserer Beratung von Politik und Öffentlichkeit anschließen.

Wir wollen in Dankbarkeit und stillem Gedenken von allen verstorbenen Akademiemitgliedern Abschied nehmen. Ich darf Sie bitten, sich dafür von Ihren Plätzen zu erheben.

Ich danke Ihnen, dass Sie sich zur Ehrung der Verstorbenen erhoben haben.

3. Rückblick auf Aktivitätsschwerpunkte seit der Jahresversammlung 2014

Meine Damen und Herren,

unsere Akademie setzte sich auch in den vergangenen zwölf Monaten mit wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen auseinander, die teilweise sogar weltweit zu Schlagzeilen geführt haben. Ich denke hier vor allem an die Ausbreitung der Ebola-virus-Epidemie Ende des vergangenen Jahres. Sie hat uns vor Augen geführt, wie dramatisch sich die aktuellen Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis auf unser Leben auswirken können: Die Seuche hat neben strukturellen Mängeln der globalen Gesundheitsvorsorge erhebliche Lücken in unserem Wissen über den Erreger von Ebola offengelegt.

3.1 Stellungnahmen

In der globalen Debatte darüber, wie ein solcher Seuchenausbruch zukünftig wenn nicht verhindert, so doch effektiver eingedämmt werden kann, muss die Stimme der Wissenschaft deutlich vernehmbar sein. Hierfür braucht es von der Forschungsgemeinschaft anerkannte Institutionen, denen Politik und Öffentlichkeit vertrauen. Daher haben wir uns im Oktober 2014 gemeinsam mit der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften entschlossen, eine *Ad-hoc*-Stellungnahme zu Konsequenzen aus der Ebolavirus-Epidemie zu veröffentlichen. Ich danke den Vertretern der deutschen Wissenschaftsakademien herzlich für die vertrauensvolle und enge Zusammenarbeit im Ständigen Ausschuss der Leopoldina, die es uns bei dieser und anderen Gelegenheiten ermöglicht hat, mit allgemein verständlichen Beiträgen schnell und präzise in die öffentliche Diskussion einzugreifen.

Meine Damen und Herren,

ich kann an dieser Stelle leider nicht im Einzelnen auf die zahlreichen Stellungnahmen eingehen, die wir seit der letzten Jahresversammlung veröffentlicht haben. Ihr Themenspektrum reicht von realistischen Erwartungen an die Individualisierte Medizin über die hochkomplexen Aspekte der Energiewende, die in dem von acatech federführend geleiteten Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ analysiert werden, bis hin zu fundierten Einschätzungen der Entwicklungsmöglichkeiten von Quantentechnologien. Angesichts der Fülle und Vielfalt der Themen, die wir für unsere wissenschaftsbasierte Beratung von Politik und Öffentlichkeit bearbeiten, bin ich immer wieder beeindruckt von der wissenschaftlichen Exzellenz, der interdisziplinären Neugier und der gesellschaftspolitischen Sensibilität der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die unsere Stellungnahmen erarbeiten. Dafür möchte ich Ihnen im Namen des Präsidiums der Leopoldina sehr herzlich Dank sagen.

3.2 Veranstaltungen

Meine Damen und Herren,

erfreulicherweise setzen sich immer mehr Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dafür ein, ihre Erkenntnisse einer möglichst breiten Öffentlichkeit zu vermitteln und so einen weiteren Beitrag dazu zu leisten, dass unsere Gesellschaft ihre großen Zukunftschancen verwirklichen kann. Dieses Engagement erfordert – neben einem langen Atem – die Bereitschaft, sich auf die Perspektive der Gesprächspartner einzulassen. Daher können Veranstaltungen, die Teilnehmer aus Zivilgesellschaft, Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gleichberechtigt einbinden, die wissenschaftsbasierte Beratung dem Ziel ein gutes Stück näherbringen, demokratische Entscheidungsprozesse mit verlässlichen Informationen und transparent begründeten Empfehlungen zu unterstützen.

Ich möchte Ihnen gerne von drei Veranstaltungen berichten, die in den vergangenen Monaten unsere Akademie als Forum für wissenschaftlich fundierte und gesellschaftlich

relevante Debatten national wie international deutlich sichtbar gemacht haben. Lassen Sie mich dabei hervorheben, dass wir diese Veranstaltungen keinesfalls als „Eintagsfliegen“ betrachten, sondern sie für uns wichtige Zwischenstationen innerhalb einer Strategie markieren, welche die Wirksamkeit unserer Aktivitäten über den Tag hinaus sichern soll.

- Die erste Veranstaltung, die ich nennen möchte, ist das Dialogforum der nationalen Wissenschaftsakademien der G7-Staaten. Auf diesem Dialogforum sind der Bundeskanzlerin Frau MERKEL am 29. April drei Stellungnahmen überreicht worden, welche die Akademien unter Federführung der Leopoldina für das G7-Gipfeltreffen auf Schloss Elmau erarbeitet hatten. Wir fordern in diesen Papieren eine weltweit koordinierte Vorgehensweise, um Gesundheitsgefahren durch Infektionskrankheiten zu bekämpfen und Fortschritte bei der Bekämpfung vernachlässigter Tropenkrankheiten zu erzielen, sowie Maßnahmen, welche die Nutzung und den Schutz der Meere nachhaltig gestalten. Wir haben uns sehr darüber gefreut, dass die Staats- und Regierungschefs alle drei Themen in das Abschluss-Kommuniqué des Elmauer Gipfels aufgenommen haben. Dieser Erfolg motiviert uns besonders, in vertrauensvoller Zusammenarbeit mit den anderen Nationalakademien und unter Federführung des *Science Council of Japan* an der wissenschaftsbasierten Beratung des G7-Gipfels 2016 mitzuwirken. Hierzu sind wir bereits aus Japan eingeladen worden, und ich bin mir sicher, dass dank der wissenschaftlichen Kompetenz der Mitglieder der beteiligten Nationalakademien erneut G7-Stellungnahmen entstehen werden, die den Forschungsstand zu global drängenden Herausforderungen wirkungsvoll vermitteln. Ich danke allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich in den vergangenen Jahren sehr intensiv bei der Erarbeitung dieser Stellungnahmen engagiert haben.
- Die zweite Veranstaltung, die ich heute erwähnen möchte, ist eine Premiere gewesen. Es handelt sich um die erste gemeinsame Wissenschaftskonferenz zur Region Westlicher Balkan, welche die Leopoldina vom 15. bis 17. Juli in Kooperation mit dem Bundeskanzleramt, dem Auswärtigen Amt, der Alexander von Humboldt-Stiftung und der Stiftung Preußischer Kulturbesitz in Halle und Berlin veranstaltete. Die Konferenz gehört zur Initiative „Westlicher Balkan“, an der die deutsche Bundesregierung, die südosteuropäischen Staaten inklusive Kroatien und Slowenien, Frankreich, Italien und Österreich sowie die EU-Kommission beteiligt sind. Für den Themenbereich „Wissenschaft und Gesellschaft“ dieser Initiative hatte die Leopoldina auf Anregung der deutschen Bundesregierung die Verantwortung übernommen. Alle Beteiligten haben die Ergebnisse der Konferenz in einer gemeinsamen Stellungnahme zusammengefasst und an den Westbalkan-Gipfel der Regierungschefs und Außenminister Ende August in Wien gerichtet. Angesichts der komplexen politischen Situation betrachten wir es als einen ersten Erfolg, dass die gemeinsame Wissenschaftskonferenz zunächst bis 2018 weitergeführt wird. Wir sind zuversichtlich, dass diese „Science Diplomacy“-Initiative in den kommenden Jahren die Situation der nationalen Wissenschaftssysteme auf dem Westlichen Balkan verbessern wird. Ich danke dem Präsidenten der Alexander von Humboldt-Stiftung, Herrn SCHWARZ, herzlich für die hervorragende Kooperation, die wir in der Zukunft gewiss fortsetzen werden, und der Abteilung für Internationale Beziehungen der Leopoldina, die unter Leitung von Frau KOCH-KRUMREI diese organisatorische Herausforderung souverän bewältigt hat.
- Auch die dritte Veranstaltung, die ich an dieser Stelle nennen möchte, ist eine Premiere gewesen. Gemeinsam mit dem Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft

und der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) lud die Leopoldina am 20. Mai in Berlin erstmals zum Forschungsgipfel ein. In einer Atmosphäre des intensiven Meinungsaustauschs dachten Teilnehmer aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft über Strategien nach, wie unser Land seine Wettbewerbsfähigkeit trotz steigendem Kostendruck im globalen Innovationssystem behaupten kann – etwa durch neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Der erste Forschungsgipfel konnte diese Frage selbstverständlich nicht erschöpfend diskutieren. Daher sind wir uns mit dem Stifterverband und EFI einig, diese in ihrer Form einzigartige Diskussionsveranstaltung gemeinsam weiterzuführen. Wir erhoffen uns von den Forschungsgipfeln zukunftsweisende Impulse für die Gestaltung des deutschen Innovationssystems, um ihm jenseits des erreichten 3%-Anteils der Ausgaben für Forschung und Entwicklung am Bruttoinlandsprodukt eine noch höhere Dynamik zu verleihen. Leider kann Herr BARNER heute nicht bei uns sein, aber ich möchte ihm als Präsidenten des Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft ebenso wie Herrn HARHOFF als Vorsitzenden von EFI für die äußerst angenehme Zusammenarbeit beim Forschungsgipfel herzlich danken.

4. Herausforderungen für die Zukunft

Sehr geehrte Mitglieder der Leopoldina,

dass unsere Akademie in den letzten Jahren durch Veröffentlichungen und Veranstaltungen ihre Präsenz in Debatten um die Beiträge der Wissenschaft zur gesellschaftlichen Entwicklung deutlich steigern konnte, verdankt sie vor allem Ihnen. Ihre Ideen für neue Projekte, Ihr Engagement in Wissenschaftlichen Kommissionen und Arbeitsgruppen und Ihre Mitwirkung an Symposien und Jahresversammlungen ermöglichen es der Leopoldina erst, die Aufgaben einer Nationalen Akademie der Wissenschaften erfolgreich zu gestalten. Hierfür möchte ich mich bei Ihnen im Namen des Präsidiums unserer Akademie bedanken.

Daran schließe ich sogleich den großen Dank an das Bundesministerium für Bildung und Forschung und an das Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt an, welche die Arbeit der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina kontinuierlich begleiten und nachhaltig fördern – materiell wie ideell. Sehr geehrter Herr SCHÜLLER, sehr geehrter Herr TULLNER, ich würde mich freuen, wenn Sie unseren Dank und unsere herzlichen Grüße Frau Bundesministerin WANKA und Herrn Minister MÖLLRING übermitteln könnten.

Meine Damen und Herren,

als moderne Arbeitsakademie auf einem guten Weg zu sein, heißt nicht, sich auf den bisherigen Erfolgen ausruhen zu dürfen. Ich sehe für die kommende Zeit vor allem vier Herausforderungen.

- Erstens haben meine Erfahrungen als Präsident unserer Akademie – und auch meine Mitwirkung im wissenschaftlichen Beratungsgremium des Generalsekretärs der Ver-

einten Nationen – es mir verdeutlicht, welche wichtige Rolle der Wissenschaft für die nachhaltige Entwicklung der Weltgemeinschaft zukommt – eine Funktion, die von der Politik, aber zuweilen auch von Wissenschaftlern selbst immer noch unterschätzt wird. Diese Rolle zwischen Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft zu definieren, erfordert einen langfristigen, ernsthaften und konsensorientierten Dialog, der gerade erst begonnen hat. Ich bin davon überzeugt, dass die Leopoldina sich dafür umfassend einsetzen sollte – national wie international.

- Ein solches Engagement erfordert zweitens eine breite thematische Aufstellung der Leopoldina in der wissenschaftsbasierten Beratung. Wir sind auf einigen Gebieten mit herausragender Kompetenz sehr präsent, beispielsweise im Bereich der Lebenswissenschaften und der Medizin. In anderen Bereichen, in denen unsere Mitglieder ebenfalls exzellente Forschungsarbeit leisten – ich denke hier etwa an die Herausforderungen eines immer umfassender digitalisierten Lebens – sollten wir unsere wissenschaftliche Expertise ebenfalls intensiv kommunizieren. Daher freue ich mich, dass Herr LENGAUER vor wenigen Wochen eine neue Wissenschaftliche Kommission initiiert hat, die sich mit der Digitalisierung der Gesellschaft auseinandersetzen wird. Haben Sie hierfür herzlichen Dank, sehr geehrter Herr LENGAUER!
- Drittens haben alle Themen, mit denen sich die Leopoldina in beratender Absicht beschäftigt, etwas gemeinsam: Sie sind durchweg interdisziplinär angelegt. Daher sollten wir uns bemühen, das überaus hohe Potenzial der Akademie für die Zusammenarbeit quer zu den Fachgrenzen systematisch zu nutzen. Die Einführung der Wissenschaftlichen Kommissionen ist ein erster erfolgreicher Schritt gewesen, und ich danke allen Sprechern und Mitgliedern dieser Kommissionen für ihre hervorragende Arbeit. Unsere Wissenschaftlichen Kommissionen sollten zukünftig eine noch aktivere Rolle spielen, insbesondere bei der Generierung neuer Fragen für die wissenschaftsbasierte Beratung. Gestern haben wir im Präsidium auf Initiative von Herrn RÖSLER – dem ich hierfür sehr danke – über Wege diskutiert, wie wir dies gemeinsam bewerkstelligen können.

Neben den Wissenschaftlichen Kommissionen hat ein weiteres hochgradig interdisziplinäres Projekt der Leopoldina sich in den vergangenen Monaten vielversprechend weiterentwickelt. Ich meine das Leopoldina-Studienzentrum, das alle wissenschaftshistorischen und wissenschaftsphilosophischen Aktivitäten der Akademie koordiniert, um sich mit der Rolle und der Bedeutung der Wissenschaft in der Gesellschaft einzusetzen und jetzt auseinanderzusetzen. Vor drei Tagen hatte ich die große Freude, in Leipzig an der Verleihung der Anneliese Maier-Forschungspreise 2015 durch die Alexander von Humboldt-Stiftung teilzunehmen und dabei auch unserem Mitglied Herrn WEINDLING gratulieren zu können, der sein Preisgeld für ein Projekt an unserem Studienzentrum zur weiteren Aufarbeitung der Eugenik im Nationalsozialismus einsetzen wird. Ich danke dem Sprecher des wissenschaftlichen Beirats des Studienzentrums Herrn LABISCH und dem Projektleiter des Studienzentrums Herrn GODEL für ihr großes Engagement – wir sehen der weiteren Entwicklung des Studienzentrums mit Spannung entgegen!

- Viertens bieten innerhalb der Organisation der Leopoldina die Klassen einen weiteren wichtigen Ort für den interdisziplinären Austausch. Sie haben sich sehr bewährt und sollten weiter gestärkt werden. Wie dies geschehen könnte, erörterte in diesem Jahr eine gemeinsame Strukturkommission von Senat und Präsidium. Der Senat hat gestern

zwei Maßnahmen, welche von der Strukturkommission ausgearbeitet worden sind, beschlossen. Wir haben die Zuwahlmöglichkeiten für exzellente Wissenschaftler aus interdisziplinären und anwendungsorientierten Forschungsgebieten verbessert, und wir haben die Organisationsebene der Teilsektionen aufgelöst. Ich halte diese und weitere strukturelle Maßnahmen für äußerst wichtig. Daher danke ich allen Mitgliedern der Strukturkommission ganz herzlich für die nicht immer einfache Arbeit, die sie bisher geleistet haben – und die sie, da bin ich gewiss, in den kommenden Monaten noch leisten werden. Denn wir sollten weitere notwendige Maßnahmen zur organisatorischen Weiterentwicklung der Leopoldina offen diskutieren und tatkräftig umsetzen – ich denke hier insbesondere an die Struktur der Klassen.

5. Schlussbemerkung

Meine Damen und Herren,

es bleibt mir nach meinen rück- und vorausblickenden Ausführungen nun noch, Ihnen sowohl erhellende Vorträge als auch anregende Gespräche über Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst zu wünschen. Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit!

Wir kommen nun zur Verleihung der diesjährigen Preise und Medaillen der Leopoldina.¹

¹ Die Rede zur Übergabe der Preise und Medaillen ist im Jahrbuch der Akademie 2015 (Leopoldina Reihe 3, Jahrgang 61 [2016]) veröffentlicht. Dort sind auch die Laudationes auf die Ausgezeichneten publiziert.

Begrüßung der Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel

Jörg HACKER ML (Haale/Saale)
Präsident der Akademie

Sehr verehrte Frau Bundeskanzlerin,
sehr geehrter Herr Ministerpräsident,
sehr geehrter Herr Oberbürgermeister,
sehr geehrte Vertreter aus Bund, Ländern und Kommunen,
sehr geehrte Präsidenten und Repräsentanten von Wissenschaftsakademien und
-organisationen,
sehr geehrte Mitglieder und Freunde der Leopoldina,
liebe Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Akademie,
hochansehnliche Festversammlung!

Als Sie, sehr verehrte Frau Bundeskanzlerin, vor vier Jahren auf unserer Jahresversammlung zum Thema „Was ist Leben?“ in Halle zu Gast waren, konnten wir Sie noch nicht hier auf dem Jägerberg empfangen, weil wir unseren Hauptsitz erst im Jahre 2012 bezogen haben. Sie merkten damals an, dass wir Sie im Grunde ein Jahr zu früh eingeladen hätten. Allerdings einigten wir uns dann, dass wir die Einladung aufrecht erhalten, und wir freuen uns umso mehr, dass Sie in diesem Jahr unsere Jahresversammlung erneut besuchen, obwohl die Zeitläufe gerade jetzt Ihre volle Aufmerksamkeit und Entscheidungskraft beanspruchen. Ganz herzlich möchte ich Ihnen dafür danken, sehr geehrte Frau Bundeskanzlerin, dass Sie sich bereit erklärt haben, die Festrede im Rahmen der feierlichen Eröffnung unserer Jahresversammlung zu halten.

Die Leopoldina als Nationale Akademie der Wissenschaften

Wenn wir heute, im Jahre 2015 auf das Wissenschaftssystem schauen, so können wir konstatieren, dass die Entwicklung in den letzten Jahren von großer Dynamik geprägt war. In den vergangenen zehn Jahren haben sich die Haushalte, zumindest auf Bundeseite, im Hinblick auf Wissenschaft, Forschung und Innovation verdoppelt, auch in den Haushaltsjahren 2016 und 2017 wird es wahrscheinlich einen Anstieg geben.

Sie, sehr verehrte Frau Bundeskanzlerin, haben aber auch strukturelle Entscheidungen im Hinblick auf das Wissenschaftssystem getroffen. Gemeinsam haben Bund und Länder 2008 beschlossen, die Leopoldina mit den Aufgaben einer Nationalen Akademie der Wissenschaften zu betrauen. Wir danken Ihnen noch einmal für den Vertrauensvorschuss, den Sie uns damals gewährten, und ich möchte ganz herzlich, auch wenn sie nicht anwesend ist, die ehemalige Bundesministerin SCHAVAN nennen, die entscheidend an dieser Entwicklung beteiligt war.

Uns ist damals aufgegeben worden, insbesondere zwei Funktionen noch intensiver wahrzunehmen: zum einen die Beratung von Gesellschaft und Politik im Hinblick auf neue wissenschaftliche Entwicklungen und die Vertretung Deutschlands im internationalen Rahmen, in dem nationale Akademien weltweit tätig sind. Zwischenzeitlich haben wir die entsprechenden Strukturen etabliert; gemeinsam mit der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech und der Union der deutschen Wissenschaftsakademien sind wir auf unterschiedlichen Themenfeldern tätig. Auch mit den Forschungsorganisationen der Allianz, stellvertretend möchte ich hier die Deutsche Forschungsgemeinschaft nennen, verbindet uns eine intensive und vertrauensvolle Kooperation.

Themenkomplexe der Leopoldina

Wenn wir die Themen sehen und gewichten, mit denen wir uns im Rahmen der Beratung von Politik und Öffentlichkeit auseinandersetzen, so sind es Handlungsfelder von enormer Bedeutung. Zu den fünf wichtigen Themen zählen die ethischen und rechtlichen Aspekte des lebenswissenschaftlich-biomedizinischen Fortschritts, weiter die Herausforderung des demographischen Wandels, wir analysieren die komplexe Transformation unseres Energiesystems und setzen uns mit den Potenzialen der Digitalisierung unserer Gesellschaft auseinander, auch wenn heute verschiedene neue Entwicklungen noch wie Zukunftsmusik klingen. Weiterhin reflektieren wir natürlich auch über die besten Strukturen und Rahmenbedingungen für das deutsche Wissenschaftssystem im globalen Kontext.

Bei vielen dieser Themen spielen ethische Fragen der Abwägung zwischen unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten eine Rolle. Auf der Leopoldina-Jahresversammlung 2011 betonten Sie, Frau Bundeskanzlerin, Folgendes:

„Politik muss immer Wertungen einbringen, sie muss immer wieder versuchen, einen Ausgleich aller gesellschaftlichen Gruppen zu finden. Deshalb hängt die Entscheidung oft von mehr als allein von wissenschaftlichen Fakten ab. Aber sie sollte nicht konträr zu den wissenschaftlichen Gegebenheiten erfolgen.“

In diesem Sinne versuchen wir, mit unserer Beratungstätigkeit auf die Politik und die Öffentlichkeit zu reagieren und proaktiv Themen zu benennen.

Internationale Aktivitäten der Leopoldina

Auch im Hinblick auf die internationale Verflechtung des deutschen Wissenschaftssystems ist die Leopoldina in unterschiedlichen Kontexten tätig. Wir haben uns gefreut, mit dem Bundeskanzleramt im Rahmen des G7-Prozesses zusammenarbeiten zu können. Gerade in diesen Tagen, wo in New York von der UN-Hauptversammlung die neuen Nachhaltigkeitsziele verabschiedet werden, schien uns diese Tätigkeit im Rahmen des G7-Prozesses sehr wichtig und erfolgreich zu sein.

Darüber hinaus versuchen wir, im Rahmen der momentan zu beobachtenden Migration und Fluchtereignisse einen kleinen Beitrag zu leisten. Schon seit geraumer Zeit sind wir in den Herkunftsländern von Flüchtlingen tätig, beispielsweise setzen wir uns im Rahmen des *Human Rights Committees* für verfolgte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler

ein. Ich bin Herrn ZENNER dankbar, dass er diese Aufgabe im Rahmen des *Human Rights Committee* leitet.

Auch die Westbalkaninitiative, die wir auf Anregung des Bundeskanzleramtes begonnen haben, scheint uns ein Mechanismus zu sein, die Attraktivität von Wissenschaft und Forschung gerade in den Westbalkanländern durch Kooperation zu erhöhen und so auch einen Beitrag zu leisten, um das, was wir als „Brain Drain“ bezeichnen, abzuschwächen.

Vor einigen Tagen haben wir begonnen, eine Stellungnahme zum Thema „Flucht und Migration: Herausforderungen für das Gesundheitssystem und die Gesundheitsforschung“ zu erstellen. In wenigen Wochen werden wir, auch in enger Abstimmung mit der Bundesregierung, Themen und Meilensteine definieren, auf die es in der jetzigen Situation im Hinblick auf das Gesundheitssystem ankommt. Ich nenne hier nur die Stichpunkte Impfungen, akute Durchfallerkrankungen in Flüchtlingslagern, aber auch den Umgang mit psychischen Traumata sowie viele andere wichtige Punkte werden wir versuchen, zu behandeln und hierzu eine Stellungnahme abzugeben. Wir empfinden es als besondere Verpflichtung der Leopoldina, dass wir zu dieser Problematik aktiv werden, um die Frage mit zu beantworten, wie unser Land am besten die Herausforderung meistern kann, vor die uns Schutz und eine sichere Zukunft suchende Bürgerkriegsflüchtlinge gestellt haben.

Zusammenfassung

Während wir vor vier Jahren bei Ihrem Besuch, sehr verehrte Frau Bundeskanzlerin, dem Thema „Was ist Leben?“ nachgegangen sind, so wollen wir uns heute mit dem Begriffspaar „Symmetrien und Asymmetrien“ auseinandersetzen. Ich danke Herrn QUACK, dass er dieses Thema mit vielen anderen zusammen weiterentwickelt hat und zu einem attraktiven Magneten für unsere Jahresversammlung entwickeln konnte. Sowohl im Bereich der Molekülchemie, der Kosmologie, aber auch in den Geisteswissenschaften spielen Symmetrien und Asymmetrien eine große Rolle. Dieses Begriffspaar beinhaltet ebenfalls, dass auch Wissenschaft und Politik Symmetrien und Asymmetrien ausbilden, die wir produktiv nutzen sollten.

Die Leopoldina, dies als Schlussbemerkung, ist die einzige Nationale Akademie der Wissenschaften weltweit, die nicht in der Hauptstadt des jeweiligen Landes untergebracht ist. Die Leopoldina ist seit über 130 Jahren in Halle ansässig. Die Tatsache, dass die Leopoldina hier in Halle tätig ist, reflektiert unser föderales Wissenschaftssystem. Darüber hinaus ist dies zum einen nicht nur eine historische Tatsache; vielmehr freuen wir uns über die tatkräftige Unterstützung des Landes Sachsen-Anhalt und der Landesregierung im Hinblick auf das Wohlergehen der Akademie in unserem Sitzland. Dafür möchte ich mich bei Ihnen, sehr geehrter Herr Ministerpräsident, auch in diesem Rahmen noch einmal bedanken.

Herr Oberbürgermeister, die Leopoldina hat ebenfalls ein gewachsenes, sehr gutes Verhältnis zu der Stadt Halle, in der sie ihren Sitz hat. Ich freue mich immer wieder über gemeinsame Initiativen und Kooperationen zwischen der Stadt Halle und unserer Akademie und möchte auch Ihnen in diesem Rahmen dafür danken.

Jörg Hacker

Sehr verehrte Frau Bundeskanzlerin, meine Damen und Herren, ich bedanke mich für Ihre Aufmerksamkeit und möchte nun Sie, sehr geehrter Herr Ministerpräsident, bitten, das Wort an uns zu richten.²

Vielen Dank!

2 Eine ausführliche Dokumentation der Jahresversammlung ist im Jahrbuch der Akademie 2015 (Leopoldina Reihe 3, Jahrgang 61 [2016]) abgedruckt. Dort ist auch das Grußwort von Ministerpräsident Reiner HASELOFF veröffentlicht.

Rede der Bundeskanzlerin*

Angela MERKEL (Berlin)



* Quelle: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Rede/2015/09/2015-09-18-rede-merkel-leopoldina.html>

Sehr geehrter Herr Professor HACKER,
sehr geehrte Mitglieder der Leopoldina,
sehr geehrte Gäste,
meine Damen und Herren in diesem Raum, aber auch in dem Raum, in dem die Videoübertragung stattfindet,

zuletzt war ich, wie schon gesagt wurde, 2011 bei Ihrer Jahresversammlung. Sie sind 2012 in dieses Gebäude umgezogen. Ministerpräsident Reiner HASELOFF hat noch einmal gewürdigt, dass dies für Sachsen-Anhalt ein sehr schönes Ereignis war. Ich bin also zum ersten Mal bei einer Jahresversammlung hier auf dem Jägerberg dabei. Auf dieser Anhöhe geht es ja nicht mehr um das Jagen von Wildtieren, sondern mehr um das Erjagen von Trophäen bei Naturrätseln und um das Erkennen von neuen Fakten und das Gewinnen von neuen Erkenntnissen.

Es lassen sich aber einige Parallelen zwischen Vergangenheit und Gegenwart ziehen. Die Freimaurerloge „Zu den Drei Degen“ ließ dieses Haus Anfang des 19. Jahrhunderts errichten. Es wurden Bälle, Kulturabende und andere Zusammenkünfte hier abgehalten. Die Veranstaltungen heute sehen natürlich völlig anders aus, aber es ist nach wie vor Zweck dieses Hauses, Begegnung und Dialog zu fördern. Denn darin liegt ein Schlüssel zum Erfolg der altherwürdigen Leopoldina. Seit ihrer Gründung als *Academia Naturae Curiosorum* im Jahre 1652 besteht sie ununterbrochen. Schon allein das macht sie zu einem besonderen Teil der wissenschaftlichen Akademien.

Das Konzept bestand von Anfang an darin, Gelehrte aus unterschiedlichen Forschungsstätten zusammenzurufen, sie zu einer Gesellschaft zu vereinen und fächerübergreifend wissenschaftlichen Fragen auf den Grund zu gehen. Kaiser LEOPOLD I. stattete die Leopoldina dazu mit besonderen Privilegien aus. Diese garantierten ihr Unabhängigkeit und die völlige Zensurfreiheit für ihre Veröffentlichungen. – Diese Garantie wurde nicht in allen Phasen der Geschichte gleichermaßen geachtet; aber heute, so denke ich, geht es wieder einigermaßen. – So war über die Zeit hinweg eine freie Entfaltung der Gelehrten überhaupt erst möglich.

Seit 1878 hat die Leopoldina ihren festen Platz in der Universitätsstadt Halle. Die Funktion als Nationale Akademie der Wissenschaften haben ihr Bund und Länder im Jahr 2008 übertragen. Ich würde sagen, das war eine Glücksstunde der Arbeit der Wissenschaftsminister, denn es war angesichts der Globalisierung dringend notwendig, eine Nationale Akademie auch in Deutschland zu haben. Ich denke, die Zusammenarbeit mit der acatech, mit der BBAW und mit den anderen Akademien hat sich wie auch im gesamten Wissenschaftssystem in Deutschland dann auf sehr gute Weise ergeben. Aber was die Erkennbarkeit der deutschen Wissenschaftslandschaft im Ausland anbelangt, so haben wir jetzt doch ein besonderes Markenzeichen.

Die Liste der Mitglieder ist eindrucksvoll – das wissen Sie. Sie zählt 1500 Gelehrte weltweit. Der globale Ansatz ist natürlich zentral für die wissenschaftliche Arbeit. Ein früheres Mitglied der Leopoldina, der Physiker Max PLANCK, hat es mit folgenden Worten auf den Punkt gebracht: „Die Wissenschaft kennt keine Landesgrenzen; denn ihre Grenze ist lediglich die Grenze menschlicher Erkenntnis.“ Dass sich diese Grenzen menschlicher Erkenntnis immer wieder verschieben, zeigt sich nicht nur an Max PLANCK und seinem Nobelpreis. Vielmehr haben Sie in Ihren Reihen viele exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die hohe Auszeichnungen erhalten haben. Zuletzt hat das Leopoldina-Mitglied Stefan HELL im Jahr 2014 zusammen mit zwei amerikanischen Kollegen den Nobelpreis für Chemie bekommen.

Im Programm dieser Jahresversammlung zeigen sich nun wieder das hohe Niveau, die Internationalität und auch die thematische Bandbreite: „Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst.“ Die Politik haben Sie ausgelassen. Dazu hat der Ministerpräsident eben einiges gesagt. Ich habe einmal im Abstract von Herrn FRITZSCH nachgelesen. Der erste Satz lautet: „Eine Symmetrie ist die Eigenschaft eines Systems, sich bei Transformation nicht zu verändern.“ Im 25. Jahr der Deutschen Einheit jagt einem dieser Satz einen kleinen Schrecken ein, da ich doch hoffe, bei dieser Transformation hat sich etwas verändert. Aber ich weiß schon, dass es dabei um einfachere Transformationen geht.

Sie gehen also der Frage nach, wie Symmetrie und Asymmetrie zusammenhängen. Ralph Waldo EMERSON traf im 19. Jahrhundert die Aussage: „Die menschliche Natur liebt nicht Widersprüche, sondern Symmetrie.“ Es mag sein, dass sie sie liebt, aber vielleicht sind die produktiveren Phasen doch mit asymmetrischen Vorgängen verbunden. Darüber werden Sie nun intensiv diskutieren; und ich möchte mich nicht allzu sehr mit platten Formulierungen einbringen. Aber politische Prozesse sind, jedenfalls auf den ersten Blick erkennbar, sehr häufig nicht symmetrisch. Es gibt vielmehr Asymmetrien – Asymmetrien im sozialen Bereich, Asymmetrien in den Mehrheitsverhältnissen. Wir sprechen neuerdings auch von asymmetrischen internationalen Konflikten. Das sind insbesondere Konflikte, bei denen nicht Staaten gegen Staaten, sondern nichtstaatliche Organisationen gegen Staaten kämpfen. Wir erleben das in diesen Tagen besonders am Beispiel des Islamischen Staats, der sich als Terrororganisation gegen bisherige staatliche Gebilde richtet.

Der Bürgerkrieg in Syrien und jetzt in der Intensität noch einmal angeheizte Konflikte führen seit Monaten auch dazu, dass es eine Vielzahl von Menschen gibt, die ihre Heimat verlassen müssen, die in der Türkei, im Libanon, in Jordanien und bei uns in Europa Zuflucht suchen. Wir sehen, dass auch die Flüchtlingsbewegungen in Richtung Europäische Union vergleichsweise asymmetrisch sind. Deutschland ist davon sehr stark betroffen.

Uns stellen sich jetzt viele praktische Fragen, mit denen sich Kommunen, Länder und der Bund beschäftigen. Wir brauchen Betten, wir brauchen eine beschleunigte Antragsbearbeitung, wir brauchen Entscheidungen über Bleibeperspektiven, und wir müssen darauf achten, dass die Europäische Union nicht in der asymmetrischen Verteilung von Lasten verharrt. Wir brauchen eine faire Verteilung, weil das für das Grundgerüst der Europäischen Union, eine Wertegemeinschaft zu sein und eine gemeinsame Asylpolitik zu haben, entscheidend ist. Ansonsten löst Europa nicht die Versprechen ein, die es gemacht hat. Und ansonsten wird Europa nicht dem Rechtszustand gerecht, den es geschaffen hat.

Wir brauchen also eine faire Verteilung. Wir werden darüber in den nächsten Tagen – die Innenminister am nächsten Dienstag, die Staats- und Regierungschefs am nächsten Mittwoch – sprechen. Wir dürfen uns natürlich nicht nur auf das konzentrieren, was wir im Augenblick in Deutschland erleben, sondern wir müssen uns vor allen Dingen mit der Bekämpfung von Fluchtursachen befassen. Wir spüren plötzlich, dass in unsere Länder der Europäischen Union die Globalisierung ganz sichtbar in Form von Migration eintritt, die zeigt: Zu große Asymmetrien, auch beim Wohlstand und den Lebensverhältnissen, führen zu Fluchtbewegungen. Wir werden viel Kraft darauf verwenden müssen, zu überlegen, wie wir die Ursachen der Fluchtbewegung bekämpfen. Denn es kann natürlich nicht ein Land in Europa alle Ungerechtigkeiten der ganzen Welt auffangen. Insofern werden als Folge dieser Krise und als Folge dieser Entwicklungen mit Sicherheit Außen- und Innenpolitik sehr viel stärker zusammenwachsen.

Das ist im Grunde etwas, das für Sie selbstverständlich ist. Sie leben in einer internationalen Wissenschaftswelt. Wissenschaft kennt keine Grenzen; und Erkenntnis auch nicht. Aber für staatliche Gebilde ist das immer noch Neuland. Deshalb wird hier sehr viel zu arbeiten sein. Ich freue mich sehr, Herr HACKER, dass Sie tatkräftig Beschlüsse gefasst haben, um sich bestimmte Aspekte der Migrationsbewegung genauer anzuschauen.

Es gibt neben den Problemen, die wir nicht verschweigen wollen, auch Chancen, die wir sehen sollten. Diese Chancen haben etwas mit der demografischen Entwicklung zu tun. Meine Bitte an Sie ist: Geben Sie denen, die gut ausgebildet sind – das sind nicht alle, aber es sind manche –, eine Chance im Wissenschaftssystem unseres Landes. Wir brauchen an allen Stellen viel praktische Hilfe. Nicht alles passt für alle. Aber glücklicherweise finden wir auch sehr viel Hilfe. Dafür auch der Leopoldina ein herzliches Dankeschön.

Nehmen wir als ein Beispiel die Situation in den Staaten des westlichen Balkans vor unserer Haustür. Wir haben dort Krieg weitestgehend eingedämmt, damit allerdings noch lange keine wirklich gute Entwicklung auf den Weg gebracht. Aber das dynamische Moment der Zusammenarbeit der Staaten des westlichen Balkans ist ganz wesentlich die Perspektive einer Mitgliedschaft in der Europäischen Union. Hieran sieht man noch einmal die Attraktivität der Mitgliedschaft in der Europäischen Union. Deshalb bin ich sehr dankbar dafür, dass Sie unsere Aktivitäten auf dem westlichen Balkan dadurch gestärkt haben, dass Sie eine Wissenschaftskonferenz hierzu durchgeführt haben. Man kann vielleicht gar nicht ermessen, wie wichtig das ist.

Wir haben im vorigen Jahr anlässlich des hundertsten Jahrestags des Beginns des Ersten Weltkriegs überlegt, was wir außer Gedenkstunden noch veranstalten könnten. Mit Blick auf die Situation auf dem westlichen Balkan – auf die Tatsache, dass wir immer noch Hunderte Soldaten im Kosovo haben, dass wir immer noch keine stabile Situation in Bosnien-Herzegowina haben – haben wir uns überlegt, eine Konferenz durchzuführen, die Jahr für Jahr in anderen Ländern eine Fortsetzung findet. In diesem Jahr war sie in Wien, in Österreich. Wir haben damit etwas erreicht, was wir gar nicht erwarten konnten. Die Ministerpräsidenten der Länder sagten nämlich: Wir haben uns nach der ersten Konferenz in Berlin noch geschlagene drei Mal getroffen, auch ohne dass einer aus Berlin oder Wien dabei war. Das zeigt: Man arbeitet; man arbeitet miteinander.

Die wissenschaftliche Kooperation ist hierbei sehr wichtig. Wir haben ein Jugendwerk gegründet, das Jugendbegegnungen möglich machen soll. Es sollen auch gemeinsame Infrastrukturprojekte entwickelt werden, sodass die Verbindungen zwischen diesen Ländern selbstverständlich werden. Ich begrüße in diesem Zusammenhang auch das Vorhaben, interdisziplinäre *Centers of Excellence* in der Region zu entwickeln. Wir wissen angesichts der vielen Flüchtlinge aus dem westlichen Balkan, die alle eine sehr geringe Bleibeperspektive haben, dass wir Hoffnung geben müssen, dass wir Ausbildungschancen geben müssen, dass wir Möglichkeiten zur Arbeit geben müssen.

Meine Damen und Herren, die politische Arbeit wird nicht langweilig. Vor sieben Jahren hatten wir es mit der großen Finanzkrise zu tun. Die europäische Staatsschuldenkrise beschäftigt uns seit fünf Jahren. Aus neuen politischen Herausforderungen ergeben sich immer wieder auch Aufgaben für die Leopoldina und die wissenschaftlichen Organisationen. Deshalb möchte ich Ihre Satzung zitieren: Die Leopoldina „bringt sich in die wissenschaftsbasierte Beratung von Öffentlichkeit und Politik ein“. Das ist ein selbstverständlicher Teil Ihrer Arbeit „zum Wohle des Menschen und der Natur“. Es ist wichtig, dass hierbei auch die Richtung angegeben wird.

Damit bin ich bei einem Thema, das in diesem Jahr noch eine große Rolle spielen wird: die internationale Klimakonferenz, der Klimawandel. Der Wert der wissenschaftlichen Expertise im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist natürlich von großer Bedeutung. Ich weiß nicht, wer von Ihnen sich erinnert – im Jahr 1990 gab es den Film *Der Marsch*. In diesem Film sind viele Tausende Menschen aufgrund der Klimaveränderungen aus Afrika geflohen. Manche der Bilder, die wir heute sehen, erinnern an Darstellungen aus diesem Film.

Ich denke, es ist bei allen Zweifeln und bei allen Unsicherheiten klar, dass das Zwei-Grad-Ziel – kein Anstieg der durchschnittlichen Temperatur um mehr als zwei Grad – weitgehend akzeptiert ist. Wenn wir uns im Dezember in Paris treffen, dann sollten wir ein verbindliches Klimaschutzabkommen verabschieden, um diesem Ziel näher zu kommen. „Paris“ wird aber noch nicht die Lösung für die Zielerreichung sein. Die freiwilligen nationalen Beiträge, auf die wir uns geeinigt haben, nachdem wir in Kopenhagen einen schweren Rückschlag zu verzeichnen hatten, sind nur ein erster Schritt. Wir brauchen eine wirklich glaubwürdige Perspektive zur langfristigen Dekarbonisierung und einen dynamischen Mechanismus, der es möglich macht, die Schritte immer wieder zu überprüfen, über das gesamte Jahrhundert hinweg.

Wir haben deshalb auf dem G7-Gipfel in Elmau den Klimaschutz prioritär auf der Tagesordnung gehabt und konnten notwendige Akzente setzen. Eine der großen Herausforderungen wird nicht nur sein, dass die Industrieländer selber mit gutem Beispiel vorangehen. Tatsache ist, dass ohne einen Beitrag der Schwellenländer die Klimaziele unter gar keinen Umständen erreicht werden können. Wir können dabei im Sinne eines Zurverfügungstellens von Technologien vorangehen. Aber es wird auch ein zweiter Punkt wichtig sein: Die Versprechen der Finanzierung von Verbesserungen in Entwicklungsländern. Wir haben uns bereits in Kopenhagen bereiterklärt, 100 Milliarden Euro, private und öffentliche Mittel, ab 2020 jährlich zur Verfügung zu stellen. Der Erfolg in Paris wird wesentlich davon abhängen, ob uns in diesem Zusammenhang ein glaubwürdiges Versprechen gelingt. Daran wird mit Hochdruck gearbeitet.

Das G7-Treffen in Elmau war aber auch ein wichtiges Beispiel für den Transfer anderer wissenschaftlicher Erkenntnisse. Ich möchte mich für die wertvollen Stellungnahmen bedanken, die von allen wissenschaftlichen Akademien der G7 unter der Federführung der Leopoldina zur Zukunft der Meere, zur Bekämpfung von sogenannten vernachlässigten Tropenkrankheiten und von Antibiotikaresistenzen entstanden sind. Das sind sehr spannende Punkte. Ihre Informationen aus den G7-Akademien sind nicht nur in die Abschlussklärung eingegangen, sondern führen uns auch in der Sache wirklich weiter.

Jedes Thema für sich ist von größtem Interesse. Wir haben in diesem Jahr im Zusammenhang mit Ebola erlebt, welche Notwendigkeit besteht, dass Globalisierung auch Antworten auf die Frage von Epidemien und Pandemien gibt. Insoweit sind wir als Weltgemeinschaft überhaupt noch nicht gewappnet. Wir haben uns vorgenommen, an diesem Thema weiterzuarbeiten. Wir haben ein Panel bei den Vereinten Nationen eingerichtet und mit der WHO gesprochen. Die Weltbank wird Notfallpläne mit erarbeiten. Denn so, wie wir uns ein Sicherheitssystem gegen militärische Angriffe erarbeiten und wie es den Sicherheitsrat der Vereinten Nationen gibt – der zwar auch nicht immer gut arbeitet; aber immerhin gibt es ihn –, so brauchen wir auch ein globales System der schnellen Reaktion auf globale Herausforderungen durch Epidemien.

Dass neues Wissen in medizinischen Fragen für viele Menschen ein Gewinn an Lebensqualität ist, ist selbstverständlich. Das Thema Gesundheit ist auch insofern ein span-

nendes Thema, weil es ärmere und reichere Länder stark verbindet. Wir erleben ja, dass das Thema Gesundheit mit wachsendem Wohlstand nicht etwa unwichtiger, sondern immer interessanter wird. Es geht um ein längeres Leben, um ein erfüllteres Leben. Auch deshalb sind die Anregungen der Leopoldina zum Thema „Public Health“ auf sehr großes Interesse gestoßen. Sie knüpfen unmittelbar an die Versorgungsrealität und Belange von Patientinnen und Patienten an. Es ist sehr wichtig, dass die Möglichkeiten der individualisierten Medizin zunehmen werden. Es geht um maßgeschneiderte Ansätze in der Prävention, Diagnostik und Therapie. Wenn sich die Sozialwissenschaftler dann auch noch damit befassen, wie sich die immer stärker werdende Individualisierung der Diagnosen und Therapien auf die Solidarität in den Versicherungsgemeinschaften auswirken könnte, wäre das ein weiteres sehr spannendes und interessantes Thema.

Dass die gesamte Entwicklung sehr stark von den Informations- und Kommunikationstechnologien getrieben wird, ist klar. Der Wohlstand Deutschlands und vieler anderer Länder wird davon abhängen, inwieweit wir in der Lage sind, Informations- und Kommunikationstechnologien mit klassischen industriellen Wertschöpfungsmöglichkeiten und zum Beispiel auch mit klassischen medizinischen Möglichkeiten zu verbinden.

Hierbei hat Europa noch nicht die Spitzenposition in der Welt erreicht. Wir müssen diesbezüglich aufholen. Und wir müssen vor allen Dingen verstehen – ich bitte die Leopoldina, uns dabei zu helfen –, dass Daten ein Rohstoff sind, dass die Verarbeitung von Daten notwendig ist, um neue Produkte zu ermöglichen, dass Datenprodukte im Wesentlichen das Verbindungsglied zwischen Konsumenten und Produkte der klassischen Art sein werden und dass wir an dieser Schnittstelle vorne mit dabei sein müssen und den Anschluss nicht verlieren dürfen.

Die Europäische Union hat sich in einer langen Debatte mit der sogenannten Datenschutzgrundverordnung befasst. Diese Datenschutzgrundverordnung wird darstellen, wie wir mit Daten umgehen können. Das Ganze muss noch im Europäischen Parlament diskutiert werden. Dort ist eine gewisse Tendenz zum Datenschutz ausgeprägt – ich würde sagen, eine asymmetrische Tendenz zum Datenschutz. Wir müssen mehr Symmetrie zwischen der Kreativität bei der Schaffung neuer Produkte und dem Schutz vor Missbrauch von Daten erreichen. Das wird für die Wertschöpfungsmöglichkeiten in der Europäischen Union von zentraler Bedeutung sein.

Wir haben heute eine sehr asymmetrische Situation, muss ich wieder sagen. In den Vereinigten Staaten kann man grob sagen: Alles, was im Umgang mit Daten nicht verboten ist, ist erlaubt. In Europa ist alles verboten, was nicht explizit erlaubt ist. In dieser Unterschiedlichkeit besteht eine Situation, in der Bürgerinnen und Bürger der Europäischen Union amerikanischen Unternehmen Daten zur Verfügung stellen, die auf amerikanischem Boden verarbeitet werden und dann in die Europäische Union zurück transferiert werden. Aber die Art der Verarbeitung, wie sie in Amerika stattfindet, könnte niemals in Europa stattfinden. Deshalb ist es ganz wichtig, über das sogenannte *Safe-Harbor*-Abkommen so zu verhandeln, dass die Datenschutzgrundsätze, die auf europäischem Boden in Zukunft gelten werden, auch für die Produktion gelten müssen, sodass dann auch amerikanische Unternehmen auf europäischem Boden zu europäischen Konditionen produzieren. Das ist an vielen Stellen der Realwirtschaft heute schon ganz selbstverständlich; und das müssen wir im Umgang mit Daten natürlich auch schaffen.

Meine Damen und Herren, es gibt also viele Aufgaben gerade auch im Zusammenhang mit der Digitalisierung. Wir sind dankbar für die Zuarbeit und Beratung. Auch Sie, Herr

Professor HACKER, sind bei unserem Innovationsdialog mit dabei, in dem wir diese Fragen ja sehr intensiv diskutieren. Wir haben den IT-Gipfel und viele andere Plattformen.

Meine Damen und Herren, zum Wohlstand gehört auch, dass wir wissenschaftlichen Nachwuchs und ausreichend qualifizierte Fachkräfte haben. Wir werben für die sogenannten MINT-Fächer in den verschiedensten Varianten. Sie tun das mit Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik ja auch. Ich denke, es lohnt sich, früh anzusetzen. Ich habe vor kurzem eine Grundschule, eine sogenannte MINT-Garage, im bayerischen Buch besucht. Es sind großartige Angebote, die es an vielen Stellen gibt. Ich möchte allen Wissenschaftlern und auch jenen Studierenden danken, die sich die Mühe machen, junge Menschen frühzeitig an diese Berufe heranzuführen.

Es gibt viele vernünftige Gemeinschaftsprojekte wie die Allianz für Aus- und Weiterbildung, den Hochschulpakt, den Qualitätspakt Lehre und die Qualitätsoffensive Lehrerbildung. Der Bund, die Bundesregierung also, hat im vergangenen Jahr die BAföG-Kosten vollständig übernommen, um einer asymmetrischen Entwicklung entgegenzuwirken, nämlich der zwischen den nichtuniversitären Forschungsinstitutionen und den Forschungsmöglichkeiten an Universitäten. Es sind knapp 1,2 Milliarden Euro pro Jahr freigeworden, um stärker in die Universitäten investiert zu werden. Wir loben die Länder, die das auch getan haben, und tadeln die, die es nicht getan haben. Ich will jetzt keine Beispiele nennen, habe aber an Sachsen-Anhalt nichts auszusetzen.

Wir versuchen, auch die Berufsentwicklungen im Wissenschaftsbereich besser zu regeln. Dem durchaus vorhandenen gewissen Missbrauch von Zeitverträgen muss entgegen gewirkt werden, wenngleich ich weiß, dass es eine sehr schwierige Aufgabe ist, es auf der einen Seite nicht zu einer Verstopfung des Wissenschaftssystems kommen zu lassen und auf der anderen Seite jungen Menschen irgendwann auch eine vernünftige Perspektive zu geben. Es laufen Gespräche mit den Ländern zu einem *Tenure-Track*-Programm. Alles, was man aus der internationalen Erfahrung weiß, ist, dass damit, wenn man es gut aufstellt, vernünftige Möglichkeiten zu erreichen sind.

Die Exzellenzinitiative, die Gutes gebracht hat, wird jetzt überprüft und ab 2017 fortgesetzt. Wir haben uns nach langem Ringen auch entschlossen, Artikel 91b des Grundgesetzes zu ändern. Das heißt, es gibt – das hört sich eigentlich ganz normal an – die Möglichkeit der institutionellen Förderung von außeruniversitären Forschungseinrichtungen und von Universitäten. Das ist für die Cluster-Bildung der internationalen Forschungslandschaft extrem wichtig. Irgendwann hatte auch kaum noch jemand außerhalb unseres Landes dafür Verständnis, dass man das quasi nur verbotenerweise machen konnte. Jetzt aber ist es möglich.

Wir haben uns seitens der Bundesregierung entschlossen, den Aufwuchs der außeruniversitären Forschungsmittel von drei Prozent jährlich voll zu übernehmen, die Länder also davon zu entlasten. Das gibt unserem Wissenschaftssystem, so denke ich, eine gute Berechenbarkeit, die auch dazu geführt hat, dass es viele Wissenschaftler durchaus attraktiv finden, nach Deutschland zu kommen. Wir sind immer so gut wie dabei, das Drei-Prozent-Ziel – also drei Prozent des Bruttoinlandsprodukts für Forschung und Entwicklung auszugeben – zu erfüllen. Dabei sind ein Drittel staatliche Leistungen und zwei Drittel Forschungsleistungen der Wirtschaft, was wiederum bedeutet, dass wir alles tun müssen, um die Forschungsressourcen der Wirtschaft möglichst in Deutschland zu halten, was angesichts des globalen Drucks aber nicht mehr ganz selbstverständlich ist.

Wir haben die *Hightech*-Strategie zu einer ressortübergreifenden Innovationsstrategie weiterentwickelt. Ich denke, das kommt den Forschungsaktivitäten sehr zugute. Außerdem

bekennen wir uns zu einer breiten wissenschaftlichen Freiheit. Wir glauben, je größer die Freiräume für wissenschaftliches Arbeiten sind, desto größer ist auch der Ertrag. Das heißt natürlich auch, dass wir auf die Verantwortung der Wissenschaftsorganisationen setzen. Dazu will ich sagen: Der Verantwortung kommt die Leopoldina in herausragender Weise nach. Trotz ihres Standorts auf einer – wenn auch überschaubaren – Anhöhe hat sie die Bodenhaftung nicht verloren; sie steht mitten im Leben der Forschung.

Deshalb möchte ich Sie zum Abschluss bitten, Ihrem Ruf, den Sie genießen, durch interessante, spannende Projekte, durch das Einbringen in gesellschaftliche Diskussionen, durch hohe wissenschaftliche Qualität, aber auch durch die Fähigkeit von Wissenschaftlern, eine Sprache zu pflegen, die auch die nicht wissenschaftlich Gebildeten erreicht, ohne dass es zu einer groben Verfälschung des wissenschaftlichen Inhalts kommt, weiterhin Rechnung zu tragen. Brücken zwischen Wissenschaft und Gesellschaft sind außerordentlich wichtig, weil wir es ansonsten nicht schaffen werden, Menschen für die Wissenschaft zu begeistern.

Wenn Sie sich dann noch durch eine Reise nach Wittenberg stärken, die Fragen der Reformation studieren, sich die Cranach-Bilder anschauen können und sich dann immer noch fragen, ob nach Transformationen Systeme immer noch unverändert sind oder ob manche auch verändert sein könnten, dann ist alles gut.

Ich wünsche Ihnen eine gute Zeit hier. Danke für die Einladung.

Bundeskanzlerin Dr. Angela MERKEL
Bundeskanzleramt
Willy-Brandt-Straße 1
10557 Berlin
Bundesrepublik Deutschland

Symmetriebrüche in der Moral

Dieter BIRNBACHER ML (Düsseldorf)



Zusammenfassung

Geläufige Grundsätze der Alltagsmoral, wie die Goldene Regel und elementare Fairnessprinzipien, weisen darauf hin, dass ein symmetrisches Verhältnis zwischen moralisch Verpflichteten und durch diese Verpflichtungen Begünstigten den Lebensnerv der Moral ausmacht. Damit Moral als informelles gesellschaftliches Ordnungssystem funktioniert, müssen möglichst viele ein Eigeninteresse daran haben, moralische Normen zu befolgen oder zumindest ihre Befolgung öffentlich zu fordern. Dafür, dass dieses Eigeninteresse besteht, sorgt u. a. der Wunsch, den zu erwartenden Sanktionen für Pflichtverletzungen zu entgehen. Eine Minimaethik, die sich auf die Symmetrie zwischen moralischem Geben und Nehmen stützt, ist allerdings nicht geeignet, mehr als nur einen „harten Kern“ der Moral zu rekonstruieren – diejenige Kernmoral, ohne die auch eine „Räuberbande“ (KANT) nicht überleben würde. Wesentliche moralische Verpflichtungen werden von einer Minimaethik nicht erfasst, entweder weil sie sich auf nicht sanktionsfähige Individuen oder Kollektive richten oder weil die Moralsubjekte unzureichend motiviert sind, diesen Pflichten aus selbstbezogenen Interessen nachzukommen oder sie auch nur zu akzeptieren. Auf der Ebene des Individuums wird dazu die Figur des Amoralisten diskutiert, auf der kollektiven Ebene das Thema Generationengerechtigkeit. Den Schluss bildet eine kulturphilosophische Überlegung: Für traditionelle Gesellschaften ist der Versuch charakteristisch, die Lücke zwischen der Akzeptanz einer ambitionierten Moral und der Motivation zu ihrer Befolgung durch religiöse oder ideologische Konstruktionen zu schließen. In einer zunehmend religionsfernen und weltanschaulich neutralen moralischen Kultur ist mit einer derartigen „artificial harmony of interests“ (BENTHAM) nicht zu rechnen. Die Frage stellt sich, ob eine postmetaphysische moralische Sozialisation, auf die Milieutheoretiker wie John Stuart MILL hofften, zur Schließung der Lücke ausreichen kann.

Abstract

Common principles of everyday morality like the Golden Rule and an elementary principle of fairness suggest that a symmetrical relation between the subjects of moral obligations and those profiting from conformity with them are of the very essence of morality. A functioning morality as an informal institution of social order depends on the fact that as many as possible have a self-related interest to follow the norms of morality or, at least, to publicly proclaim obedience to them. This interest in turn depends on the expectation that disobedience will incur social sanctions. However, a minimal ethics built on the symmetry of moral give and take is capable of reconstructing no more than the “hard core” of morality, the core without which even a robber band (KANT) would not be able to survive. It is incapable of covering important moral obligations, either because these are directed to individuals or collectives without sanctioning capacity or because the moral subjects are insufficiently motivated to follow them or even to accept them. On the individual level, the talk discusses in detail the perspective of the amoralist and, on the collective level, the issue of intergenerational justice. The talk concludes with a reflection on cultural history: It is characteristic of traditional societies to close the gap between the acceptance of an ambitious morality and the motivation to follow it by religious and ideological constructions. In an increasingly areligious and ideologically neutral moral culture an “artificial harmony of interests” (BENTHAM) of this kind can no longer be expected. The question arises if a postmetaphysical moral socialisation such as milieu theoreticians like John Stuart MILL hoped for will be able to close the gap.

1. Einleitung: Symmetriekonstruktionen in der Moralphilosophie und ihre Grenzen

Symmetrie ist eine wirkmächtige Kategorie nicht nur in den Wissenschaften und den Künsten, sondern auch in der Philosophie. Wie in der Wissenschaft fungiert sie in der Philosophie hauptsächlich als methodische und heuristische Idee. Allerdings hat auch die Philosophie gelernt, dass zwischen Theorie und Realität keine prästabilisierte Harmonie besteht. Die Realität entspricht nicht durchgängig den architektonischen Desideraten. Die perfekte Symmetrie der platonischen Körper ist ein Konstrukt. Die „Kristallreinheit“ der Logik etwa – das hat uns die Geschichte dieser Disziplin im 20. Jahrhundert gelehrt – hat sich weitgehend als Blütenraum erwiesen. Auch für die Philosophie gilt seitdem WITTGENSTEINS so ernüchterte wie ernüchternde Devise: „Zurück auf den rauhen Boden.“¹

Auch in der Moralphilosophie, soweit sie sich mit der Analyse, Rekonstruktion und Systematisierung der Moral als gesellschaftlichem Ordnungssystem befasst, haben Konstruktionen, die auf Symmetrien zurückgreifen, immer wieder die engen Grenzen aufgezeigt, die der Erfüllbarkeit des Ideals einer ästhetisch befriedigenden Architektur der Kategorien, Begriffe und Werte gesetzt sind. Die Moral als informelles System der Verhaltensregulierung fordert ja stets wieder aufs Neue zu ethischer Systematisierung heraus: Im Gegensatz zum Recht, das zu großen Teilen auf willkürlichen und ausdrücklichen Setzungen basiert, ist die Moral als nicht willkürlich gesetztes, sondern „gewachsenes“ Ordnungssystem ein Stück „rauhes Terrain“ – unregelmäßig und voller Stolpersteine. Angesichts ihrer vielfältigen kulturellen Quellen und der historischen Erfahrungen, die in sie eingegangen sind, ist sie komplex, heterogen und unübersichtlich, vergleichbar den natürlichen Sprachen im Vergleich mit den Idealsprachen der Logik und Mathematik.

Die Ethik übernimmt in Bezug auf die Moral dabei eine ähnliche Rolle wie die Grammatik in Bezug auf die Sprache – eine Rollenbeschreibung, die von ADAM SMITH stammt, der mit seiner *Theorie der ethischen Gefühle* von 1759 gleich auch ein eindrucksvolles Beispiel für die Systematisierung der Moral seiner Gesellschaft und seiner Zeit gegeben hat (SMITH 1977). Wie in der Grammatik bleiben auch in der Moral die Regeln für die *native speakers* weitgehend implizit und wenig überschaubar. Vermittelt werden sie weniger durch ausdrückliche Belehrung als durch langjährige Gewohnheit und Übung und sind u. a. deshalb stark emotional besetzt. Für beide Regelsysteme gilt, dass nicht alle, die bestimmte Regeln vertreten oder propagieren, sie auch in der Praxis konsequent einhalten. Andersherum gibt es diejenigen, die die Regeln korrekt einhalten, weil sie dazu erzogen worden sind, dennoch aber für ihre Lockerung eintreten. Bei beiden kommt es im zeitlichen Verlauf zu strukturell ähnlichen „Generationenkonflikten“: Wie ganze grammatische Kategorien, die Sprachkonservativen heilig sind, in Vergessenheit geraten, geraten auch ganze moralische Kategorien in Vergessenheit. In beiden Bereichen gibt es keine zentrale Instanz, die die Regeln setzen und deren Befolgung erzwingen könnte. Der Wandel vollzieht sich dezentral, durch konvergierende Erosions- und Erneuerungsprozesse.

Symmetrien übernehmen gerade in den eindrucksvollsten Versuchen, das System der Moral zu dem zu bringen, was WITTGENSTEIN „übersichtliche Darstellung“ nannte, eine wichtige Ordnungsfunktion. Das weithin bekannteste Beispiel ist ARISTOTELES' Mesotes-Lehre, die Lehre von der Tugend als „goldenem Mittelweg“ zwischen einem Zuwenig und einem Zuviel, d. h. zwischen je zwei polar entgegengesetzten verderblichen Extremen.

1 WITTGENSTEIN 1984, S. 197.

Das richtige Maß ist dabei gewissermaßen die Symmetrieachse zwischen jeweils zwei sich symmetrisch gegenüberstehenden Untugenden. Als theoretische Konzeption scheint diese Lehre nicht besonders vielversprechend, sondern eher trivial: „Zuviel“ und „zuwenig“ sind bereits sprachlich negativ konnotiert, und was weder zuviel noch zuwenig ist, ist zwangsläufig besser als die Extreme. Aber nicht trivial ist, dass sich für eine Reihe von Tugenden tatsächlich eine Reihung finden lässt, bei der die jeweils positiv bewerteten Charaktermerkmale in der Mitte zwischen zwei negativ bewerteten zu liegen kommen (Tab. 1).

Tab. 1 Einordnung der Charaktermerkmale

| | | |
|--------------------|-------------------|-----------------|
| Feigheit | Tapferkeit | Tollkühnheit |
| Stumpfheit | Besonnenheit | Zügellosigkeit |
| Verschwendung | Großzügigkeit | Geiz |
| Eitelkeit | Selbstsicherheit | Kleinmütigkeit |
| Schwächlichkeit | Milde | Jähzorn |
| Ironie | Wahrhaftigkeit | Unverschämtheit |
| Ungeschicklichkeit | Gewandtheit | Ungezogenheit |
| Grobheit | Liebenswürdigkeit | Gefallsucht |
| Schamlosigkeit | Scham | Schüchternheit |

Eine noch grundlegendere theoretische Rolle übernimmt eine Symmetriekonstruktion in SPINOZAS individualethischem Konzept der Ersetzung der sogenannten passiven Affekte durch die aktiven Affekte. Hier liegt die positive Bewertung zwar durchweg asymmetrisch auf der Seite der aktiven Affekte, aber ansonsten ist die Symmetrie der Kategorien bemerkenswert vollständig (Tab. 2).

Tab. 2 Aktive und passive Affekte

| Aktive Affekte | Passive Affekte |
|--|--|
| – beziehen sich auf ein Handeln | – beziehen sich auf ein Erleiden |
| – bedeuten einen Übergang zu größerer Vollkommenheit | – bedeuten einen Übergang zu geringerer Vollkommenheit |
| – hängen von unserer eigenen Natur ab und sind durch diese erklärbar | – hängen u. a. von äußeren Ursachen ab, sind nicht durch unsere eigene Natur erklärbar |
| – beruhen auf adäquaten Ideen, stimmen mit der Vernunft überein | – beruhen auf inadäquaten Ideen, stimmen nicht oder nicht vollständig mit der Vernunft überein |
| – erhöhen die Wirkungskraft des Körpers | – mindern die Wirkungskraft des Körpers |
| – dienen der Selbsterhaltung und dem wohlverstandenen Eigeninteresse | – sind unserer Selbsterhaltung und unserem Glück abträglich |
| – dienen der Übereinkunft zwischen den Menschen | – schaffen Gegensätze und Konflikte unter den Menschen |

Beide Konstruktionen sind zweifellos glänzende Systematisierungen, offenbaren aber zugleich deren Grenzen. Der Mangel der einen ist der Überfluss der anderen. Der aristotelischen Symmetriekonstruktion fehlt es an Vollständigkeit. So lässt sich eine herausragend wichtige Tugend, der ARISTOTELES in der *Nikomachischen Ethik* ein ganzes Buch widmet, die Gerechtigkeit, nur mit großer Mühe in das Mesotes-Schema einordnen. Auf der anderen Seite könnte SPINOZAS Symmetrieschema vollständiger nicht sein, tut aber den Phänomenen vielfachen Zwang an. Die Symmetrie ist ein Prokrustesbett. Das sieht man bereits

an der ersten Dichotomie: Dass nur Emotionen, die sich auf ein Handeln beziehen, eine positive Valenz besitzen, ist allenfalls eine Halbwahrheit, selbst dann, wenn man SPINOZA zugestehet, dass er nicht primär deskriptive, sondern normative Zwecke verfolgt und ein von der Philosophie der Stoiker inspiriertes Lebensideal entwirft, nach dem jeder ausnahmslos und vollständig seines Glückes Schmied ist.

2. Asymmetrien in der Moral

Das Scheitern von Symmetriekonstruktionen in der Ethik geht nicht nur auf eine in der Geschichte der abendländischen Philosophie dominierende Tendenz zur Übersystematisierung und Übervereinfachung zurück, sondern auch auf ihren Gegenstand, die Moral. Die Mehrzahl der grundlegenden Kategorien, mit denen wir das moralische Universum aufteilen und menschliches Verhalten und die dazugehörigen Motive, Einstellungen und Wertsetzungen bewerten, weisen unübersehbare Asymmetrien auf.

Die zentralste dieser Asymmetrien betrifft die Dichotomie von *Gut und Schlecht*, *Gut und Böse*, *Gütern und Ungütern*, *Nutzen und Schaden*. Zwischen den Gliedern dieser Gegensatzpaare besteht für den *moral point of view* kein Gleichgewicht. Vielmehr ist die jeweils mit negativem Vorzeichen versehene Kategorie von durchweg größerer Bedeutung.² Es ist moralisch vordringlicher, Schaden zu vermeiden als Gutes zu tun. Untaten schlagen stärker negativ zu Buche als Wohltaten positiv. In der Hierarchie unserer Verpflichtungen stehen die Pflichten zur Unterlassung von Schädigungen an oberster Stelle. Nicht zufällig gibt die ärztliche Ethik bereits bei HIPPOKRATES dem Grundsatz des Nicht-Schadens Vorrang vor allen anderen: *primum nil nocere*. Wohl gemerkt: Moral erschöpft sich nicht in den Geboten zu Schadensvermeidung, -verhinderung und -ausgleich. Dass das Gute „– dieser Satz steht fest – stets das Böse (ist), das man läßt“ ist Wilhelm BUSCHS Karikatur der Biederermannmoral, die sich etwas darauf einbildet, der Moral bereits dadurch Genüge getan zu haben, dass sie keiner Versuchung zum Bösen nachgegeben hat. Aber selbstverständlich gehört das Gutes-Tun ebenso zur Moral wie das Nicht-Schädigen, wenn auch mit nicht ganz derselben Priorität.

Ein ähnlich asymmetrisches Verhältnis – und aus ähnlichen Gründen – besteht zwischen *Rechten und Pflichten*. Rechte sind nicht denkbar ohne Pflichten, aber Pflichten sehr wohl ohne Rechte. Wenn A ein Recht hat, gibt es stets eine oder mehrere Personen B, die Pflichten gegen A haben, auch wenn diese nicht immer eindeutig identifizierbar sind. Wenn A B eine bestimmte Summe geliehen hat, hat A ein Recht darauf, mindestens dieselbe Summe zu einem späteren Zeitpunkt von B zurückzuerhalten. Allerdings können A auch Rechte zukommen, ohne dass von vornherein feststeht, wer die entsprechende Pflicht hat, diesen Rechten zu genügen. Diese Rechte bestehen dann gegenüber der Gesellschaft als ganzer, die daraufhin in der Pflicht steht, ein oder mehrere Mitglieder zu beauftragen, der entsprechenden Pflicht nachzukommen.

Auf der anderen Seite entsprechen nicht allen Pflichten Rechte, z.B. Pflichten der Wohltätigkeit oder der Milde. Wenn A gegen andere Wohltätigkeit übt oder Milde walten lässt, haben diese in der Regel kein Recht darauf. KANT und MILL haben diese Pflichten als *unvollkommene* Pflichten den *vollkommenen* Pflichten, denen Rechte entsprechen,

2 Vgl. TRANÖY 1967.

gegenübergestellt und mit weiteren Merkmalen, die die Asymmetrie verschärfen, kombiniert: die nicht ausnahmslose Geltung, der größere Spielraum bei der Wahl des Begünstigten, der höhere Grad an Abwägbarkeit gegen andere Pflichten im Konfliktfall und die weitergehende Dispositionsfreiheit hinsichtlich der konkreten Ausführung. Bei Schulden oder Versprechen steht fest, welcher Art die Leistung ist, die A für B erbringen muss. Seine Wohltätigkeitspflichten dagegen lassen A Gestaltungsspielraum und erlauben es ihm, außermoralische und persönliche Vorlieben zur Geltung zu bringen.

Noch in einer weiteren Hinsicht geht die Zuschreibung von Rechten beim Berechtigten über die Zuschreibung von Pflichten beim Verpflichteten hinaus. Die Zuschreibung von Rechten geht anders als die Zuschreibung von Pflichten mit einer besonderen *Emphase* einher. Wer ein moralisches Recht gegen einen anderen hat, hat in der Regel einen besonders *starken* Anspruch gegen diesen anderen. Darüber hinaus übernehmen Rechte anders als Pflichten *advokatorische* Funktionen. Wer ein Recht geltend macht, erhebt nicht nur eine moralische Forderung, sondern macht sich zum *Anwalt* des Rechtsinhabers. Wer von Rechten spricht, fordert die Erfüllung von Pflichten im eigenen oder fremden Namen ein. Außerdem steht es demjenigen, der ein Recht auf etwas hat, frei, sein Recht bei entsprechender Gelegenheit *einzuklagen*. Wer ein Recht darauf hat, nicht zu verhungern, braucht nicht darauf zu warten, dass andere sich ihrer Pflicht erinnern, ihn nicht verhungern zu lassen, und er braucht auch nicht dankbar dafür zu sein.³

Damit sind die Asymmetrien in den Grundkategorien der Moral nicht erschöpft. Eine auffällige weitere Asymmetrie besteht zwischen *Handlungsverboten* und *Handlungsgeboten*. Handlungsverbote haben in der Moral einen klaren Primat. Sie bilden gewissermaßen den harten Kern der Moral – der Moral, die selbst noch – mit KANTS Beispiel – innerhalb einer *Räuberbande* gelten muss, wenn sie halbwegs funktionsfähig bleiben soll. Es ist ja kein Zufall, dass im alttestamentarischen Dekalog lediglich das Gebot der Elternliebe eindeutig als Handlungsgebot formuliert ist, alle übrigen als Handlungsverbote. Handlungsverbote spielen auch in den modernen Systemen der *Minimalethik* die Hauptrolle. „Minimalethik“ heißt die betreffende Sparte der Moralphilosophie, weil sie versucht, den unaufgebbaren und unkontrovers begründbaren Kern der Moral herauszupräparieren. So sind in Bernard GERTS Update der Zehn Gebote, den von ihm sogenannten „Moralischen Regeln“,⁴ sieben von zehn Regeln *Handlungsverbote*:

- (1.) Du sollst nicht töten.
- (2.) Du sollst keine Schmerzen verursachen.
- (3.) Du sollst nicht unfähig machen.
- (4.) Du sollst nicht Freiheit oder Chancen entziehen.
- (5.) Du sollst nicht Lust entziehen.
- (6.) Du sollst nicht täuschen.
- (7.) *Du sollst Deine Versprechen halten.*
- (8.) Du sollst nicht betrügen.
- (9.) *Du sollst dem Gesetz gehorchen.*
- (10.) *Du sollst Deine (beruflichen) Pflichten erfüllen.*

3 Vgl. FEINBERG 1980, S. 142.

4 GERT 1983, S. 176.

Eine praktisch hochbedeutsame Ausformung hat diese Asymmetrie von Handlungsverboten und Handlungsgeboten im Strafrecht gefunden, etwa in StGB § 13:

„Wer es unterläßt, einen Erfolg abzuwenden, der zum Tatbestand eines Strafgesetzes gehört, ist nach diesem Gesetz nur dann strafbar, wenn er rechtlich dafür einzustehen hat, daß der Erfolg nicht eintritt, und wenn das Unterlassen der Verwirklichung des gesetzlichen Tatbestandes durch ein Tun entspricht. Die Strafe kann nach § 49 Abs. 1 gemildert werden.“

Das heißt: Nur eine Person, die zu demjenigen, dem sie durch Unterlassen Schaden zufügt, als sogenannter *Garant* in einer besonderen Verantwortungsbeziehung steht, macht sich durch ein Unterlassen, das in seinen Folgen einem strafbaren aktiven Tun entspricht, strafbar. Darüber hinaus kann die Strafe gegenüber der Strafe für ein aktives Tun gemildert werden. Diese Asymmetrie in der strafrechtlichen Bewertung von Tun und Unterlassen ist ein Reflex der analogen Asymmetrie in der alltagsmoralischen Bewertung. Damit ist die Sache für die Ethik aber natürlich nicht erledigt. Die Frage ist, wie weit diese intuitive Asymmetrie überzeugend begründet werden kann.

Eine ganze Reihe der in der Geschichte der Moralphilosophie entwickelten Begründungen haben sich als wenig tragfähig erwiesen. THOMAS VON AQUIN – der auf dem Umweg über den mittelalterlichen Rechtslehrer ACCURSIUS eine der Hauptquellen für die Abstufung der Sanktionen für Handlungen und Unterlassungen im positiven Recht geworden ist – hat gemeint, die normative Asymmetrie zwischen Handeln und Unterlassen auf die zwischen Gutes tun und Schädigen zurückführen zu können. Moralnormen, die schädigendes Handeln verbieten, übernehmen für das Gemeinwohl eine wichtigere Funktion als Moralnormen, die dazu auffordern, Gutes zu tun. Diese Kopplung entspricht zugestandenmaßen einem verbreiteten Denkschema: Wir assoziieren mit der Verpflichtung, andere nicht zu schädigen, primär das Unterlassen von Handlungen, während wir mit der Verpflichtung, anderen Gutes zu tun, eher an ein Handeln denken. Aber dieses Schema kann allenfalls für die *typischen* Fälle gelten. Es trifft längst nicht auf alle Fälle zu. Viele Kriminalromane von Agatha CHRISTIE leben davon, dass man Mord auch durch Unterlassen begehen kann. Und Wohltätigkeit und Milde – als Formen des Wohltuns – kann man auch durch Unterlassen üben, etwa durch das Hinwegsehen über Verfehlungen oder das Verschonen von Strafe oder Vergeltung.

Weiter führt da die Erklärung KANTS, dass negative Pflichten die Eigenschaft haben, „immer“ befolgt werden zu können, während dies für viele positive Pflichten nicht gilt. Danach spiegelt die Moral die Tatsache, dass die Gelegenheit, andere aktiv zu schädigen, fortwährend besteht, während die Gelegenheit, andere durch Unterlassen zu schädigen, besondere und in der Regel nicht dauerhaft bestehende Umstände erfordert, etwa die Hilfsbedürftigkeit oder Abhängigkeit anderer. Dafür, einen anderen aktiv körperlich oder seelisch zu verletzen oder zu töten, besteht fortwährend Gelegenheit. Die Gelegenheit, einen anderen leiden oder sterben zu lassen, indem man es unterläßt, ihm zu Hilfe zu kommen, besteht nur in Situationen, in denen dieser Hilfe benötigt. Insofern sind Handlungsverbote vordringlicher als Handlungsgebote. Die Folgen der Zuwiderhandlung gegen Handlungsverbote scheinen insgesamt gravierender als die Folgen von Zuwiderhandlungen gegen Handlungsgebote.

Diese Erklärung vermag allerdings nur zu zeigen, dass Handlungsverbote *im Ganzen der Moral* vordringlicher sind als Handlungsgebote, nicht in jedem Einzelfall. Andererseits scheint die *funktionale* Perspektive, von der diese Erklärung ausgeht, durchaus viel-

versprechend, und bereits THOMAS VON AQUIN deutet eine funktionale Begründung an: Handlungen bedeuten für den Akteur in der Regel einen höheren *Aufwand* als Unterlassungen. Handlungsgebote sind in der Regel *anspruchsvoller* als Handlungsverbote. Soweit jedoch Handlungsgebote in der Regel schwerer zu befolgen sind, begründet dies zumindest eine *Vermutung*, dass bei Zuwiderhandlungen gegen sie eine schwächere moralische und rechtliche Sanktion angebracht ist als bei Zuwiderhandlungen gegen auf dieselben Folgen abzielenden Handlungsverboten. Eine moralische und rechtliche Sanktionierung von Unterlassungen läuft sehr viel eher auf eine normative *Überforderung* des Adressaten hinaus als eine moralische und rechtliche Sanktionierung folgenreicher Handlungen. Eine Gleichstellung von Handlungsgeboten mit Handlungsverboten wäre der Einstieg in das, was Arnold GEHLEN „Moralhypertrophie“ genannt hat.⁵ Wie die Evolution der Lebewesen und die Entwicklung der Sprachen scheint auch die Moral implizit einem *Ökonomieprinzip* zu folgen. Die Funktionalität der Moral – nicht anders als des Strafrechts – erfordert ein Maßhalten sowohl bei der Strenge der Forderungen als auch bei der Sanktionierung von Zuwiderhandlungen. Andernfalls würde sie Verweigerungshaltungen provozieren und die Schwächung ihrer Autorität riskieren. Für die Moral kommt es darauf an, zwischen Unter- und Überforderung die „rechte Mitte“ zu finden – vergleichbar der sogenannten Laffer-Kurve, die zu ermitteln erlaubt, welcher Steuersatz in dem Sinne optimal ist, dass er ein hohes Steueraufkommen sicherstellt, ohne ein Ausmaß an Steuerflucht und Steuerbetrug zu provozieren, das das Aufkommen überproportional mindert.

Die bisher genannten strukturellen Asymmetrien: die zwischen Gut und Böse, zwischen Rechten und Pflichten und zwischen Tun und Unterlassen haben es in erster Linie mit der Moral als *Normensystem* zu tun. In den Kategorien der Grammatik gesprochen betreffen sie primär die *Kompetenz* der Moralteilnehmer, ihre Fähigkeit, die richtigen moralischen Urteile zu bilden. Eine andere strukturelle Asymmetrie innerhalb der Moral, von der im Folgenden die Rede sein soll, betrifft primär die *Performanz* der Moralteilnehmer, die Rollenverteilung innerhalb der Moral als soziale Interaktion und das Ausmaß, in dem moralische Normen befolgt werden. Ich meine die Asymmetrie zwischen den potenziellen moralischen Akteuren einerseits, den potenziellen von der Moral oder Unmoral der Akteure Betroffenen andererseits, die Asymmetrie zwischen den *moral agents* und den *moral patients*.

Diese Asymmetrie beruht wesentlich darauf, dass aus verschiedenen Gründen nicht alle Inhaber von Rechten bzw. Nutznießer von Pflichten zugleich Inhaber von Pflichten sind. Entweder kommen sie aus prinzipiellen Gründen als Pflichtsubjekte nicht in Frage, oder sie kommen zwar als Pflichtsubjekte in Frage, aber stehen zu dem Verpflichteten in keiner Beziehung, die eine positive oder negative Gegenleistung zulässt. Beide Male ist die Reziprozität durchbrochen, auf die die sogenannten Vertragstheorien der Moralbegründung setzen, indem sie den einzelnen – individuellen oder kollektiven – Akteur verwundbar machen dafür, dass die jeweils Betroffenen ihrerseits als Akteure mit gleicher Münze heimzahlen.

Grundsätzlich nicht verpflichtbar sind etwa dauerhaft Unmündige und leidensfähige Tiere. Ihnen gegenüber bestehen Pflichten, ohne dass sie selbst als Pflichtsubjekte in die Pflicht genommen werden könnten. Zu dieser Gruppe gehören auch Kinder – wobei sich diese allerdings später als Erwachsene dankbar erweisen oder für erlittene Benachteiligungen rächen können. Diese Asymmetrie zwischen Gebern und Nehmern ist ein fort-

5 GEHLEN 1969, S. 141, 145.

während der Stachel im Fleisch der Moral. Denn gerade diejenigen mit besonders schwacher Sanktionsmacht sind in der Regel am vulnerabelsten und auf die Moral der anderen am stärksten angewiesen. Bezeichnend dafür ist die Herkunft des Worts „vulnerabel“. Als „vulnerabel“ galt in der römischen Militärsprache derjenige Soldat, der besonders verletzlich war, weil er bereits verletzt und Angriffen wehrlos ausgesetzt war.

Die andere, sehr viel größere Gruppe derjenigen, die zu den Verpflichteten in einer Beziehung stehen, die keine positive oder negative Gegenleistung zulässt, ist die unabsehbare Zahl der in *Zukunft* lebenden Menschen. Sie sind von unserem Handeln – heute besonders massiv – betroffen, verfügen aber über keine Sanktionsmacht in Bezug auf die Gegenwart. In diesem Fall ist die Asymmetrie im Geben und Nehmen ein Reflex der temporalen Asymmetrie. Handeln ist primär zukunftsorientiert, Erleiden vergangenheitsorientiert. Es gibt herzlich wenig, was die Zukunft für die Gegenwart tun kann. *Post-mortem*-Ehrungen von Wohltätern und *Post-mortem*-Entehrungen von Übeltätern spielen als Akte ausgleichender Gerechtigkeit allenfalls eine symbolische Rolle. Der Gedanke an spätere Ungnade wird nur wenige Übeltäter von ihrem Tun abhalten – es sei denn, die Betroffenen lebten nicht in der ferneren, sondern in der näheren Zukunft. Eltern können sich bei Großeltern, Kinder bei Eltern und Großeltern für Wohltaten erkenntlich zeigen wie für Übel schadlos halten. Großeltern und Eltern können von Kindern und Enkeln einen Preis (etwa in Form von Pensionszahlungen) für die Vorsorgeleistungen verlangen, die sie vor deren Geburt oder in deren Kindheit für sie erbracht haben, Kinder und Enkel können ein Erbe von Eltern und Großeltern mit der Drohung erpressen, sie andernfalls im Alter unversorgt zu lassen.

Aber auch hier ist die Symmetrie nicht vollständig. Die Kinder können von ihren Eltern nicht mehr an Ausgleichsleistungen fordern, als diese erbringen können; während die Eltern von den Kindern – zumindest solange es sich um geldwerte Leistungen handelt – mehr fordern können, als diese selbst erbringen können, da diese ihrerseits Belastungen auf Kinder und Kindeskinde überwälzen können. Die Kinder können von den Eltern nicht mehr nehmen, als diese haben. Die Eltern dagegen können die Kinder zwingen, eine Hypothek aufzunehmen, die nicht sie selbst, sondern erst die Enkel und Urenkel abzahlen.

3. Symmetriebrüche und das Problem der moralischen Motivation

Die Asymmetrie zwischen Geben und Nehmen in der Moral ist ein neuralgischer Punkt, weil sie sich gravierend auf den Lebensnerv der Moral, die moralische Motivation, auswirkt – als einer der Faktoren, die zu den verbreiteten und von Moralisten seit jeher beklagten Lähmungserscheinungen führen können. Es gibt nichts Gutes, es sei denn, man tut es, aber von den guten Vorsätzen zur Ausführung ist es ein weiter Weg. Idealisierend kann man vier Stufen ansetzen, die zwischen der befürwortenden Einstellung gegenüber einer moralischen Norm und deren konsequenter Befolgung liegen:

- Akzeptanz,
- Annahme,
- Anwendung,
- Aktion.

Akzeptanz heißt zunächst nicht mehr, als dass man eine bestimmte Norm – ob gebietender, verbotender oder erlaubender Art – befürwortet bzw. für richtig und berechtigt hält. Die *Annahme* geht bereits darüber hinaus, indem sie beinhaltet, dass man die Norm als Verhaltensleitlinie internalisiert, d. h. in seine persönlichen Verhaltensmotivationen aufnimmt und sie so weit mit seiner biografischen Identität verknüpft, dass sich Zuwiderhandlungen in Gefühlen von Schuld oder intensivem Bedauern auswirken. Eine dritte Stufe ist die Anwendung einer akzeptierten und internalisierten Norm auf eine vorliegende Situation, die vierte dann schließlich das der Norm entsprechende Handeln. Der Übergang von jeder einzelnen Stufe zur nächsten ist bei moralischen Normen hochgradig störbar. Es ist ein Gemeinplatz der empirischen Moralpsychologie, dass die Fähigkeit zu moralischen Urteilen weitgehend unabhängig von der Fähigkeit und Bereitschaft ist, sich diesen Urteilen gemäß zu verhalten.⁶ Auch die Internalisierung einer moralischen Norm bewahrt nicht davor, eine vorliegende Situation so umzuinterpretieren, dass die Norm nicht anwendbar scheint und uns den Aufwand und die Risiken einer Befolgung erspart. So wird eine Situation, in der sofortiges helfendes Eingreifen moralisch geboten wäre, auch von Menschen mit hochherzigen Prinzipien häufig so umgedeutet, dass ein Eingreifen nicht ratsam, weil zu riskant, peinlich oder unzumutbar erscheint.

Die Diskrepanz zwischen moralischen Überzeugungen und Handeln wird in der Regel auf *Willensschwäche* zurückgeführt. Aber ihre Wurzeln reichen möglicherweise tiefer. Sie könnten ihren Ursprung auch in der normativen und nicht nur psychologischen Tatsache haben, dass moralischen Überzeugungen nicht oder nicht durchweg der hohe Verbindlichkeitsstatus zukommt, der ihnen von den Moralisten unter den Moralphilosophen zugeschrieben wird. Es ist ja alles andere als ausgemacht, dass die Moral stets und immer Vorrang hat. Der bekannte indisch-britische Ökonom Amartya SEN gab in einem Beitrag von 1974 das folgende Beispiel:

„There is nothing particularly schizophrenic in saying: ‚I wish I had a vegetarian’s tastes, for I disapprove of the killing of animals, but I find vegetarian food so revolting that I can’t bear to eat it, so I do eat meat.‘⁷

Möglicherweise ist der von vielen Moralisten erhobene Anspruch verfehlt, moralischen Gründen komme grundsätzlich eine höhere Dignität und insofern eine höhere Verbindlichkeit zu als allen anderen. Das legen jedenfalls die seit SOKRATES in der Moralphilosophie entwickelten Versuche nahe, moralischen Gründen einen *eo ipso* höheren, wenn nicht sogar höchstmöglichen Verbindlichkeitsstatus zu sichern – denjenigen Status, auf den KANTS Redeweise von der *Unbedingtheit* moralischer Forderungen anspielt. Keiner dieser Versuche kann als besonders überzeugend gelten. Viele kranken daran, dass sie zirkulär sind, indem sie höherstufige moralische Prinzipien postulieren, aus denen die Verbindlichkeit bestimmter moralischer Prinzipien abgeleitet werden kann, die aber selbst die Frage herausfordern, warum man *ihnen* folgen sollte, wenn sie mit anderen Motiven und Interessen kollidieren. Die bekanntesten Metaprinzipien dieser Art sind bezeichnenderweise *Symmetrieprinzipien*, etwa die verschiedenen Verallgemeinerungsprinzipien, die eine faire Verteilung von Vorteilen und Lasten der Moral sicherstellen sollen: der Kategorische Imperativ KANTS etwa oder das in der analytischen Ethik entwickelte Prinzip der Universalisierung, nach dem moralische Urteile keine Eigennamen enthalten und niemanden

6 Vgl. MONTADA 1993, S. 268.

7 SEN 1974, S. 63.

ad personam privilegieren dürfen. Diese Prinzipien sind ihrerseits moralische Prinzipien, wenn auch auf einem ausgesprochen hohen Abstraktionsniveau, und für sie stellt sich erneut die Frage, warum man sie im Konfliktfall befolgen *muss*.

Interessanterweise war diese „Begründungslücke“ gerade demjenigen Philosophen am schärfsten bewusst, der die Höchstverbindlichkeit der Moral am intensivsten beschworen hat, Immanuel KANT. KANT sah, dass wenn der Kategorische Imperativ mehr sein soll als eine Rekonstruktion der etablierten Moral, nämlich ein autoratives und – in seiner Terminologie – „notwendiges“ Prinzip, es nicht hinreicht, dieses Prinzip lediglich zu *postulieren*. Denn warum sollte sich der Mensch in seiner von KANT emphatisch behaupteten Freiheit nicht *gegen* den Kategorischen Imperativ und den darin enthaltenen Grundsatz eines fairen Ausgleichs von Geben und Nehmen entscheiden? An dieser Stelle sieht sich KANT in einem Dilemma gefangen: Freiheit kann nicht schlicht mit Moral gleichgesetzt werden. Auch der Ausdruck „Autonomie“, der für beide verwendet werden kann, vermag über die Diskrepanz nicht hinwegzutäuschen. Letztlich sieht KANT keine andere Chance, den Vorrang der Moral zu begründen, als mit seiner Theorie der zwei Welten, nach der die Verstandeswelt, da sie die *Bedingung* der Sinnenwelt ist, dem Rang nach höher sein soll und ihr die Regeln diktieren darf. KANT verklausuliert dieses hochgradig spekulative Argument in einer der kompliziertesten Passagen seiner *Grundlegung zur Metaphysik der Sitten*:

„Weil aber die Verstandeswelt den Grund der Sinnenwelt, mithin der Gesetze derselben enthält, also in Ansehung meines Willens (der ganz zur Verstandeswelt gehört) unmittelbar gesetzgebend ist und also auch als solche gedacht werden muß, so werde ich mich als Intelligenz, obgleich andererseits wie ein zur Sinnenwelt gehöriges Wesen, dennoch dem Gesetze der ersteren, d. i. der Vernunft, die in der Idee der Freiheit das Gesetz derselben enthält, und also der Autonomie des Willens unterworfen erkennen, folglich die Gesetze der Verstandeswelt für mich als Imperativen und die diesem Princip gemäßige Handlungen als Pflichten ansehen müssen.“⁸

Aber selbst wenn man KANTS Metaphysik der zwei Welten akzeptiert, ist nicht evident, warum die eine den normativen Vorrang vor der anderen haben soll. Wir können diese Frage hier auf sich beruhen lassen. Wichtig ist nur zu sehen, dass auch hier die Verpflichtung, das Moralische zu tun, nicht unabhängig begründet, sondern aus einer von vornherein moralisch aufgeladenen Metaphysik abgeleitet wird.

Allerdings: Selbst wenn es so sein sollte, dass moralische Normen und Werte Anspruch darauf erheben können, im Konfliktfall stets Vorrang zu genießen, ist damit das Motivationsproblem nicht aus der Welt. Nichts garantiert, dass die inhärente Vorrangigkeit moralischer Normen und Werte, falls sie gelten sollte, auch als solche wahrgenommen wird. Und auch dann, wenn ihr in den Überzeugungen der Menschen angemessen Rechnung getragen wird, bleibt die Lücke zwischen Annahme und Aktion. Willensschwäche ist ein universales Phänomen, und es zeigt sich nicht nur in der Moral. Auch vom Handeln gemäß unserem wohlverstandenen Eigeninteresse lassen wir uns oft genug durch gefühlsmäßige Befangenheiten abhalten. Der *homo oeconomicus* kommt in der Wirklichkeit nur selten vor. NIETZSCHE sagt: „Der Mensch ist ein mittelmäßiger Egoist: auch der Klügste nimmt seine Gewohnheit wichtiger als seinen Vorteil.“⁹ Aber in der Moral hat Willensschwäche die vielleicht dramatischsten Auswirkungen. Auch wenn den sogenannten Internalisten hinsichtlich der moralischen Motivation darin recht zu geben ist, dass das Haben moralischer Überzeugungen nicht denkbar ist ohne zumindest eine rudimentäre Motiva-

8 KANT 1903, S. 453 f.

9 NIETZSCHE 1973, Bd. III, S. 795.

tion, ihnen gemäß zu handeln, ist diese Motivation doch häufig machtlos gegen konkurrierende Motive. Selbst noch eine fest in die eigene moralische Identität integrierte moralische Motivation kann durch entgegenwirkende Motive durchkreuzt werden.

Für die Moral folgt daraus, dass sie gut daran tut, mit verlässlicheren Motiven Koalitionen einzugehen – einerseits mit *quasi-moralischen* Motiven, verstanden als auf andere gerichtete Motive, die in der Regel zu moralisch richtigem Handeln motivieren, ohne eigentlich moralische Motive zu sein, und mit *selbstbezogenen* Motiven, die *indirekt* zu moralischem Verhalten motivieren. Typische quasi-moralische Motive sind Liebe, Mitleid und Fürsorglichkeit. Für viele Situationen, für die moralische Prinzipien ins Spiel kommen, stellt sich das Motivationsproblem nicht, da sie lediglich die Aktivierung mehr oder weniger natürlicher oder früh einsozialisierter Neigungen erfordern. Dazu gehört etwa die Versorgung der eigenen Nachkommen aus Liebe zu den eigenen Kindern und Kindeskindern, die Sorge um die eigenen Eltern und Geschwister und die Loyalität und Solidarität in Bezug auf die eigene Bezugsgruppe. Das Motivationsproblem stellt sich für die großen, ja unüberblickbar ausgedehnten Bereiche der Moral, die außerhalb dieses eng begrenzten Horizonts der *near and dear* und der gefühlsmäßigen Loyalitäten liegen. Gerade diese sind jedoch ein fester Bestandteil der Moral des modernen aufklärerischen Typs.

„Aufklärerisch“ verweist dabei auf zwei Wesenszüge der modernen Moral: den *Universalismus* und die *Unabhängigkeit von religiösen oder mythischen kulturellen Traditionen*. *Universalismus* heißt, dass der Horizont der menschlichen Pflichten auf alle Menschen, wenn nicht – wie bei den Utilitaristen, SCHOPENHAUER und Albert SCHWEITZER – sogar auf alle leidensfähigen Wesen einschließlich der höheren Tiere ausgedehnt wird. Die Grenzen der natürlichen Sympathien sollen nicht mehr als Grenze der Moral maßgeblich sein, sondern alle lebenden und zukünftigen Betroffenen sind relevant. Diese Moral ist kosmopolitisch und intergenerationell. Ihr Merkmal ist die „Entgrenzung von Verantwortung“.¹⁰

Daneben wird in der modernen Moral die Lücke zwischen der Akzeptanz einer ambitionierten Moral und der Motivation zu ihrer Befolgung nicht mehr primär durch religiöse oder ideologische Hilfskonstruktionen geschlossen. Für die Erweiterung der natürlichen Sympathien auf die Vorstellung eines wiewohl gütigen, aber kontrollierenden und vergeltenden Gottes ist in dieser Moral ebenso wenig Platz wie für die Vorstellung eines an spätere Verkörperungen weitergegebenen reinen oder unreinen Karmas. Die nachauklärerische Moral ist eine Moral der Selbstregulierung, eine Moral der „unsichtbaren Hand“. Da eine allgemein anerkannte höhere Autorität entfällt, müssen die Anreize dafür, das Moralische zu tun, aus der Gesellschaft selbst kommen. Die „artificial harmony of interests“, von der BENTHAM gesprochen hat und die nötig ist, damit ein hinreichend hohes Niveau moralischer Motivation besteht, ist menschengemacht, und jede Generation ist aufs Neue aufgefordert, sie durch Moralerziehung aufrechtzuerhalten.

Welche „künstlichen“ Motive können diese die Moral jenseits der Nahbeziehungen stützende Funktion in der nachauklärerischen Gesellschaft übernehmen? Das nachweislich stärkste Motiv ist nach wie vor der Wunsch nach Konformität und die Furcht vor der Rolle des Außenseiters. Wie die moralpsychologischen Experimente von KOHLBERG und anderen gezeigt haben, folgt die Mehrheit der Menschen den Moralnormen ihrer Gesellschaft nicht primär aus intrinsischen Gründen, sondern aus Gründen der sozialen Konfor-

10 KAMLAH 1973, S. 105.

mität und der Anpassung an die Erwartungen des sozialen Umfelds. Das schließt ein hohes Maß an moralischer Diversität nicht aus. Mit der zunehmenden Individualisierung der Gesellschaft nimmt zwangsläufig auch die soziale Kontrolle ab. Das Individuum verfügt über mehr Freiheit in der Wahl seiner Bezugsgruppen, insbesondere mithilfe der neuen Medien. LICHTENBERG meinte: „Kluge Leute glauben zu machen, man sei, der man nicht ist, ist gemeinhin schwerer, als der zu werden, als der man erscheinen möchte.“¹¹ Das kann heute nicht mehr ganz so gelten wie im 18. Jahrhundert. Die Identität, die man unter digitalem Decknamen auslebt, braucht mit der im Nahfeld nur noch wenig gemeinsam zu haben. Darüber hinaus wird auch der Egoist und der Amoralist Gelegenheit finden, sich ein Umfeld zu suchen, in dem er unter seinesgleichen ist und in der er etwa als Steuervermeidungsakrobat nicht nur geduldet, sondern sogar offen bewundert wird.

Bereits im 19. Jahrhundert hat die Moralphilosophie mit seismografischer Genauigkeit auf die von der Aufklärung ausgehenden Erschütterungen der moralischen Motivation reagiert. Eine Schlüsselrolle spielte in dieser Hinsicht John Stuart MILL, der bereits für sein Jahrhundert mit dem mehr oder weniger vollständigen Verlust der Wirksamkeit der Religion für die Moral rechnete und sich fragte, woher die moralische Motivation noch kommen könne, wenn man nicht, wie er selbst, von Kind auf an klare Normen gewöhnt worden ist:

„They, indeed, who have no conception of any higher honesty than is practised by the majority of the society in which they live, are right in considering such honesty as accordant with policy. But how is he indemnified who scruples to do that which his neighbours do without scruple? Where is the reward, in any worldly sense, for heroism?“¹²

Das heißt, dass die moralische Motivation letztlich wesentlich von den selbstbezogenen Motiven abhängt. Eine Hauptrolle spielt dabei die Furcht davor, selbst zu den von der Unmoral Betroffenen zu gehören. Neben der Missbilligung des eigenen Verhaltens durch andere möchte man vermeiden, selbst zum Opfer der Ausflüchte zu werden, mit denen man sich selbst allzu gern von der Befolgung moralischer Prinzipien entlastet.

An diesem Punkt übernimmt die oben konstatierte Unvollständigkeit der Reziprozität von *moral agents* und *moral patients* eine bedeutsame Rolle. Der Appell an das Eigeninteresse, die Folgen derselben moralischen Nachlässigkeiten zu vermeiden, die man sich selbst gönnt, fruchtet immer nur so weit, wie man mit dem Risiko rechnen muss, in eigener Person in die Lage des *moral patient* zu kommen. Die sogenannte „Goldene Regel“ der Alltagsmoral in ihrer negativen („Was Du willst, das man Dir nicht tut, das tu auch anderen nicht“) und positiven Version („Was Du willst, das man Dir tut, das tu auch anderen“) kann einen Egoisten oder Amoralisten stets nur so weit motivieren, wie er selbst damit rechnen muss, in die Situation des anderen zu geraten oder einen anderen, der ihm nahesteht, in diese Situation geraten zu sehen. Die Reziprozität ist in eben dem Maße gefährdet, wie zwischen Aktiven und Passiven Asymmetrie besteht und die hypothetische Identifikation des Akteurs mit dem von seinem Handeln Betroffenen rein hypothetisch ist, oder zu hypothetisch, um seinen Seelenfrieden zu gefährden.

Jeder kann in die Position des Unfallopfers, des Schwerkranken, des Behinderten, des Demenzkranken kommen. Die Wahrscheinlichkeit, im Alter von 90 Jahren demenzkrank

11 LICHTENBERG 1974, S. 103.

12 MILL 1978, S. 149.

zu werden, liegt bei nahezu 40%, und die Wahrscheinlichkeit, ein Alter von 90 Jahren zu erreichen, steigt konstant und rapide. Aber überall da, wo die Symmetrie gebrochen ist und die potenziellen Opfer von moralischen Unzulänglichkeiten nicht sanktionsfähig sind – bei Fremden, bei Angehörigen zukünftiger Generationen und bei leidensfähigen Tieren – bleibt die hypothetische Verallgemeinerung der individuellen Maximen ein Gedankenexperiment, das zur Auffindung der angemessenen Moralnormen tauglich sein mag, aber nicht notwendig auch dazu, zu deren Befolgung zu motivieren.

Deutlich sichtbar treten die Folgen dieser Asymmetrie bei der Jahrhundertherausforderung zutage, die man sich angewöhnt hat, „Klimaverantwortung“ zu nennen. Betroffenen vom Klimawandel werden primär die Menschen sein, die in einigen heute schon unter Armut, Epidemien und unzureichender Rechtssicherheit leidenden Ländern leben, die weltpolitisch nur eine Nebenrolle spielen und mit denen uns weniger verbindet als mit den Menschen im reichen Norden. Und der Klimawandel wird primär die nächste und die übernächste Generation der in diesen Regionen lebenden Menschen betreffen. Beide Faktoren erschweren die Bereitschaft, die von der universalistischen Moral verlangte räumlich und zeitlich „entgrenzte“ Verantwortung wahrzunehmen. Hinzu kommt, dass auch von quasi-moralischen Motiven wie Solidarität und Mitleid wenig zu erwarten ist, denn diese sind überwiegend an *Face-to-face*-Kontakte gebunden. Die Zukünftigen bleiben zwangsläufig anonym. Die Bereitschaft, sich für anonyme „statistische“ Opfer einzusetzen, ist weniger ausgeprägt als das Engagement für „identifizierte“ Opfer. Auf die Bereitschaft, sich für bekannte Opfer einzusetzen, ist eher Verlass als auf die Bereitschaft, Verantwortung für statistische Opfer von Risiken aus eigenem Handeln oder Unterlassen anzuerkennen und aktiv wahrzunehmen.

Vieles spricht dafür, dass in der gegenwärtigen Welt weniger die Motivation zur *Anerkennung* von Langzeitverantwortung ein Problem darstellt als vielmehr die Motivation, diese – allseits anerkannte – Verantwortung im Kräftefeld konkurrierender gesellschaftlicher und politischer Ziele wahrzunehmen. Die langfristige Erhaltung der Grundlagen des Lebens und der Lebensqualität nachfolgender Generationen ist als Ziel weithin anerkannt. Das heißt aber nicht, dass sich die in Befragungen geäußerten Überzeugungen und Bereitschaften auch in realen Verhaltensänderungen niederschlagen. So ergab eine Studie des Stuttgarter Sozialwissenschaftlers ZWICK, dass zwar 50% der von ihm Befragten in der Klimaproblematik ein „hohes oder sehr hohes Katastrophenpotential“ sehen, dass dies jedoch nur sehr schwach mit der Bereitschaft korreliert, die Ursachen dafür bei sich selbst zu suchen.¹³ Ähnliche Ergebnisse zeigen amerikanische Untersuchungen: Die große Mehrheit der Amerikaner beurteilt die langfristigen Umweltgefahren aus den Treibhausgasemissionen als gravierend, ist aber dagegen, weniger Auto zu fahren und stärker öffentliche Verkehrsmittel zu nutzen, und sie ist entschieden gegen eine höhere Kraftstoffbesteuerung.¹⁴

Angesichts dieser Befunde kann es nicht als ausgemacht gelten, ob die aus der Anerkennung von Langzeitverantwortung fließenden Motivationen verlässlich genug sind, um unter dem Ansturm konkurrierender Werte und Ziele das Verhalten zu beeinflussen. Wie die Schwierigkeiten zeigen, etwa durch eine hohe Kraftstoffbesteuerung eine Eindämmung der Autoflut zu erreichen, sind habitualisierte und lebensstilbestimmende Verhal-

13 ZWICK 2001, S. 302.

14 O'CONNOR et al. 1999, S. 464 ff.

tensweisen gegen politische Steuerungsbemühungen überwiegend resistent. Es ist fraglich, ob eine Kraftstoffbesteuerung, die so hoch wäre, dass sie tatsächlich zu einer Bremsung des Verkehrswachstums führte, überhaupt politisch durchsetzbar wäre, zumindest außerhalb von akuten Krisensituationen wie der Ölpreiskrise der 1980er Jahre.

Ein anderes Beispiel dafür, wie sich die zeitlogisch bedingte Asymmetrie von weithin anerkanntem Sorgeanspruch und faktischer Vorsorge in der politischen Arena niederschlägt, ist das unter dem Namen „elderly spending“ bekannte Phänomen der Bevorzugung der älteren Generation bei politisch gesteuerten Wohlstandsverteilungen. In Demokratien gibt es mehr oder weniger zwangsläufig eine Tendenz zur Privilegierung von Gruppen, die für Wahlen und Wiederwahlen von besonderer Bedeutung sind. So nutzt die Rente ab 63 vor allem den demnächst in Rente gehenden langjährig beschäftigten Arbeitnehmern, wohl nicht zufällig die Gruppe mit der höchsten Wahlbeteiligung. Sie nutzt nicht den Ärmsten, sondern Teilen der Bevölkerung, die von ihren Renten auch so gut leben können. Andererseits schadet sie der jüngeren Generation, indem sie den Spielraum für Rückstellungen zugunsten der Minderung von Altersarmut in der Zukunft beschneidet.

Allerdings ist der Trend zum „elderly spending“ nicht überall gleich stark. Studien zeigen, dass sich die Einkommen der Generationen der nach 1955 Geborenen in vielen Ländern den Einkommen der davor Geborenen annähern. Das gilt etwa für die skandinavischen, aber auch für die englischsprachigen Länder. Nach einigen Sozialwissenschaftlern gingen jedoch in Frankreich, Spanien und Italien, die teilweise gegenwärtig unter einer hohen Jugendarbeitslosigkeit leiden, bis vor kurzem alle Wohlstandszugewinne rechnerisch an die vor 1960 geborene Generation. Insgesamt geben 10 von 29 OECD-Staaten fünfmal so viel für jede Person über 65 Jahre aus wie für jede unter 25 (*Bertelsmann-Stiftung* 2013). Wie sich diese Asymmetrie auf die Chancengleichheit zwischen den Generationen auswirkt, wird in vollem Ausmaß erst die Zukunft zeigen.

Sie sehen: Symmetrie und Symmetriebrüche sind auch für die Moralphilosophie ein ergiebiges Gegensatzpaar. Es stiftet Modellvorstellungen und Forschungshypothesen nicht anders als in seinem bewährten Anwendungsfeld, der Wissenschaft.

Literatur

- Bertelsmann-Stiftung*: Intergenerational Justice in Aging Societies. A Cross-national Comparison of 29 OECD Countries. Gütersloh 2013
- FEINBERG, J.: Rights, Justice, and the Bounds of Liberty. Essays in Social Philosophy. Princeton (NJ): Princeton University Press 1980
- GEHLEN, A.: Moral und Hypermoral. Eine pluralistische Ethik. Frankfurt (Main): Athenäum 1969
- GERT, B.: Die moralischen Regeln. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1983
- KAMLAH, W.: Philosophische Anthropologie. Sprachliche Grundlegung und Ethik. Mannheim: Bibliographisches Institut 1973
- KANT, I.: Werke. Akademie-Ausgabe. Bd. VI. Berlin: de Gruyter 1903
- LICHTENBERG, G. C.: Aphorismen, Schriften, Briefe. München: Hanser 1974
- MILL, J. S.: Notes on some of the more popular dialogues of Plato. In: MILL, J. S.: Collected Works. Vol. XI, pp. 37–238. Toronto: Toronto University Press 1978
- MONTADA, L.: Moralische Gefühle. In: EDELSTEIN, W., NUNNER-WINKLER, G., und NOAM, G. (Hrsg.): Moral und Person. S. 259–277. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1993
- NIETZSCHE, F.: Werke in drei Bänden. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1973
- O’CONNOR, R. E., BORD, R. J., and FISHER, A.: Risk perceptions, general environmental beliefs, and willingness to address climate change. *Risk Analysis* 19, 461–471 (1999)

Dieter Birnbacher

- SEN, A.: Choice, orderings and morality. In: KÖRNER, S. (Ed.): *Practical Reason*; pp. 54–82. Oxford: Blackwell 1974
- SMITH, A.: *Theorie der ethischen Gefühle*. Hamburg: Meiner 1977
- TRANÖY, K. E.: Asymmetries in ethics. *Inquiry* 10, 351–372 (1967)
- WITTGENSTEIN, L.: *Philosophische Untersuchungen*. In: WITTGENSTEIN, L: *Tractatus logico-philosophicus*. Werkausgabe Bd. 1, S. 225–580. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1984
- ZWICK, M. M.: Der globale Klimawandel in der Wahrnehmung der Öffentlichkeit. *GAIA* 10, 299–303 (2001)

Prof. Dr. Dieter BIRNBACHER
Universität Düsseldorf
Institut für Philosophie
Universitätsstraße 1
40225 Düsseldorf
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 211 5090159
Fax: +49 211 5090159
E-Mail: dieter.birnbacher@uni-duesseldorf.de

The Double-Face of Symmetry: A Conceptual History

Giora HON (Haifa, Israel) and Bernard R. GOLDSTEIN (Pittsburgh, PA, USA)



Abstract

Symmetry is commonly perceived as a concept that expresses bilateral or radial relations, which effectively describes spatial arrangements that most people think is in some sense innate to the human mind. So, does the concept have a history? Has it evolved? Was there a revolution? The long history of the concept of symmetry began in classical Antiquity as a single concept with a range of applications, expressing proportionality with a specific constraint. In fact, *symmetry* was used in two different contexts: in mathematics it had the technical meaning of commensurable, while generally it meant suitable or well proportioned. The latter usage involves an aesthetic judgment arrived at by comparison with an ideal in the relevant domain, in an attempt to establish a certain property of the object, e. g., that it is beautiful or that it functions efficiently. We offer historical evidence that, despite the variety of usages in many different domains, there is a conceptual unity underlying the invocation of symmetry in the period from Antiquity to the 1790s which is distinct from the scientific usages of this term that first emerged in France at the end of the eighteenth century. We examine the trajectory of the concept in the mathematical and scientific disciplines as well as its trajectory in art and architecture. The changes in the meaning of symmetry from Antiquity to the eighteenth century can be explained by appealing to evolution – nobody in that period claimed to be doing anything new. The philosopher Immanuel KANT is probably the first thinker to indicate that something is fundamentally missing in the traditional account. In 1768 he introduced the concept of incongruent counterparts to indicate a reversal of ordering in entities that are equal and similar but cannot be superposed. However, the key figure in revolutionizing the concept of symmetry was the mathematician Adrien-Marie LEGENDRE who, in 1794, claimed to be doing something new. Indeed, by introducing a principle of ordering he revolutionized the concept, and laid the groundwork for its modern usages.

Zusammenfassung

Symmetrie wird allgemein als ein Begriff verstanden, der bilaterale oder radiale Beziehungen ausdrückt und auf diese Weise räumliche Arrangements beschreibt, von denen die meisten Menschen annehmen, dass sie in einem gewissen Sinn dem menschlichen Geiste angeboren sind. Hat dieser Begriff eine Geschichte? Hat er sich historisch entwickelt? Gab es eine begriffliche Revolution? Die lange Geschichte des Symmetriebegriffs begann im klassischen Altertum als die eines Begriffs mit einer ganzen Reihe von Anwendungen, insbesondere in zwei verschiedenen Kontexten: In der Mathematik hatte „symmetria“ die *technische* Bedeutung der Kommensurabilität, während in *allgemeiner* Verwendung „symmetrisch“ als passend oder wohl proportioniert verstanden wurde. Letztere Verwendung schließt ein ästhetisches Urteil ein, zu dem man durch Vergleich mit einem Ideal in dem betreffenden Bereich gelangt. Dabei wird versucht, eine bestimmte Eigenschaft eines Gegenstandes hervorzuheben, z. B. dass er schön ist oder wirksam funktioniert. Wir präsentieren historische Belege dafür, dass der Berufung auf Symmetrie von der Antike bis in die 1790er Jahre eine begriffliche Einheit unterliegt – ungeachtet der Vielfalt von Verwendungsweisen in unterschiedlichen Bereichen. Diese begriffliche Einheit unterscheidet sich markant von den wissenschaftlichen Verwendungsweisen, wie sie gegen Ende des 18. Jahrhunderts zunächst in Frankreich auftraten. Wir stellen den begrifflichen Entwicklungsverlauf sowohl in den mathematischen und naturwissenschaftlichen Disziplinen als auch in Kunst und Architektur dar. Die Bedeutungsänderungen von „Symmetrie“ von der Antike bis zum 18. Jahrhundert lassen sich als schlichte Begriffsentwicklung ohne radikale Brüche erklären. In dieser gesamten Periode beanspruchte niemand, etwas wirklich Neues zu präsentieren. Der Philosoph Immanuel KANT war vermutlich der erste, der darauf aufmerksam machte, dass in der traditionellen Auffassung ein wichtiges Element fehlte. Im Jahre 1768 führte er den Begriff der „inkongruenten Gegenstücke“ ein, mit dem er die Umkehrung der Reihenfolge der Teile solcher Gegenstände ausdrücken will, die ansonsten gleich und ähnlich sind, aber nicht ineinander überführt werden können (z. B. rechte und linke Hand). Die Schlüsselfigur bei der Revolutionierung des Symmetriebegriffs war jedoch der Mathematiker Adrien-Marie LEGENDRE, der im Jahre 1794 ein Ordnungsprinzip einführte, das die Grundlage für moderne Verwendungsweisen des Symmetriebegriffs bildete.

1. Introduction

There are dramatic moments in the history of science when the introduction of a novel concept determines an entirely new way of thinking with the result that it obliterates the old modes to such an extent that it is almost impossible to retrieve them. Indeed, it takes a great effort of imagination and a convincing display of evidence to isolate such moments and cast them into relief. And when one succeeds in imagining earlier times before the successful concept was available, the old mode of thinking may seem quaint and inconsequential in light of the power of the modern concept. We submit that such a moment took place in 1794 when Adrien-Marie LEGENDRE (1752–1833) put forward a new definition of symmetry in a textbook on the elements of geometry.

The popular usage of symmetry in the modern world is typically restricted to the bilateral and radial sense of spatial arrangement which does not capture the profound mathematical meaning of the modern concept. Symmetry in its current scientific usage refers either to a mathematico-logical relation or to an intrinsic property of a mathematical entity which, under certain kinds of transformation, such as rotation, reflection, inversion, or other abstract operations, leaves something unchanged-invariant. When an invariant property is maintained, it is the subject of group theory – a mathematical theory which explores, systematizes, and formalizes features that are preserved under the transformation. To be sure, the aesthetic sense of symmetry can in fact be described mathematically, but the essential point is that in modern scientific usage symmetry is mathematical with no aesthetic component (WEYL 1952).

The object of inquiry for historians of ideas is a series of texts. How does human thought, formulated in writing, exhibit its conceptual tools? Thus, the first motivating question in examining a concept is the way the term that is supposed to express the relevant idea was used, that is, the way it was applied in some context. It is important to maintain the rule that one has to determine the meaning of a term at the time it was invoked. Hence, the question arises what did the word *symmetry* mean at different times throughout the ages and, if the meaning changed, how did it change over time? Put sharply, is it the case that the ancients and their successors up to the early modern period noticed what one recognizes today, and did they articulate it in texts? Contrary to a widely held belief, the answer is unexpected: it is negative, for no evidence has been adduced to support the claim that earlier thinkers paid attention in writing to this concern of spatial arrangements; rather, it is a perspective imposed by modern historians and philosophers on their forebears. We should be careful; what we claim is based on usages of the term, *symmetry*, in extant written material throughout the ages. Indeed, as a matter of historical fact (supported by an extensive search of the literature), prior to the mid-eighteenth century the word *symmetry* (and its cognates in other European languages) does not occur in any of its modern senses. Typically, this unsettling negative result has frequently led to a request that we produce evidence that in fact does not exist. Indeed, we too were surprised by our historical finding, but we must adhere to the data and avoid speculation.

The fact, and we consider it a fact, that until the mid-eighteenth century, the word *symmetry* did not convey what we take it to mean today, suggests a possibility that human thought had other ways of expressing a right-left, or a radial relation. Here one should be mindful of the difference between a concept and a term. Thus it is possible that there were other terms or expressions for the concept of a right-left bilateral, or a radial relation.

To formulate then another motivating question: If symmetry as it is invoked today was not a term available to ancient, medieval, or early modern thinkers, what then were the ways of expressing the right-left relation of similar and equal elements? To the best of our knowledge – and we have searched widely in the literature – there was no term or expression that connoted this concept of symmetry. In other words, there is no historical evidence to support the claim that ancient, medieval, or early modern thinkers had the concept of symmetry as understood in modern times.

Despite the lack of evidence for the concept as we know it today (either scientifically or popularly) prior to the mid-eighteenth century, we were able to discern two coherent trajectories of the term *symmetry* which together constitute a fascinating tale. Symmetry (Greek: *summetria*) had one basic meaning in Greek Antiquity: proportionality. Its usage can be distinguished by the contexts in which it was invoked: (1.) in a mathematical context it meant that two quantities share a common measure, that is, they are commensurable, and (2.) in an evaluative context, for example, in appraising the beautiful, it meant well proportioned. We have explored both contexts and have shown that they constitute different backgrounds for two different paths in the evolution of the concept. The coherence of these two trajectories corresponds to two distinct senses of the concept of symmetry: (1.) a relation between two mathematical elements which is the theme of what we call the “mathematical path”, and (2.) a property of a unified whole which is the theme of what we call the “aesthetic path”. Thus, in logical terms, we discern continuity in the distinction between the sense of relation which constitutes the mathematical path; and the sense of property which marks the aesthetic path. Thinkers such as PLATO (427–347 BC), EUCLID (*fl.* 300 BC), ARCHIMEDES (287–212 BC), BOETHIUS (480–524), NICOLE ORESME (1323–1382), and ISAAC BARROW (1630–1677) contributed to the formulation of symmetry in the sense of proportion or commensurability in the mathematical path, while PLATO, GALEN (*c.* 130–200), and VITRUVIUS (1st Century, BC) among the ancients, and Leon Battista ALBERTI (1404–1472) and Claude PERRAULT (1613–1688), among the early moderns, are the principal players in the aesthetic domain, where symmetry connoted properly proportioned or pleasingly proportioned. In the mathematical path the meaning remained stable for many centuries but, in the course of the seventeenth century, the term *symmetry* fell out of active use and was generally replaced by *commensurability*. However, in the aesthetic path we find an intriguing set of developments, for the original Greek and then its Latinized form, *symmetria*, which had expressed certain proportions, evolved into “a Relation of Parity and Equality” of architectural elements with respect to a central feature, as described in the annotated French translation of VITRUVIUS’s *De architectura* by PERRAULT in 1674. We emphasize that in architecture, from VITRUVIUS up to the mid-eighteenth century – symmetry retained its aesthetic sense albeit with different meanings. We have thus found two paths in the evolution of the use of symmetry from ancient times up to the late eighteenth century hence the “double face” of symmetry. Against this background our goal is to locate in time and place the introduction of symmetry into the scientific domain which departed from the traditional usages. This is then the third motivating question, namely: When and where was symmetry introduced into the scientific domain as a well defined mathematical concept?¹ We begin with an outline of the historical evidence before proceeding to the core of our argument concerning the origin of the modern scientific concept of symmetry.

1 For details, see HON and GOLDSTEIN 2008.

2. Historical Evidence

2.1 The Mathematical Path

What was the status of the term *symmetry* (and, for that matter, *asymmetry*) in mathematical contexts (both pure and applied) towards the end of the eighteenth century? The answer to this question is critical for it would help characterize the approaches that were taken up to the early modern period towards the concept of symmetry. We begin with PLATO and outline a path from Greek Antiquity via the medieval period to the seventeenth century.

In PLATO's dialogue *Theaetetus* a definition of magnitudes is proposed that would include the square roots of three or five. Theaetetus observes:

"Theodorus here was proving to us something about square roots, namely, that the sides (or roots) of squares representing three square feet and five square feet are not commensurable [*ou summetroi*] in length with the line representing one foot."²

And then:

"All the lines which form the four equal sides of the plane figure representing the equilateral number we defined as *length*, while those which form the sides of squares equal in area to the oblongs we called '*roots*' (surds), as not being commensurable [*ou summetrous*] with the others in length, but only in the plane areas to which their squares are equal."³

Evidently, PLATO invoked the negative concept of symmetry, that is, asymmetry or (in this translation) not commensurable, to refer to magnitudes which have no common measure.

PLATO's usage of symmetry coheres with that of EUCLID whose *Elements* constitutes the standard source for mathematical usage in ancient Greek. *Symmetry* is indeed a technical term in this treatise and in this context it means commensurability – "in measure with", or "sharing a common measure". EUCLID provided the following definition:

"Definition 1.: Those magnitudes [*megethê*] are said to be *commensurable* [*summetra*] which are measured by the same measure, and those *incommensurable* [*asummetra*] which cannot have any common measure."⁴

For EUCLID *symmetry* meant that two quantities have a common measure, that is, they are commensurable; if they do not have a common measure they are *asymmetrical*, that is, they are incommensurable. EUCLID restricted his definition to geometrical magnitudes (lengths, areas, and volumes); it did not apply to shapes or relative positions. It is also noteworthy that this mathematical definition of *symmetry* has no aesthetic component.

In his book *On the Equilibrium of Planes* ARCHIMEDES left the domain of pure mathematics for that of natural science, and considered mechanics from the perspective of mathematics. As DIJKSTERHUIS commented, ARCHIMEDES was "the first to establish the close interrelation between mathematics and mechanics".⁵ For our purposes it suffices to cite two consecutive propositions, [6] and [7], which, in Greek, include the terms *summetra*

2 CORNFORD (Tr.) 1957, pp. 22–23; PLATO, *Theaetetus*, 147d.

3 CORNFORD (Tr.) 1957, p. 23; PLATO, *Theaetetus*, 148a–b.

4 HEATH (Tr.) [1926] 1956, Vol. 3, p. 10; EUCLID, *Elements*, Book X, Def. 1.

5 DIJKSTERHUIS [1956] 1987, p. 286.

and *asymmetra* (two more instances of the term occur in the proofs of these two propositions):

“[6] Commensurable [*symmetra*] magnitudes are in equilibrium [*isorropeonti*] at distances reciprocally proportional to the weights.”⁶

Notice the different terms for “symmetry” and “equilibrium”. And,

“[7] However, even if the magnitudes are incommensurable [*asymmetra*], they will be in equilibrium [*isorropêsounti*] at distances reciprocally proportional to the magnitudes.”⁷

This is a profound claim for it states that the account of the lever is applicable both to commensurable and incommensurable magnitudes – the physics remains the same and equilibrium is obtained (under a specified set of conditions). We move on.

BOETHIUS has long been recognized as one of the most important intermediaries between ancient philosophy and medieval scholasticism. He translated ARISTOTLE’S logical works into Latin, adding commentaries, and composed original texts in this discipline, seeking to bring his logical training to bear on theological issues. Today BOETHIUS is perhaps best known for his memoir on the consolation of philosophy, *De consolazione philosophiae*, although, for almost a thousand years, his text on arithmetic was considered authoritative in the Western world. BOETHIUS’S *Institutio arithmetica*, based on the Greek text of NICOMACHUS’S *Introduction to arithmetic* (composed ca. 100), included some Pythagorean number theory which was then incorporated into the curriculum of medieval universities as part of the quadrivium: arithmetic, geometry, astronomy, and music (the *editio princeps* was published by RATDOLT in Augsburg, 1488). In this work BOETHIUS introduced the terms *commensurable* and *incommensurable*:

“For, if one multiplies 3 and 5 [by themselves], 3 times 3 make 9, and 5 times 5 make 25: hence, there is no natural commonality of measure [*communis mensurae*] between them. Similarly, if one compares 5 and 7 they will also be incommensurable [*incommensurabiles*]: for 5 times 5, as was said, make 25, and 7 times 7 make 49: numbers for which there is no common measure except, of course, the generator and mother of all numbers, namely, unity.”⁸

And BOETHIUS continued: “[...] if one insists on knowing if [two numbers] are commensurable [*commensurabiles*] according to a certain measure or if in fact 1 is the only [common] measure for them, here is the procedure.”⁹

For BOETHIUS *incommensurable* – which he used before introducing the positive term – is a property of numbers (i. e., integers), namely, that they are relatively prime; this topic is discussed in EUCLID’S *Elements*, Book VII, and has little to do with the meaning of *asymmetry* as it occurs in EUCLID’S *Elements*, Book X, or in other ancient mathematical works. Moreover, *commensurable* for BOETHIUS refers to numbers which have a common divisor in addition to unity. According to the standard Latin dictionary, the term *commensuratio* (and forms derived from it, notably *commensurabilis* and *incommensurabilis*) first

6 DIJKSTERHUIS [1956] 1987, p. 289; MUGLER (Ed. and Tr.) 1971, p. 85.

7 DIJKSTERHUIS [1956] 1987, p. 305; MUGLER (Ed. and Tr.) 1971, p. 87.

8 GUILLAUMIN (Ed. and Tr.) 1995, p. 38; BOETHIUS, *De institutione arithmetica*, I.17.10.

9 GUILLAUMIN (Ed. and Tr.) 1995, p. 38; BOETHIUS, *De institutione arithmetica*, I.18.1.

appeared in the works of BOETHIUS.¹⁰ Indeed, BOETHIUS did not use the term *symmetry*. Instead, he coined a term in Latin which is a literal rendering of the Greek *symmetry*.

The modern tendency to translate *summetria* in the works of PLATO, EUCLID, and ARCHIMEDES, by the Latin term, *commensuratio* (and words related to it) – avoiding words derived from the original Greek – is already evident in medieval translations of ancient mathematics. We now turn to Nicole ORESME, the distinguished fourteenth-century French thinker, who applied this term in various scientific contexts. Specifically, he invoked *commensurability* and its contrary, *incommensurability*, in the sense of the Greek terms, *summetria* and *asummetria*, in his influential *Le Livre du ciel et du monde*, based on ARISTOTLE'S *De caelo*. In this work, completed in 1377, ORESME questioned the validity of the arguments concerning the eternity of the world and the motion of the heavens. He sought to show that nature may exhibit incommensurable phenomena, especially with respect to motion. The argument is at one and the same time epistemological and ontological. From an epistemological perspective, ORESME argued:

“[...] the mortal men in the world, dead or alive or to be, could not discover nor know by their natural lights for certain whether all the movements of the heavens are commensurable [*commensurables*] or incommensurable [*incommensurables*]. [...] That some of the movements of the heavens should be incommensurable is far more likely than the opposite, as I have previously demonstrated with several proofs in a treatise entitled *On the Commensurability or Incommensurability of the Movements of the Heavens*.”¹¹

Here *commensurable* and *incommensurable* refer to continuous quantities in the tradition of ancient Greek usage. But it is important to note that the issue of commensurability applies to measured physical quantities (rather than to mathematical or idealized physical quantities), where certainty is not possible. Hence, ORESME argued, the most one can say is that the heavenly motions are more likely to be incommensurable than commensurable. Precision in measurement is not the issue, for ORESME claimed that, in principle, the commensurability of these quantities cannot be determined.

An element of ORESME'S argument that heavenly motions are incommensurable is ontological. If all celestial motions were commensurable, conjunctions and oppositions could only take place in a finite number of points along the ecliptic, even if these motions were eternal.

“For why should some parts of the ecliptic be deprived of a conjunction between the sun and moon, or of some extraordinary configurations? Rather, one should be able to say that there is no part of the ecliptic so small that the sun and moon would not conjunct there sometime, or have not already conjuncted there.”¹²

Knowledge and its limitations are not involved in this claim; rather, a plausibility argument is proposed concerning the uniformity of space.

For our argument it is also important to note that ORESME extended the application of *commensurability* and *incommensurability* to physical quantities that had, in fact, been measured; this is in addition to their application in mathematical and idealized physical contexts that we have seen in EUCLID and ARCHIMEDES. While ARCHIMEDES applied these

10 LEWIS and SHORT [1879] 1951, p. 377.

11 MENUT and DENOMY (Tr.) 1968, p. 197; ORESME, *Livre du ciel*, Bk. I, ch. 29, 44c–44d.

12 GRANT (Tr.) 1971, p. 319; ORESME, *Tractatus de commensurabilitate vel incommensurabilitate motuum celi*, Pt. III.

terms in an idealized way, ORESME's discussion of the application of *commensurability* and *incommensurability* to quantities in the natural world was the most extensive and profound up to his time.

Isaac BARROW is probably best known today because Isaac NEWTON was his student. But BARROW had many other claims to fame, and two of BARROW's works are of particular interest to us: his Latin edition of EUCLID's *Elements* (1655) that was frequently reprinted up to 1732;¹³ and his mathematical lectures given in Cambridge in 1664–1666 that were printed posthumously in 1683–1684. Poised between tradition and innovation, between ancients and moderns in mathematics, BARROW is a significant and reliable historical figure for our purposes.¹⁴ His text provides a broad perspective on Antiquity and at the same time brings us directly into the early modern period. In his *Lectiones habitæ in scholis publicis Academia Cantabrigiensi* which address, *inter alia*, basic concepts such as number, magnitude, and proportion, we find a well informed survey of ancient usages of *symmetry* together with an account of this concept as it was understood in the middle of the seventeenth century. We consider this text a model of scholarship.

We discern a pattern of usages in BARROW's text which shows him to be a historian of mathematics sensitive to linguistic nuances. When he reported ancient usages he invoked the original terms, gave the appropriate references and, indeed, provided quotations in Greek. He then discussed contemporary issues which are related to concepts that had been represented by terms that were no longer current. In this context he fairly consistently opted for the modern terms, thereby demonstrating his awareness of the linguistic changes that had taken place, which are essential for our argument. We cite BARROW's mathematical lectures in John KIRBY's translation of 1734, which provides evidence for usages of mathematical terms in English that were current in the eighteenth century. Linguistic nuances are of great importance in our study, and we therefore regard this translation, despite its shortcomings, as a primary source – a valuable historical document.

BARROW plays a key role in our story since he considered *symmetry* a single concept with several kinds of application. Here we address the mathematical usage. BARROW observed:

“*Symmetry* <or *Commensurability*> does sometimes denote any *Comparability together, as to Quantity*, of Magnitudes or other Quantities; so that according to the other more extensive Acceptation of the Word *Measure* this signifies to *compare the Quantities of Things together, or to investigate the Proportion of an unknown Quantity to a known one*. In which sense *Symmetrous* is all one with *Homogeneous*; and *Assymetrous* with *Heterogeneous*; as far as all Quantities of the same Kind are proportional to one another, and consequently are this Way *commensurable*; but Quantities of a different Kind have no Proportion to one another, and consequently can be no Way commensurate. Thus all Lines are *symmetrous* to one another, but a Line in respect of a Superfice, a Body, Time, Velocity, or Weight is *assymetrous*.”¹⁵

We put “or *Commensurability*” in angle brackets because, despite KIRBY, BARROW's original Latin has only *symmetria*, nothing in the Latin corresponds to the word *Commensurability*. KIRBY's gloss on the term *symmetry* indicates that in England in the first half of the eighteenth century BARROW's usage would not have been generally understood. *Comparability* here does not imply a “common measure” – this is introduced in the following paragraph. Proportion, then, is the primary sense of *symmetry* in mathematics to which

13 HEATH [1926] 1956, Vol. 1, p. 105.

14 Cf. MAHONEY 1990, p. 181.

15 KIRBY (Tr.) 1734, p. 284; BARROW 1684, p. 157.

no value judgment is attached. Moreover, for BARROW proportions must be of quantities of the same kind, either geometrical magnitudes (length, area, or volume) or physical magnitudes (time, velocity, or weight).

The meaning of symmetry as *commensurability* is explicit in the next paragraph. With EUCLID's *Elements*, Book X, in mind, BARROW remarked that geometers generally apply a stricter definition:

“Those Quantities are [...] *commensurable* [*summetra*] which may be measured by the same homogeneous Quantity, i. e., perfectly divided so as to have no Remainder, and are quite exhausted by a continued Subtraction of it: or the same Quantity of which is an aliquot Part of both: or which as one Number to another of that Kind, ascribing Unity to Numbers.”¹⁶

Moreover, *asymmetra* in the sense of incommensurability is defined shortly thereafter:

“Those quantities are *Incommensurate* [*Asymmetra*] of which no common *Measure*, though ever so small, can at all be found; there being none such in the Nature of Things, which can compleatly divide both without a Remainder [...]”¹⁷

BARROW's version of EUCLID shows that *symmetry* as a mathematical term was not in active use. While BARROW still understood the term as it was used in ancient Greek, he did not use it in his translation of EUCLID's *Elements*, Book X. These observations by an erudite English mathematician of the seventeenth century indicate that the ancient meaning of *symmetry* (proportional and commensurable in a mathematical context) was properly understood at the time. BARROW's comments also apply to eighteenth-century mathematical usage.¹⁸

We can now answer the question: What was the status of the term *symmetry* in mathematical contexts towards the end of the eighteenth century? The original Greek term, used by PLATO, EUCLID, and ARCHIMEDES in mathematical contexts, expresses a relation of two quantities having a common measure without any value judgment attached to it. The term had been translated into Latin in various ways, but as a rule the Latin cognate, *symmetria*, was not invoked in these contexts. While *commensurabiles* in Latin is a literal translation of the Greek *summetra*, BOETHIUS, who introduced this Latin term, did so in the context of the relations of integers, not with respect to continuous quantities as EUCLID had done. However, as the textual evidence from ORESME shows, the term, *commensurability*, was adopted and applied in medieval Latin in mathematical as well as physical contexts. BARROW, a leading mathematician in the seventeenth century, is important for helping us understand the historical path of the Greek term *summetria*. His lectures, studies, and translations of EUCLID's *Elements* into Latin and English, demonstrate that the ancient mathematical meaning of this term was known to scholars of early modern times, although they tended not to use it. *Commensurability* and *incommensurability* took the place of the classical terms, *summetria* and *asummetria*, with the result that the original *summetria* and its cognates became obsolete.

16 KIRBY (Tr.) 1734, p. 284; BARROW 1684, p. 157.

17 KIRBY (Tr.) 1734, p. 285; BARROW 1684, p. 158.

18 Cf. HON and GOLDSTEIN 2008, pp. 89–90.

2.2 The Aesthetic Path

The noun *summetria* and its adjective form, *summetros*, were common words in Greek and used in many different contexts (in addition to mathematics) with a variety of meanings related to the notion of “properly proportioned”. These meanings are given in the standard Greek lexicon as: “due proportion, a characteristic of beauty and goodness; suitability; convenient in size; moderate in size; fitting or appropriate”.¹⁹ In all these cases a judgment is required with respect to some criteria, in contrast to the mathematical usage which is devoid of evaluation. These criteria are not generally stated, but logically they must be presupposed in order to carry out the evaluative procedure. We begin with PLATO, for his invocations of *symmetry* exemplify the whole range of meanings in ancient Greek.²⁰

Towards the end of the *Timaeus* PLATO discussed the physiology of animals with an emphasis on the human body. He argued that, in order for a living creature to be beautiful, it must be symmetrical, that is well proportioned:

“Now the good [*agathon*] is always beautiful [*kalon*], and the beautiful never disproportionate [*ametron*]; accordingly a living creature that is to possess these qualities must be well proportioned [*summetron*]. Proportions [*summetrión*] of a trivial kind we readily perceive and reckon. [...] Just as a body that is out of proportion [*ametron*] because the legs or some other members are too big, is not only ugly, but in the workings of one part with another brings countless troubles upon itself with much fatigue and frequent falls due to awkward convulsive movement, so is it, we must suppose, with the composite creature we call an animal.”²¹

The passage begins with an aesthetic consideration which is an attribute of the “good”. In this approach beauty is always an aspect of the good, and it implies well proportioned, but PLATO did not specify the criteria. To be sure, the outward proportions of the body itself are easily perceived and, as PLATO remarked, they can be “reckoned”. The intended meaning of “reckoned” is not very clear but PLATO may mean that ideal proportions can be posited, i. e., ratios of integers for the size of one part of the body to another, or of a part to the whole. According to PLATO, in both cases, that is, the beautiful and the good, proportion is involved. The good with respect to a creature requires that it be beautiful and this means, *inter alia*, that its parts work together properly. *Symmetry* as well proportioned conveys a sense of proper functioning, when the effort of several parts, acting together, is required. In addition to being ugly, disproportionality due to some excess also interferes with the motor ability of the body. This aspect of *symmetry* involves an aesthetic evaluation of a specific relation, a specific proportion, but characteristically it is not given a precise definition in terms of numbers.

GALEN’s treatise on temperaments concerns the theory of the four humors in the human body. In the course of developing this theory, GALEN considered the standard shape of a human being, and referred explicitly to the sculptor, POLYCLITUS (5th century BC):

“Modellers and sculptors and painters [...] paint or model beautiful figures by observing an ideal form in each case, that is, whatever form is most beautiful in man or in the horse or in the cow or in the lion, always look-

19 LIDDELL et al. [1940] 1996, p. 1679: sub *summetria*, *summetros*. These meanings (and the absence of the modern sense of *symmetry* in ancient Greek) were noted by ROCHE 1987, p. 4.

20 For PLATO’s use of *symmetry* as a mathematical concept, see § 2.1, above.

21 CORNFORD [1959] 1987, pp. 110–111 (slightly modified); PLATO, *Timaeus*, 87c–e.

ing for the mean within each genus. And a certain statue might perhaps also be commended, the one called the ‘Canon’ of Polyclitus; it got such a name from having precise symmetry [*symmetrian*] of all the parts to one another.”²²

GALEN equated “precise symmetry”, that is, the proper proportions of all the parts to one another (and to the entire body), with a standard that serves as an ideal for purposes of comparison.

We now turn to VITRUVIUS and report on the role of symmetry in his classic, *De architectura*. VITRUVIUS introduced the Greek term transliterated as *symmetria* in order to capture the specific meaning of proportion it conveyed in Greek. For VITRUVIUS *symmetry* is an attribute of a whole object, namely, a human body, a building, or a machine, when the parts are so joined that, in effect, they “answer” (*respondere*) one another as well as the whole in such a way that they form a beautiful and well-coordinated entity – thereby extending PLATO’S association of symmetry with beauty.

According to VITRUVIUS architecture should be governed by the following rules: (1.) order (*ordinatione*), (2.) arrangement (*dispositione*), (3.) eurhythmy (*eurhythmia*), and (4.) symmetry (*symmetria*). He defined *symmetry* as:

“the appropriate agreement [*conveniens consensus*] of the elements of the work itself, a correspondence [*responsus*], in any given part, of the separate parts to each other and to the figure as a whole. Just as in the human body there is a symmetrical quality of eurhythmies [*symmetros est eurhythmiae qualitas*] expressed in terms of the cubit, foot, palm, digit, and other small units, so it is in perfect works [of architecture].”²³

VITRUVIUS defined *symmetry* as a property of a whole entity such that the proportions between the parts and the whole are designed to attain some value, aesthetic or practical, which he calls “appropriate agreement” (*conveniens consensus*). *Symmetry* expresses the proportion of the members of the body to each other and to the body itself. It is worth noting that *correspondence* (*responsus*) refers to a proportion of the parts of the structure to the whole, and not, for example, between parts on the right and similar parts at the same distance on the left with respect to some distinct architectural element, as the modern concept requires.²⁴

VITRUVIUS regarded the proportions of the human body as the model, the perfect design, for proper proportions in architecture:

“For Nature has so planned the human body that the face from the chin to the top of the forehead and the roots of the hair is a tenth part; also the palm of the hand from the wrist to the top of the middle finger is as much. [...] The foot is a sixth of the height of the body; the cubit a quarter, the breast also a quarter. The other limbs also have their own proportionate measurements. And by using these, ancient painters and famous sculptors have attained great and unbounded distinction.”²⁵

22 POLLITT 1965, p. 89 (slightly modified); GALEN, *De temperamentis*, Book I, in KÜHN (Ed.) 1821–1833, Vol. I, p. 566. Cf. SAMBURY 1962, p. 41.

23 ROWLAND et al. (Trs.) 1999, p. 25 (slightly modified); GRANGER (Ed. and Tr.) [1931] 1962, Vol. I, p. 26; VITRUVIUS, *De architectura*, I.2, 4.

24 AS FRITZ (1995, p. 24) noted, VITRUVIUS had nothing to say in his discussions of symmetry about either equal and similar elements placed equally distant to the right and to the left of a discernible axis, nor did he associate symmetry with mirror image.

25 GRANGER (Ed. and Tr.) [1931] 1962, Vol. I, pp. 158–161; VITRUVIUS, *De architectura*, III.1, 2.

Symmetry is thus a subset of proportion, i. e., proportions with a set of constraints and, according to the principle which VITRUVIUS formulated, precise proportions are gleaned from the ideal human body to be regarded as symmetrical and therefore beautiful. Thus, one of the architect's chief goals in designing a building is to attain beauty by pursuing symmetry.²⁶ VITRUVIUS associated *symmetry* with proportion and turned the concept into a principle, which he formulated as follows:

"We must therefore first establish a principle of symmetries [*ratio symmetriarum*] on the basis of which any modification can be incorporated without hesitation. Then the unit of length for the site of the future work is to be set forth. When the magnitude of this is once determined, an adaptation of the proportion to its beauty may follow it so that the appearance of its eurythmies [*eurythmia*] may be convincing to the observer."²⁷

In VITRUVIUS's conception, *symmetry* as a principle of design requires a module, a fundamental unit, in relation to which fixed proportions can be established. Any particular proportion in a building should also have common relationships, or common divisors so that the elements can be bound into a beautiful whole.²⁸

A whole entity may be a living being designed, so to speak, by God, but it can also be an object designed and constructed by human beings, an edifice or a machine. VITRUVIUS made use of the concept of symmetry in describing the ways to build machines. In Book X of *De architectura* he turned his attention to the design of war machines: "I will set forth the construction of catapults and ballistae with the symmetries on which they are based [*quibus symmetriis comparari possint*]."²⁹ He proceeded with a detailed analysis of the scale and the proportions of the parts that comprise these machines for them to function properly as a whole. He concluded the discussion by remarking: "I have set out the symmetries of ballistae and catapults in a way that I thought would make them of the greatest practical use." [*De ballistis et catapultis symmetrias, quas maxime expeditas putavi, exposui.*]³⁰

Thus the proper functioning of a machine depends on the *symmetries* of its constituent parts. Designers of buildings and designers of machines, that is, architects and engineers, both achieve success by adopting the appropriate set of specific proportions, namely, the "principle of symmetries", and implementing it in their designs.

We see then that in the class of meanings of "properly proportioned" there are aesthetic notions related to beauty and goodness on the one hand, and suitability and appropriateness on the other. We observe that *symmetry* in the sense of "well proportioned" occurs frequently in early modern discussions of the human form, sculpture, architecture and engineering. The aesthetic and the mathematical meanings of symmetry were thus distinguished in Latin by the terms *symmetria* and *commensurabilis*, respectively.

VITRUVIUS decisively influenced subsequent developments for close to two millennia. One of the first serious attempts to engage productively with VITRUVIUS's principle of sym-

26 E. g., GRANGER (Ed. and Tr.) [1931] 1962, Vol. 1, p. 286; ROWLAND et al. (Trs.) 1999, p. 69; VITRUVIUS, *De architectura*, V.6, 7.

27 GRANGER (Ed. and Tr.) [1931] 1962, Vol. 2, p. 22; cf. ROWLAND et al. (Trs.) 1999, p. 78; VITRUVIUS, *De architectura*, VI.2, 5.

28 See the comments by ROWLAND et al., in ROWLAND et al. (Trs.) 1999, p. 150.

29 GRANGER (Ed. and Tr.) [1931] 1962, Vol. 2, p. 327 (slightly modified); VITRUVIUS, *De architectura*, X.10, 1.

30 ROWLAND et al. (Trs.) 1999, p. 130 (slightly modified); GRANGER (Ed.) [1931] 1962, Vol. 2, p. 338; VITRUVIUS, *De architectura*, X.10, 1.

metry took place during the Renaissance. ALBERTI, the Italian architect, sculptor, painter, and writer, is commonly regarded as the founder of the theoretical basis for the visual arts in the Renaissance. His three seminal treatises on painting, sculpture, and architecture brought new insights to these domains that reinvigorated them. Based on compositional formulae that became part of classical design, ALBERTI'S *On the Art of Building in Ten Books* (*De re aedificatoria*), first published posthumously in 1485, recast the architectural theory of Antiquity to serve the needs of his contemporaries. His creative response to VITRUVIUS and his presentation of ancient architecture in *De re aedificatoria*, as well as the establishment of an aesthetic based on natural law and reason, made ALBERTI'S text essential reading for any aspiring practitioner, and provided the framework for Renaissance architecture. In Book I of *De re aedificatoria*, he remarked:

"In order to give Beauty to such Apertures [i. e., windows and doors], Care must be taken that those of like Dimensions correspond with each other both on the Right and on the Left [*coaequatis dextera sinistris respondeant*]. It was usual to leave the Windows and Doors in odd Numbers, but so as for the Side ones to answer each other [*responderent*], and in the Middle to be somewhat larger than the rest."³¹

In this passage, ALBERTI was explicitly concerned with an aesthetic formula for placing apertures in walls – a general requirement for human dwellings. The aesthetic principle consists in placing architectural elements in a relation of "correspondence".

To be sure, ALBERTI did not invoke the term *symmetry* at all in this major work.³² But here he introduced a distinct precept (later called *symmetry*) which is not to be found in VITRUVIUS, namely, similar parts on the façade of buildings which have the same measure, e. g., windows, must be arranged in such a way that they respond to one another, that those to the left correspond to those to the right of an element placed between them, e. g., a door. In so doing ALBERTI clearly introduced a new principle into architectural aesthetics. For VITRUVIUS, by contrast, the verb *respondere* indicated a relation which he called *symmetry* – proportions that expressed agreement, a correspondence, among the parts and between the parts and the whole. In Latin *respondere* may connote correspondence as well as proportion, and the Vitruvian *symmetry* means precisely a kind of proportion.³³ ALBERTI appears then to make a bold but well concealed move within this literary tradition. He used the same verb which is found in VITRUVIUS, that is, *respondere*, but divorced it from "proportion" and took it to mean "correspondence". In this way he forged a new technical term and yet remained in the Vitruvian fold.

However, over and above his nuanced dependence on the text of VITRUVIUS, ALBERTI – as a pioneer of Renaissance thinking – appealed to direct observation of nature and ancient artifacts. He summarized these experiences as follows: "So agreeable it is to Nature, that the Members on the right Side should exactly answer [*correspondeant*] those on the left."³⁴ This observation immediately entails a rule for the architect:

31 LEONI (Tr.) [1726] 1955, p. 18; cf. RYKWERT et al. (Trs.) 1988, p. 29; ALBERTI 1485, c.iiiir-v (Book I, ch. 12).

32 The term *symmetria* (including variant spellings) does not occur in the *index verborum* to ALBERTI'S *De re aedificatoria*; see LÜCKE 1975–1979, Vol. 3.

33 See, e. g., THOMAS 1587, Eee.iiiiv: "Responsus. Vitru., an agreeing of one thing with another; a consent, a convenience, a proportion."

34 LEONI (Tr.) [1726] 1955, p. 201 (slightly modified); cf. RYKWERT et al. (Trs.) 1988, p. 310; ALBERTI 1485, y. vir (Book IX, ch. 7).

“Wherefore the first thing we are to take Care of must be, that every Part, even the most inconsiderable, lie duly to the Level and the Plumb-line, and be disposed with an exact Correspondence as to the Number, Form and Appearance; so that the Right may answer to the Left, the High to the Low, the Similar to the Similar, so as to form a correspondent Ornament in that Body whereof they are Parts. [...] The Ancients were so punctual in this mutual correspondence of the parts. [...] We see [*uidemus*] Statues of two and four horses, and of their Drivers and Lookers on so exactly like to each other, that Art in them may be said to have exceeded Nature, in whose Works we never even see so much as a nose exactly like another.”³⁵

The correspondence that ALBERTI discerned in ancient artifacts surpasses nature’s capacity, for the parts that comprise it are produced in such a way that, by artificial design, they are exactly identical. ALBERTI’s dependence on his own observations is clearly attested in this remark. He did not rely exclusively on the literary sources and, as a Renaissance man, he observed nature directly with an independent mind. There is a tension between what ALBERTI saw himself and what he read in, say, the text of VITRUVIUS. He then tried to take advantage of both sources – direct observation and literary tradition. In some sense, he succeeded inasmuch as his successors apparently were unaware of any such tension.

ALBERTI did use the term *symmetry* in his seminal work, *De pictura*:

“A very small man is proportional to a very large one; for there was the same proportion of span to stride, and of foot to the remaining parts of the body in Evander as there was in Hercules, whom Gellius conjectures was taller and bigger than other men. Yet the proportion of the limbs of Hercules was no different from the body of the giant Antaeus, since the symmetry [*symmetria*] from the hand to the elbow, and the elbow to the head, and all the other members in both agree [*congruebat*] in similar ratio.”³⁶

ALBERTI’s reasoning could be used to justify the argument for scale modeling that architects presented to decision makers and patrons: what works in the small will also work in the large. The use of models was an important tool for demonstrating the feasibility of a plan, and BRUNELLESCHI’s scale model in 1420 for designing the dome of Santa Maria del Fiore in Florence was an example that ALBERTI probably had in mind. Indeed, the construction of this dome (completed in 1436) was rightly considered a major feat of engineering by BRUNELLESCHI’s contemporaries.³⁷ For our argument, it is striking that when ALBERTI referred to the proportions of a structure, be it a model, an actual building or, indeed, the form of a human being, he resorted to VITRUVIUS’s concept of *symmetry*, which is simply proportion.

VITRUVIUS’s writings include a description of the so called Vitruvian man (see Fig. 1), a human form whose parts are measured in relation to a module. If such a man is well drawn, his structure exhibits the proportions of the constituent elements to a fixed module and to the whole structure. This view of Vitruvian man was illustrated by several artists in the Renaissance, including Leonardo DA VINCI (1452–1519) and Cesare di Lorenzo CESARIANO (1475–1543).³⁸

35 LEONI (Tr.) [1726] 1955, p. 201 (slightly modified); cf. RYKWERT et al. (Trs.) 1988, p. 310; ALBERTI 1485, y. vir (Book IX, ch. 7).

36 GRAYSON (Tr.) 1972, p. 50 (slightly modified); GRAYSON (Ed.) 1972, p. 51.

37 Cf. ALBERTI’s dedication to BRUNELLESCHI in the Italian version of *De pictura* in GRAYSON (Ed. and Tr.) 1972, pp. 32–33.

38 For the text of VITRUVIUS which specifies the symmetry (i. e., the proportions) of the ideal human body, see VITRUVIUS, *De architectura*, III.1, 3; GRANGER (Ed. and Tr.) [1931] 1962, Vol. I, pp. 159 ff. The illustration of this Vitruvian man in the notebooks of Leonardo DA VINCI is very well known. Indeed, DA VINCI referred

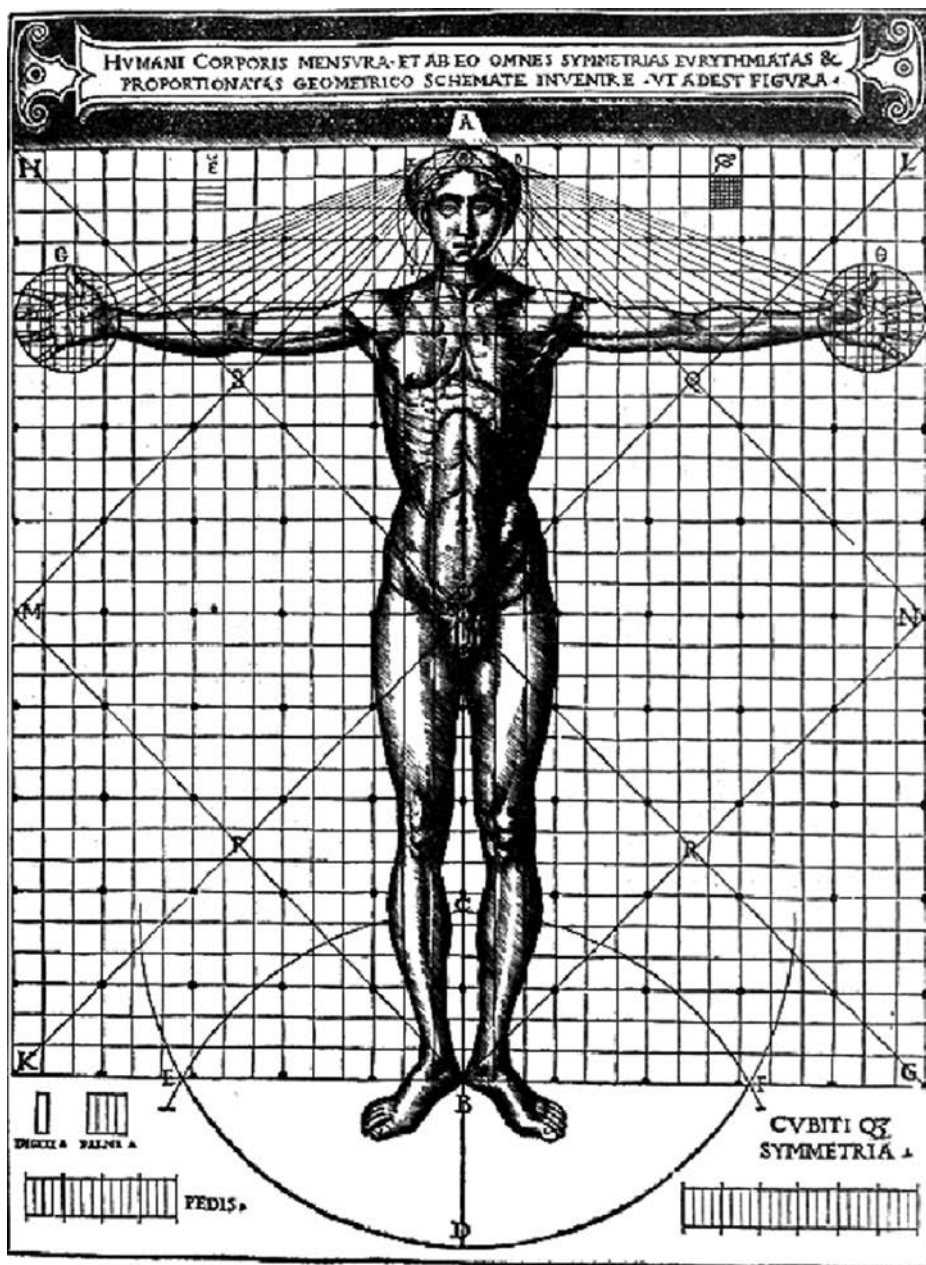


Fig. 1 Vitruvian man: CESARIANO 1521, f. 49r

precisely to this passage in VITRUVIUS: see RICHTER (Ed.) [1883] 1970, Vol. 1, pp. 182–183 (Plate xviii). See also CESARIANO (Tr.) 1521, f. 49r (Fig. 1). In 1757 Edmund BURKE (1729–1797) strongly criticized this presentation of the human body as the source of its beauty and, by analogy, that of buildings: BURKE [1757/1759] 1998, pp. 136–137.

VITRUVIUS thought of the body as symmetrical in terms of proportions; he did not even call attention to the correspondence between right and left limbs. ALBERTI seems to have realized that the concept of symmetry as “proportion” has to be distinguished from the idea of correspondence that he developed in his book on architecture.

ALBERTI’S innovation was clearly influential: his usage of the term, *correspondence*, contains the idea of symmetry as it was defined some two centuries later, an idea that applies to nature (animals and human beings), as well as to artifacts, notably, buildings. Based on visual evidence, ALBERTI ascribed the knowledge of this precept to the ancients without claiming it can be found in any specific ancient text. In one stroke he associated himself with the Vitruvian tradition but, at the same time, he distanced himself from the literary tradition and turned to the independent judgment of his own eyes. The question, however, remains: How did ALBERTI’S understanding of correspondence come to be called *symmetry*?

We will see how the process of change culminated in a new definition that PERRAULT proposed in his celebrated translation of VITRUVIUS’S *De architectura* into French in 1674. In the face of growing confusion and a willingness to sever the moderns from the ancients, PERRAULT proposed a precise definition that provided the ground for a new conception of symmetry in architecture. This, we argue, is one of the principal mileposts on the way to the modern scientific concept of symmetry.

PERRAULT explicitly sought and, indeed, established a new meaning for *symmetry*. He arrived at a novel conclusion: proportions in architecture are arbitrary. They obtain their status as expressing beauty neither from a divine source nor from eternal mathematical principles; rather, beauty depends on authority and habit. PERRAULT reported fierce opposition to the boldness of his project, and he was astonished that architects had turned veneration for the ancients into a “religion”, censuring any move towards developing new ideas in architecture which could match, if not surpass, the achievements of the past. PERRAULT wrote with the authority of a theoretician as well as of a practicing architect: he translated *De architectura*, built the Observatory of Paris, and designed the eastern façade of the Louvre (known as the “Colonnade”; see Fig. 2).

According to PERRAULT, VITRUVIUS used a variety of terms without carefully distinguishing them from one another:

“And here we must remark, that to express the Relation that many things have one to another, as to their Greatness or different Number of Parts, Vitruvius indifferently makes use of three words, which are *Proportion*, *Eurythmy*, and *Symmetry*. But we have thought it proper only to make use of the word *Proportion*, because *Eurythmy* is a Greek word, which signifies nothing else but *Proportion*; and *Symmetry*, although a word commonly used, does not signify in French [*en François*] what Vitruvius understands by *Proportion*; for he understands by *Proportion*, a Relation [*rapport*] according to Reason; and *Symmetry*, in French, signifies only a Relation of Parity and Equality. For the word *Simmetria* signifies in Latin and Greek *Relation* only. As for Example, as the Relation that Windows of Eight Foot high, have with other Windows of Six Foot, when the one are Four Foot broad, and the other Three: and *Symmetry*, in French, signifies the Relation, for Example, That Windows have one to another, when they are all of an equal height and equal breadth; and that their Number and Distances are equal to the Right and the Left; so that if the distances be unequal of one side, the like inequality is to be found in the other.”³⁹

39 *Anonymous* 1692, pp. 29–31 (slightly modified); PERRAULT 1674, pp. 39–41.



Fig. 2 The eastern façade of the Louvre, known as the Colonnade (designed by Claude PERRAULT): Photo by Jean-Pierre DALBÉRA, downloaded from Wikimedia November 20, 2015, licensed under Creative Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:La_colonnade_du_Louvre_%C3%A0_Paris.jpg

PERRAULT provided the reader with an explicit definition of the term *symmetry* together with a clear example. A key expression in this passage is that in French usage at the time symmetry meant that the windows to the left and to the right of some distinct central architectural element are all identical. The correspondence we have here is a restricted kind of bilateral symmetry with no mirror image (stated or implied). We are on the way to the later concept, but we have not yet reached it.

In the spirit of separating the moderns from the ancients, PERRAULT explicitly distinguished the traditional “French” usage of *symmetrie* (PERRAULT’s spelling) from the ancient usage of *symmetria* in order to avoid the ambiguity in the meaning of *symmetrie* at the time. In other words, PERRAULT sought to clarify what seemed to have become a muddled concept. Although he did not claim innovation, he assigned to *symmetry* a definite relation which diverged from that of VITRUVIUS. PERRAULT thus translated VITRUVIUS’s *symmetria* in Latin by *proportion* in French in order to avoid the ambiguity in the meaning of *symmetrie* in his time. By making this clear-cut distinction he called attention to the fact that VITRUVIUS did not use *symmetria* to mean correspondence of right and left.

In contrast to Vitruvian *symmetry* where one considers in three dimensions both the structure as a whole, as well as each of its constituent elements, in relation to a module, PERRAULT’s definition makes *symmetry* a relation between systems in two dimensions (i. e., façades projected onto a plane), or parts within a system. *Symmetry* is now defined as expressing a relation of similarity and equality. The novel definition of *symmetry* recognizes a dominant feature in the system under examination where to the right and to the left or, more generally, to either side of it elements are ordered in such a way that they bear the same relation to this feature. The elements are identical and hence interchangeable (independent of their placement), but it is their placement equally to the right and to the left of some feature that is called a symmetrical arrangement.

The first occurrence in the literature of a precise definition of *symmetry* in a non-classical sense is due to PERRAULT even though, as PERRAULT was aware, usage of *symmetry* in this sense was common in the French language earlier in the seventeenth century. PERRAULT’s definition represents a crucial turning point in the emergence of the modern

concept of symmetry by explicitly moving away from its classical meanings. However, while this new definition of symmetry marks a significant step in the development of the modern meaning, it is still quite distinct from it.

What we do see in this new definition is a concept in the process of changing, that is, the way *symmetry* was modified in the course of two centuries, from the time of ALBERTI to that of PERRAULT. Our account confirms PERRAULT's claim to be working within an architectural tradition that had distanced itself from VITRUVIUS, based on new aesthetic sensibilities. He cast this new aesthetic sensibility in a terse definition: "Symmetry [...] signifies [...] a Relation of Parity and Equality."⁴⁰

A century later, Denis DIDEROT (1713–1784), Jean D'ALEMBERT (1717–1783), and their group of dedicated scholars published the *Encyclopédie* which offers a superb baseline for contemporary scholarship both in mathematics and aesthetics. A perusal of the *Encyclopédie* shows that the concept of symmetry was understood at the time in two senses:

(1.) in the traditional Vitruvian sense, that is, a set of proper proportions of the parts of a building with each other and with the whole.

This sense of symmetry was called "uniform symmetry". It rules throughout the entire entity. The second sense, as defined formally by PERRAULT, connoted:

(2.) the equality and similarity of columns, pilasters, doors, windows, etc. on one side of the façade of a building to those on the other side, with respect to some central feature of the façade.

For obvious reasons this second sense was called "respective symmetry". In this case only the opposite sides are alike or equal to each other.⁴¹

Both senses, uniform and respective symmetry, refer to a single object, not a relation between two objects. Moreover, while respective symmetry is akin to the modern sense of bilateral symmetry, it lacks the idea of order reversal, that is, right-left inversion. For example, windows of the same dimensions at equal distances on opposite sides of a door were said to be respectively symmetrical according to this definition. This sense of symmetry was then extended to other kinds of objects such as ships, plants, animals, and crystals. Whereas in architecture it was the basis for an aesthetic judgment, in other domains it was simply descriptive.

This overview of the history of the concept, complete with two trajectories, entails a juncture where a dramatic change occurred. Somewhere in the literature there must have been a substantial change in spatial analysis which called for a new concept – the origin of the concept we use today. This juncture, together with the relevant set of texts that displays it, is the subject of the remaining part of the paper. The two principal players are a philosopher and a mathematician, Immanuel KANT (1724–1804) and LEGENDRE, respectively. The story ends with mathematics, specifically, geometry, winning the day, but philosophy too played an important role if not in solving the problem, at least in calling attention to the issues at stake. To anticipate the result of our discussion: the traditional concept of symmetry had essentially two meanings depending on the context in which it was applied. In the mathematical context it is relational, expressing a ratio between two magni-

40 HON and GOLDSTEIN 2008, § 4.2.2.

41 DIDEROT et al. 1765, Vol. 15, p. 735, entry *Symétrie*.

tudes which have a common measure; in the aesthetic domain it is a property of an object expressing some aesthetic value. In both cases symmetry functions as a descriptive term: it either describes a certain relation, or conveys a certain property. Against this background we formulate our claim. The revolutionary usage of symmetry in the latter half of the eighteenth century had to do with a new usage: the concept is now used in an argument, as a conceptual tool in a mathematical proof. We return then to the third motivating question: When, and in what context, did symmetry become part of an argument and not just descriptive? This is something completely new and we do not hesitate to call it revolutionary, although it is not generally recognized as such.

3. Philosophy (Kant) versus Mathematics (Legendre)

3.1 Kant

We start with KANT. The year is 1768, a century after Claude PERRAULT defined symmetry in the context of architecture as “a Relation of Parity and Equality”. KANT published a short essay in which he attempted to develop an argument for determining the directionality of space. In this essay, *Concerning the ultimate ground of the differentiation of directions in space*, KANT sought to undermine LEIBNIZ’S proposal for a new mathematical discipline, namely, *analysis situs*, and to demonstrate the validity of NEWTON’S assertion concerning the nature of space as an absolute entity: an entity that can act but cannot be acted upon. KANT’S strategy depended on the claim that if one were to demonstrate the real existence of a fundamental, essential, and unanalyzable spatial quality, such as directionality (in the absence of which certain phenomena would be either unintelligible or impossible), then the relational view of space that LEIBNIZ propounded would be refuted.

KANT’S argument and, indeed, its failure, offers a fine opportunity to follow closely an example of path-breaking research in the second half of the eighteenth century. In a crucial stage of the argument, KANT provided a constructive account of the way by which the mirror image of a hand is formed. In this passage KANT named the body he constructed the “incongruent counterpart” of the original body: “I shall call a body which is exactly equal and similar [*völlig gleich und ähnlich*] to another, but which cannot be enclosed in the same limits as that other, its *incongruent counterpart* [*inkongruentes Gegenstück*].” Thus, if the hand in question is a right hand, its incongruent counterpart is a left hand. KANT commented that “the reflection of an object in a mirror rests upon exactly the same principle”.⁴²

For a modern reader the temptation is strong to recast KANT’S analysis into current terminology and to proceed by rendering the incongruent counterparts as elements that could be superposed through some symmetry transformation. One may feel justified in doing so by the fact that it is quite clear that KANT was groping for a new concept that would facilitate the analysis of directionality of space. Indeed, KANT referred twice to *symmetry* in this context: “[...] the most common and clearest example is furnished by the limbs of the human body, which are symmetrically [*symmetrisch*] arranged relative to the vertical plane of the body.”⁴³

42 WALFORD and MEERBOTE (Eds. and Trs.) 1992, p. 370; KANT [1768] 1912, p. 398.

43 WALFORD and MEERBOTE (Eds. and Trs.) 1992, p. 370; KANT [1768] 1912, p. 398.

A few lines later KANT added that: “[...] in order to demonstrate the possibility of an incongruent counterpart, let a body be taken consisting, not of two halves which are symmetrically [*symmetrisch*] arranged relative to a single plane that intersects it but rather, say, a human hand.”⁴⁴

The text is unambiguous: symmetry and incongruent counterparts are two different concepts, conveying two different meanings. For KANT symmetry connotes a relation between the two halves of a single entity, whereas his novel concept of incongruent counterparts conveys a certain relation between two distinct objects. Notice the dependence of symmetry on a specific arrangement: a plane is imagined between the two halves of a body. In this sense, symmetry captures the property of a body in which equal and similar parts are placed on opposite sides of a plane that divides the body into two halves. KANT emphasized that, given the meaning of *symmetry* at the time, the two hands of a human body are *not* symmetrical, and a new concept is needed to capture their relation.

Further, in contrast to symmetry, the concept of incongruent counterparts does not depend on any specific spatial arrangement; this relation is not mediated by any third element and the two “counterparts” can be placed anywhere in space. The relation indicates that a right hand and its mirror image, a left hand, are indeed incongruent counterparts. Moreover, the concept of incongruent counterparts is effectively applied in several domains. Interestingly, in both cases, namely, symmetry and incongruent counterparts, KANT is not concerned with aesthetic considerations; the analysis is purely geometrical – an inquiry into the properties of physical space.

Consider now the fact that these two occurrences of the term *symmetry* are, to the best of our knowledge, the only occurrences of *symmetry* or *symmetrical* in the entire Kantian corpus in reference to spatial features. This fact supports the claim that KANT was not developing an argument concerning the nature of physical space based on some understanding of the term *symmetry*. In fact, symmetry here is invoked in the French architectural tradition as introduced to German readers in 1716 by Christian WOLFF;⁴⁵ it is still not the modern concept.

As we have seen, the entry *Symmétrie* in the *Encyclopédie* gives us confidence that our claim is correct, namely, KANT was seeking a novel concept, different from the concept of *symmetry*, as understood at the time. Here philosophy assists history in distinguishing between the property of a single entity and the relation of two separate entities. The distinction throws light on the different usages of the concept of symmetry whose complex history has both aesthetic and scientific aspects.

KANT sought to demonstrate a human capacity for discerning a direction inherent in physical space which would prove its absolute nature. The concept of incongruent counterparts was designed to facilitate the proof that there is directionality in space. In other words, the concept was a means for achieving a goal – proof of directionality.

KANT provided different instances of incongruent counterparts, namely, human anatomical features, geometry, and artifacts. He observed that, for example, “the thread of a screw which winds round its pin from left to right will never fit a nut of which the thread runs from right to left”.⁴⁶ KANT’s appeal to right-turning and left-turning screws as an

44 WALFORD and MEERBOTE (Eds. and Trs.) 1992, p. 370 (slightly modified); KANT [1768] 1912, p. 398.

45 See HON and GOLDSTEIN 2008, pp. 151–152.

46 WALFORD and MEERBOTE (Eds. and Trs.) 1992, p. 369; KANT [1768] 1912, pp. 397–398.

example of incongruent counterparts indicates that he understood the concept in great generality, for he abstracted the relations of objects in several different domains. As far as we can determine, KANT is the first thinker to make a general claim concerning the relation of reverse order in natural and man-made objects.

With his concern for the possible directionality of space, KANT proposed a distinction, hinting at the principle of ordering without presenting it in mathematical terms: “The distinctive characteristic in question consists in the particular direction in which the order of the parts is turned.”⁴⁷ And he made the following claim without proof and without a figure (see Fig. 3): “A spherical triangle can be exactly equal and similar [völlig gleich und ähnlich] to another such triangle, and yet still not coincide [decken] with it.”⁴⁸

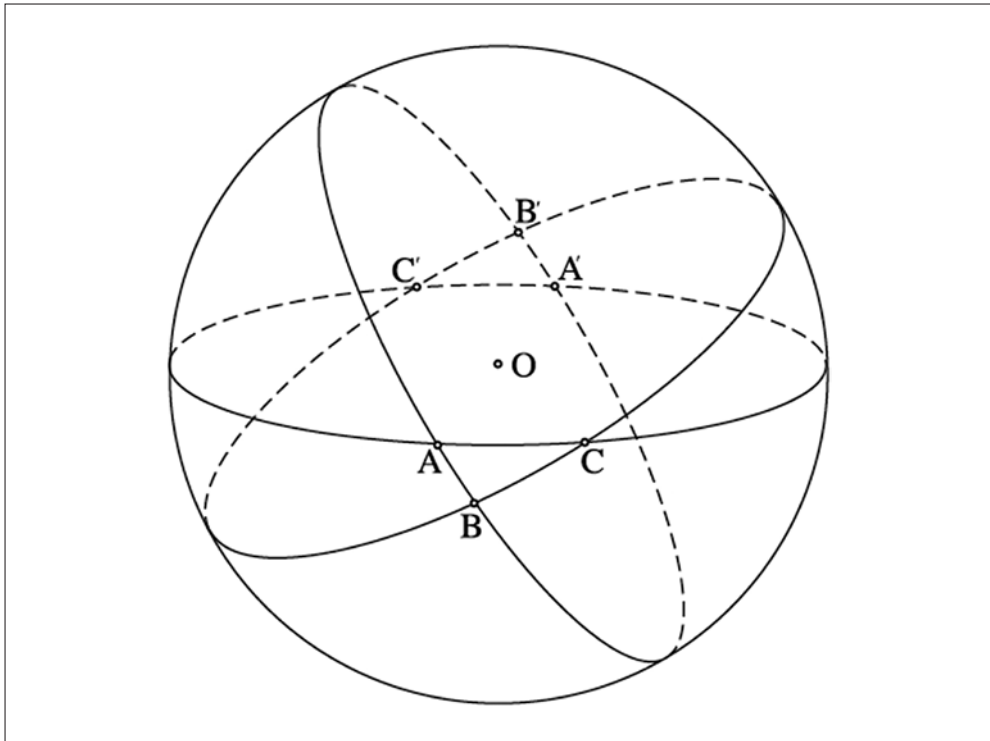


Fig. 3 Two spherical triangles (ABC and A'B'C') that are equal and similar but cannot be made to coincide.

For KANT these two triangles are incongruent counterparts of each other and their relative positions in space have no bearing on this relation. In the plane there are some congruent triangles that can only be shown to coincide by lifting one out of the plane and “flipping” it over, taking advantage of the third dimension (for example, consider the superposition

47 WALFORD and MEERBOTE (Eds. and Trs.) 1992, p. 368 (slightly modified); KANT [1768] 1912, p. 396.

48 WALFORD and MEERBOTE (Eds. and Trs.) 1992, p. 370; KANT [1768] 1912, p. 398; cf. KANT [1783] 1920, pp. 39–40 (§ 13); HATFIELD (Ed. and Tr.) [1997] 2004, p. 37.

of the letters “d” and “b” that requires “flipping”). But for spherical triangles this “flipping” does not work because one triangle would be convex with respect to the center of the sphere, whereas the other would be concave with respect to the center of *that* sphere. Moreover, it is not clear at all what it means to flip a three-dimensional object such as a spherical triangle in the fourth dimension. This is equivalent to the impossibility of turning a right-handed glove into a left-handed glove (and *vice versa*), without deforming one of the gloves. Note that the two spherical triangles have the same status, and that no mirror is involved. KANT cited no source for this theorem, and we have not found it in any text prior to 1768.

KANT thus noticed the issue of ordering; this is a great discovery, but he did not exploit his insight, apart from including spherical triangles in his list of examples of incongruent counterparts. He came up with a new concept, and a scientific concept at that – with no concern for any aesthetic feature. Clearly, for KANT the French architectural idea of *symmetry* (which was aesthetic) was completely different from his geometrical conception of incongruent counterparts.

One characteristic of a scientific insight is the recognition of connections where none is expected. The term, incongruent counterpart, could have played such a role for recognizing new connections. KANT’s efforts certainly had this potential; he abstracted the relation of objects he observed and considered their form. It did not matter to him whether the object was a hand, a snail, hops and beans, a screw, or a spherical triangle. His was a problem of form and its directionality in space, and he realized that all these objects pose the same problem: a pair of these objects can be equal and similar and yet not be superposable. KANT gave the spatial feature he had discovered a name, incongruent counterparts, but it did not take hold, that is, KANT’s insights were not pursued by his disciples or successors. This result suggests that our search should continue: we still need to determine the context in which the scientific concept of symmetry explicitly included the reversal of ordering embedded in a mathematical proof.

3.2 Legendre

We move on: Who introduced a new definition of symmetry which was part of a sustained argument, that is, part of a mathematical proof?

We will see that LEGENDRE – the hero of our story – started from a specific problem in solid geometry and found the solution in the form of a new scientific concept which he designated *symmetry*, reclaiming a term in ancient mathematics whose earlier meaning was no longer part of current scientific usage.

With the growing interest in solid geometry in the eighteenth century, mathematicians addressed, among other things, the transformation of the Euclidean definitions of similarity and equality from a two-dimensional into a three-dimensional framework. This transition from figures in the plane to three-dimensional bodies introduces many difficulties since the complexity of the cases increases substantially.

It should be noted that similar and equal plane figures are, in Euclidean terms, always congruent.⁴⁹ The point of departure is, then, EUCLID’s own generalization from the geome-

49 Cf. HEATH (Tr.) [1926] 1956, Vol. 1, pp. 224–228; commenting on EUCLID, Common Notion 4: “Things which coincide with one another are equal to one another.”

try of the plane, extrapolating by analogy the notions of similarity and equality to the case of solid bodies. Book 11 of EUCLID's *Elements*, devoted to solid geometry, includes the following definitions:

“9. Similar [*homoia*] solid figures are those contained by similar planes equal in multitude.

10. Equal and similar [*isa de kai homoia*] solid figures are those contained by similar planes equal in multitude and in magnitude.”⁵⁰

We should point out that here, in Book 11, EUCLID does not invoke the term *symmetria*, as he did in Book 10.⁵¹ He defined similarity and equality of solid figure with the requirement that the bodies are enclosed by an equal number of similar plane figures of the same magnitude. In these definitions lie hidden difficulties, rooted in the limitations of the Euclidean principles of geometry.

In the Preface to his *Elements of Geometry* of 1794 LEGENDRE declared that his geometry will be built on a firm foundation and will include new geometrical ideas. Indeed, he revised the definitions in EUCLID's *Elements*, Book 11 and, in so doing, transformed solid geometry, and with it the scientific conception of *symmetry*.

What then was the remarkable step that LEGENDRE took? LEGENDRE realized that for the proper characterization of polyhedra, it is essential to assess the properties of solid angles. He therefore devoted Book 5 of his *Geometry* to *Plane and Solid Angles*, and then proceeded to Book 6, *The Polyhedra*. It is in Book 5 of his *Geometry* that LEGENDRE introduced *symmetry* into solid geometry: “Definition: Two equal solid angles which are formed (by the same plane angles) but in the inverse order will be called angles *equal by symmetry*, or simply *symmetrical angles*.”⁵² And Book 5, Prop. 22: “If two solid angles are composed of three plane angles that are equal to each other, respectively, the planes in which the angles are equal will be equally inclined to one another.”⁵³ After proving this theorem, LEGENDRE added a scholium concerning the coincidence of two solid angles:

“This coincidence, however, only takes place, on the supposition that the equal plane angles are *arranged in the same way* for both solid angles; for if the equal plane angles were *arranged in the inverse order* [...] the two solid angles would be equal in all their constituent parts without however it being possible to superpose one on the other. This kind of equality which is neither absolute nor of superposition is worthy of being distinguished by a special expression: we will call it *equality by symmetry*.”⁵⁴

LEGENDRE discovered a property of solid angles which had not been noticed before. This is a fundamental discovery in solid geometry; LEGENDRE was aware of the fact that he had noticed something completely new, and he went on to give his discovery a name: two solid angles which are similar, that is, all their constituent parts are the same, and yet are not superposable, are equal by symmetry. When the two solid angles are similar and their plane angles follow the same order, they are equal; but when they are similar and their plane angles are arranged in the reverse order, then they are symmetrical (see Fig. 4).

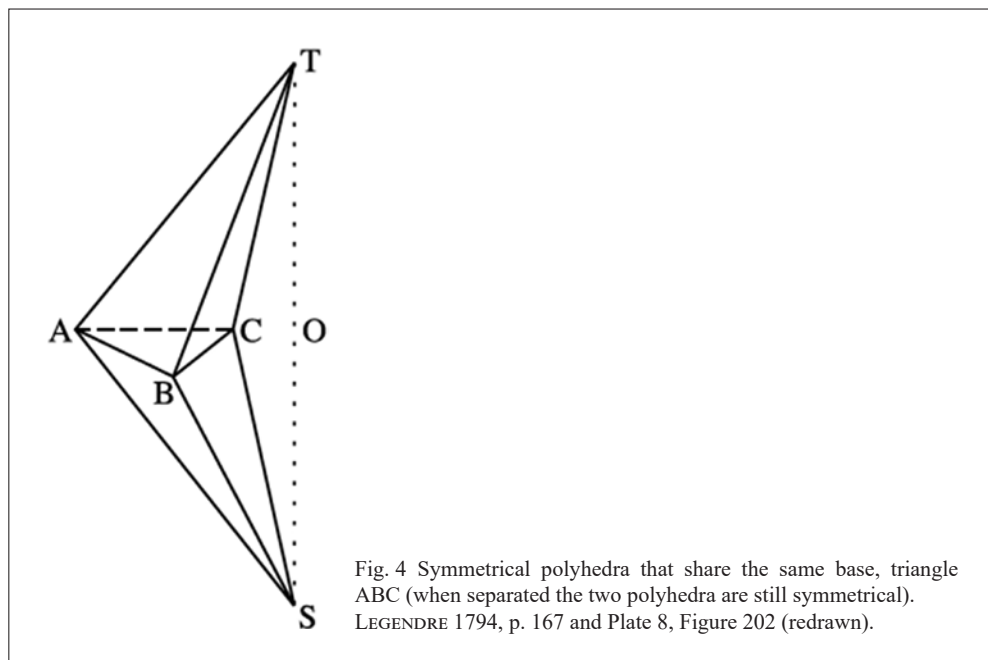
50 HEATH (Tr.) [1926] 1956, Vol. 3, p. 261; EUCLID, *Elements*, Book XI, defs. 9, 10.

51 See the discussion of EUCLID in § 2.1, above.

52 LEGENDRE 1794, p. 159, italics in the original.

53 LEGENDRE 1794, p. 157.

54 LEGENDRE 1794, pp. 158–159, italics in the original.



Essential to this analysis is the notion of ordering. LEGENDRE distinguished between proceeding in the same order and proceeding in the inverse order. We see then that LEGENDRE recognized that both options are viable as long as one is careful to note in which order one proceeds as well as the consequences of such a choice.

LEGENDRE thus realized that the analogy with plane geometry breaks down when it comes to similar and equal bodies in the domain of solid geometry: “In plane figures there is nothing properly speaking [that corresponds to] *equality by symmetry*, and all things one might wish to call [symmetrical] are in fact absolute equalities or equalities by superposition: the reason is that one can reverse a plane figure and take indifferently the above for the below. It is entirely different in the case of solids.”⁵⁵

Not surprisingly, LEGENDRE’s analysis of the geometrical relations of symmetrical polyhedra led him to add several explanatory notes in the appendix to his *Geometry*. In Note 7 he remarked that one can get a correct idea of the disposition of the two symmetrical polyhedra by considering one of them the image of the other formed in a plane mirror. Imagine the common plane of two such polyhedra as a mirror subject to the physical law of mirror reflection (e. g., in Fig. 4 consider triangle ABC a mirror). The two three-dimensional mathematical objects are mirror images of each other such that one object does not have any ontological priority over the other – the two objects have in fact the same status, and what is more: they are similar and equal. But mirror image is not part of formal geometrical argument; rather, it is an aid to understanding.

⁵⁵ LEGENDRE 1794, pp. 159–160, italics in the original.

With LEGENDRE'S definition of *symmetry*, the "reflected" object stands on the same geometrical footing as the original object. This understanding was new in the latter half of the eighteenth century; it had never been invoked in the case of mirror images. LEGENDRE'S symmetrical solids are really where they appear to be. His purpose was to characterize the properties of symmetrical solids for which there is a mutual relation. Notice, however, that no mirror is referred to in the text of Books 5 or 6; the mirror is only introduced in Note 7 for explanatory purposes and is not part of the mathematical proof. We reiterate that the so-called reflected solid is not an image; rather, it is a "real" polyhedron which cannot be superposed onto the original solid body.

For LEGENDRE'S sense of *symmetry*, a pair of polyhedra are mutually symmetrical, and one is not required to consider the pair to be a "whole". Indeed, two objects are mutually symmetrical regardless of their placement in space, that is, independent of any arrangement, for the *symmetry* of the two objects is defined by similar and equal faces in the inverse order, and this is a property of the objects, not of their arrangement. (In Fig. 4 pyramid ABCT is symmetrical to pyramid ABCS, irrespective of their spatial arrangement; that is, the two pyramids can be separated from their shared base, triangle ABC, and the two pyramids will still be symmetrical.) To be sure, such objects can be placed in "mirror-image", but this is not a defining characteristic for them. We can thus observe that LEGENDRE cast *symmetry* in terms of an abstract mathematical relation.

In Book 7 of his *Geometrie*, LEGENDRE investigated, among other things, the properties of spherical triangles. In the scholium to Prop. 11, where he demonstrated how two spherical triangles may be equal, LEGENDRE noted:

"The equality of these two [spherical] triangles is not, however, absolute or of superposition, for it would be impossible to place one on the other exactly unless they were isosceles. The equality in question is the equality that we have already called equality by *symmetry*, and for this reason we call these triangles [...] *symmetrical triangles*."⁵⁶

Here LEGENDRE found a good opportunity to extend his new usage of the term *symmetry* to triangles on the same sphere, or on equal spheres. And he offered a proof of the theorem which KANT had merely stated.

LEGENDRE demonstrated that his new concept of symmetry is applicable and, indeed, helpful in elucidating some basic properties of spherical triangles. The equality that these triangles exhibit is precisely the equality by symmetry which LEGENDRE defined in his study of solid angles in Book 5 and which he then applied in Book 6. Once the definition is in place, the proof of this theorem is trivial, and LEGENDRE presented the argument in a few words. The proof consists in identifying the relation as symmetrical, based on the fact that their associated solid angles are symmetrically equal. The proof is then completed. The beauty of it, if one may wish to attach an aesthetic value to a mathematical proof, is that the proof consists in simply identifying the relation as symmetrical and that's it.

The notion of solid angles is not to be found in KANT, but it is central for LEGENDRE'S argument. LEGENDRE apparently was unaware that KANT had already drawn attention to this case of spherical triangles in 1768 (without a proof), almost 30 years earlier.

56 LEGENDRE 1794, pp. 215–216, italics in the original.

4. Conclusion

The history of the concept of *symmetry* up to the formation of the modern concept in the late eighteenth century is essentially a two-tiered development: the change in the meaning of *symmetry* from Antiquity to the time just before LEGENDRE can be explained by appealing to “evolution” – nobody in that period claimed to be doing anything new. For more than a millennium and a half symmetry had a double face; it expressed proportionality in two distinct contexts, in the mathematical domain and in the aesthetic domain (principally architecture).

LEGENDRE claimed that if we were to consider the common plane of two symmetrical polyhedra as a mirror, then the result would be that one solid is the image of the other. But in the case of symmetrical solids neither one is an “image”, since both are “real”. We speak metaphorically when we say that one solid is a mirror image of the other, for there is no mirror and no image in a mirror. We mean that it is *as if* there were a mirror that produced an image, although we are talking about real objects. Symmetrical objects can be transformed from one into the other by a certain operation. In the case of symmetrical polyhedra, one polyhedron can be transformed into the other by a mirror reflection. The reason for this lies, of course, in the fact that the two symmetrical polyhedra have faces that are similar and equal but, as we have seen, they cannot be superposed by the very definition which LEGENDRE put in place: in fact, it is due to the inverse order of the plane angles that form the solid angles.

KANT’s problem was different from that of LEGENDRE. For KANT the issue was how to establish the directionality of space; it was an attempt to vindicate NEWTON’s absolutist position. KANT, in other words, was interested in the geometrical character of physical space. In contrast, LEGENDRE played the role of a geometer who, in this context, had no interest in physical applications, and so his treatment was the first instance in the history of pure geometry in which a mirror is used as an aid to clarify geometrical relations – in this case, the relation between similar and equal polyhedra.

LEGENDRE integrated symmetry into a discussion of geometry whereas KANT only alluded to geometrical arguments without proof. In particular, in his essay of 1768, KANT claimed that two spherical triangles can be exactly equal and similar, and yet cannot be made to coincide, but he did not offer a formal proof of the claim, or even a plausibility argument for it. By contrast, LEGENDRE systematically investigated the properties of spherical triangles and made use of his new definition of symmetry.

Another important difference between LEGENDRE and KANT is the fact that LEGENDRE did not distinguish between a “right” polyhedron and a “left” polyhedron when considering two symmetrical polyhedra. Unlike KANT, LEGENDRE was not interested in the directionality of physical space. Indeed, in his text on geometry LEGENDRE did not address the physics of space at all. KANT, by contrast, did not render the incongruent counterparts, which he designated “right” and “left”, as symmetrical, for the simple reason that symmetry for him stood for something else.

In sum, LEGENDRE and KANT invoked different terms and produced very different arguments, for they had different objectives in mind. But they both recognized the explanatory power of introducing a mirror to serve as an analogy in a scientific context. LEGENDRE made a discovery: a convex polyhedron has, in his newly minted term, a *symmetrical* polyhedron with congruent faces that is equal to it in volume and yet they cannot be super-

posed. He did not share with the reader his reasons for choosing the term *symmetry* as the name for this relation and, although we can speculate, it is unlikely that any explanation would inspire much confidence.

In the eighteenth century symmetry was invoked in a variety of contexts, but it always concerned a single object: a plant, an animal, a crystal, a ship, or the façade of a building. Only KANT and LEGENDRE talked about a relation of two objects, regardless of their disposition and orientation in space; and they both noted the inherent inverse order in the structure of the objects. KANT's concept of incongruent counterparts was ignored, whereas LEGENDRE's symmetry ushered in a new scientific concept.

The fact that LEGENDRE's contribution has not been recognized in books on symmetry in the sciences is a mark of the success of the revolution he initiated. LEGENDRE claimed to be doing something new and, indeed, he was right: in fact, he introduced a new concept and called it *symmetry*, and he applied it in a mathematical proof. The second stage of the development of the modern concept of symmetry thus took place in a very brief moment – in 1794. What is amazing is LEGENDRE's success to the degree that his role in this matter has been almost entirely forgotten. But his idea took root and became one of the principal concepts of modern science.

Clearly, 1794 is not the end of the story; rather, it is the beginning of a new story about symmetry that has continued up to the present day. There were gradual changes in the scientific concept of symmetry after LEGENDRE. Subsequently, it proliferated in large measure due to the profound insights provided by group theory, to such an extent that it now seems impossible to imagine the absence of this concept in Antiquity and early modern times. However, the *symmetry* we think of today, whether in mathematics, physics, or in the arts, has virtually nothing to do with Greek *summetria* or its Latin equivalent, *symmetria*, as it was understood in Antiquity and the early modern period.

Acknowledgment

We are grateful to Prof. Dr. Gereon WOLTERS for his support and encouragement.

References

- ALBERTI, L. B.: *De re aedificatoria*. Florence: Laurentius 1485. See LEONI (Tr.) [1726] 1955; LÜCKE 1975–1979; RYKWERT et al. (Trs.) 1988
- Anonymous* (Tr.): *An Abridgment of the Architecture of Vitruvius, Containing a System of the Whole Works of that Authors*. First done in French by Mons[ieur] PERRAULT. London: A. Sirall and T. Child 1692
- BARROW, I.: *Lectiones habitæ in scholis publicis Academiae Cantabrigiensi An. dom. MDCLXV*. London: Playford pro Georgio Wells 1684
- BECK, L. W. (Tr.): *Kant: Prolegomena*. Based on the Carus translation. Indianapolis: Bobbs-Merrill 1950
- BOETHIUS: *De institutione arithmetica*. See GUILLAUMIN (Ed. and Tr.) 1995
- BUCHENAU, A. (Ed.): *Kant: Vorkritische Schriften*. 2 Bde. Berlin: Bruno Cassirer 1912
- BURKE, E.: *A Philosophical Enquiry into the Sublime and Beautiful and other Pre-Revolutionary Writings [1757/1759]*. Ed. by D. WOMERSLEY. London: Penguin 1998
- CESARIANO, C. (Tr.): *Vitruvius: De architectura libri dece traducti de latino in vulgare, affigurati*. [A translation into Italian, with commentary, of *De architectura*.] Como: G. da Ponte 1521
- CORNFORD, F. M. (Tr.): *Plato's Theory of Knowledge*. New York: Liberal Arts Press 1957
- CORNFORD, F. M. (Tr.): *Plato: Timaeus*. New York: Macmillan [1959] 1987
- DIDEROT, D., et al.: *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. 17 Vols. Paris: Briasson 1751–1765. Vol. 15 (1765), entry *Symétrie*

- DIJKSTERHUIS, E. J.: Archimedes. Translated by C. DIKSHOORN. Princeton: Princeton University Press [1956] 1987
- EUCLID: Elements. See HEATH (Tr.) [1926] 1956
- FEINGOLD, M. (Ed.): Before Newton: The Life and Times of Isaac Barrow. Cambridge: Cambridge University Press 1990
- FRITZ, H.-J.: Vitruv: Architekturtheorie und Machtpolitik in der römischen Antike. Münster: Lit 1995
- GALEN: De temperamentis libri III. See KÜHN (Ed.) 1821–1833, Vol. 1, pp. 509–694
- GARCÍA DONCEL, M., et al. (Eds.): Symmetries in physics (1600–1980). First International Meeting on the History of Scientific Ideas, Sant Feliu de Guíxols, Catalonia, Spain, September 20–26, 1983. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona 1987
- GRANGER, F. (Ed. and Tr.): Vitruvius: On Architecture. 2 Vols. Cambridge, MA: Harvard University Press [1931] 1962
- GRANT, E. (Ed. and Tr.): Nicole Oresme and the Kinematics of Circular Motion: Tractatus de commensurabilitate vel incommensurabilitate motuum celi. Edited with an Introduction, English translation, and Commentary. Madison: University of Wisconsin Press 1971
- GRAYSON, C. (Ed. and Tr.): Leon Battista Alberti: On Painting and On Sculpture. London: Phaidon 1972
- GUILLAUMIN, J.-Y. (Ed. and Tr.): Boèce: Institution arithmétique. Paris: Les Belles Lettres 1995
- HATFIELD, G. (Ed. and Tr.): Kant: Prolegomena to any Future Metaphysics that will be able to come Forward as Science. New York, Cambridge: Cambridge University Press [1997] 2004
- HEATH, T. L. (Tr.): The Thirteen Books of Euclid's Elements. 3 Vols. New York: Dover [1926] 1956
- HON, G., and GOLDSTEIN, B. R.: From *Summetria* to Symmetry: The Making of a Revolutionary Scientific Concept. Dordrecht: Springer 2008
- KANT, I.: Von dem ersten Grunde des Unterschiedes der Gegenden im Raume [1768]. In: BUCHENAU, A. (Ed.): Kant: Vorkritische Schriften. Bd. 2, S. 393–400. Berlin: Bruno Cassirer 1912. See WALFORD and MEERBOTE (Eds. and Trs.) 1992
- KANT, I.: Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können [1783]. Ed. by K. VORLÄNDER. 6th Ed. Leipzig: Felix Meiner 1920. See BECK (Tr.) 1950, HATFIELD (Ed. and Tr.) [1997] 2004
- KIRBY, J. (Tr.): Isaac Barrow: The Usefulness of Mathematical Learning Explained and Demonstrated: Being Mathematical Lectures Read in the Publick Schools at the University of Cambridge. London: Stephen Austen 1734. See BARROW 1684
- KÜHN, K. G. (Ed.): Claudii Galeni Opera omnia. 20 Bde. Leipzig: Knobloch 1821–1833
- LEGENRE, A.-M.: Éléments de géométrie, avec des notes. Paris: Didot 1794
- LEONI, J. (Tr.): Ten Books on Architecture by Leone Battista Alberti [1726]. 1955. See RYKWERT (Ed.) 1955
- LEWIS, C. T., and SHORT, C.: A Latin Dictionary. Oxford: Clarendon Press [1879] 1951
- LIDDELL, H. G., SCOTT, R., and JONES, H. S.: A Greek-English Lexicon. With the assistance of R. MCKENZIE. Oxford: Clarendon Press [1940] 1996
- LÜCKE, H.-K.: Alberti index: Leon Battista Alberti. De re aedificatoria. Florenz 1485: Index verborum. 4 Vols. Munich: Prestel 1975–1979
- MAHONEY, M. S.: Barrow's Mathematics: Between Ancients and Moderns. In: FEINGOLD, M. (Ed.): Before Newton: The Life and Times of Isaac Barrow; pp. 179–249. Cambridge: Cambridge University Press 1990
- MENUT, A. D., and DENOMY, A. J. (Ed. and Tr.): Nicole Oresme: Le Livre du ciel et du monde. Ed. by A. D. MENUT and A. J. DENOMY. Translated with an introduction by A. D. MENUT. Madison, Milwaukee, London: University of Wisconsin Press 1968
- MUGLER, C. (Ed. and Tr.): Archimède: Des spirales, De l'équilibre des figures planes, L'arènaire, et La quadrature de la parabole. Paris: Les Belles Lettres 1971
- ORESME, N.: Le livre du ciel et du monde. See MENUT and DENOMY (Ed. and Tr.) 1968
- PERRAULT, C.: Abregé des dix livres d'architecture de Vitruve. Paris: Coignard 1674. See *Anonymous* (Tr.) 1692
- PLATO: Theaetetus. See CORNFORD (Tr.) 1957
- PLATO: Timaeus. See CORNFORD (Tr.) [1959] 1987
- POLLITT, J. J.: The Art of Greece 1400–31 BC: Sources and Documents. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1965
- RICHTER, J. P. (Ed.): The Notebooks of Leonardo da Vinci. Vol. 1. New York: Dover [1883] 1970
- ROCHE, J. J.: A critical study of symmetry in physics from Galileo to Newton. In: GARCÍA DONCEL, M., et al. (Eds.): Symmetries in Physics (1600–1980). First International Meeting on the History of Scientific Ideas, Sant Feliu de Guíxols, Catalonia, Spain, September 20–26, 1983; pp. 1–28. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona 1987

- ROWLAND, I. D., HOWE, T. N., and DEWAR, M. J. (Trs.): Vitruvius's Ten Books on Architecture. Cambridge: Cambridge University Press 1999
- RYKWERT, J. (Ed.): Ten Books on Architecture by Leone Battista Alberti. [Translation into English by J. LEONI in 1726 from the Italian translation by C. BARTOLI, published in Florence in 1550]. London: Alec Tiranti 1955.
- RYKWERT, J., LEACH, N., and TAVERNOR, R. (Trs.): Leon Battista Alberti: On the Art of Building in Ten Books. Cambridge, MA, and London: MIT Press 1988
- SAMBURSKY, S.: The Physical World of Late Antiquity. London: Routledge & Kegan Paul 1962
- THOMAS, T.: Dictionarium linguae latinae et anglicanae. Cambridge, London: R. Boyle 1587
- VITRUVIUS: De architectura. See GRANGER (Ed. and Tr.) [1931] 1962, ROWLAND et al. (Trs.) 1999
- WALFORD, D., and MEERBOTE, R. (Eds. and Trs.): Kant: Concerning the ultimate ground of the differentiation of directions in space. In: WALFORD, D., and MEERBOTE, R. (Eds. and Trs.): Immanuel Kant: Theoretical Philosophy 1755–1770; pp. 363–372. New York: Cambridge University Press 1992
- WEYL, H.: Symmetry. Princeton: Princeton University Press 1952

Prof. Giora HON
Department of Philosophy
University of Haifa
Haifa 31905
Israel
Tel.: +972 4 8240903
Fax.: +972 4 8249735
E-Mail: hon@research.haifa.ac.il

Prof. Bernard R. GOLDSTEIN
University of Pittsburgh
The Dietrich School of Arts and Sciences
Department of History and Philosophy of Science
RS/2604 CL
Pittsburgh, PA 15260
USA
Tel.: +1 412 6245990
E-Mail: brg@pitt.edu

Symmetrien in der Physik

Harald FRITZSCH (München)



Zusammenfassung

Eine Symmetrie ist die Eigenschaft eines Systems, sich bei Transformationen nicht zu ändern. Es gibt diskrete Symmetrien mit einer endlichen Zahl von Symmetrieeoperationen, etwa die Symmetrie der Spiegelungen des Raumes, und kontinuierliche Symmetrien mit unendlich vielen Symmetrieeoperationen, z. B. die Drehungen des Raumes.

Die Gesetze der klassischen Mechanik sind symmetrisch bei Translationen des Raumes und der Zeit, bei Drehungen und bei Spiegelungen des Raumes. Die Translationen des Raumes führen zur Erhaltung der Impulse, Translationen der Zeit zur Erhaltung der Energie und Drehungen des Raumes zur Erhaltung des Drehimpulses. Werner HEISENBERG führte 1932 die erste innere Symmetrie ein, den Isospin – eine Symmetrie der Kernkräfte und der starken Wechselwirkung. In den Jahren seit 1950 entdeckte man in der kosmischen Strahlung neue instabile Teilchen, die Hyperonen und die K-Mesonen. 1961 gelang es Murray GELL-MANN, die Nukleonen und die neuen Teilchen durch eine stark gebrochene Symmetrie zu beschreiben, die SU(3)-Symmetrie. Er interpretierte die Baryonen, etwa die Protonen, als Bindungszustände von drei Konstituenten, den Quarks.

Hermann WEYL entdeckte 1929, dass die Elektrodynamik eine kontinuierliche Symmetrie besitzt, die er als Eichsymmetrie bezeichnete. Die Elektrodynamik ist eine Eichtheorie, das masselose Photon ist ein Eichboson. Die Eichgruppe ist die Gruppe der Phasentransformationen des Elektronfeldes.

FRITZSCH und GELL-MANN führten 1971 eine neue Quantenzahl für die Quarks ein, die sie als „Farbe“ bezeichneten – die entsprechende Symmetrie wird durch die Gruppe SU(3) beschrieben. Sie interpretierten die Farbgruppe als Eichgruppe einer neuen Theorie, der „Quantenchromodynamik“. Diese beschreibt die starke Wechselwirkung und die Kernkräfte. Die Wechselwirkung wird durch Eichbosonen vermittelt, den acht masselosen Gluonen. Die Quarks und die Gluonen sind permanent in den Baryonen gebunden, existieren also nicht als freie Teilchen.

Heute beschreibt man die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung durch eine Eichtheorie mit vier Eichbosonen, dem masselosen Photon, zwei massiven geladenen W-Bosonen und einem massiven neutralen Z-Boson. Die Massen dieser drei Eichbosonen werden durch eine spontane Symmetriebrechung erzeugt.

Abstract

A symmetry is the property of a system, not to change under a certain transformation. There are discrete symmetries with a finite number of symmetry operations, e. g. the symmetry of reflections of space, and continuous symmetries with an infinite number of symmetry operations, e. g. the rotations of space.

The laws of classical mechanics are symmetric under translations of space and time, under rotations and reflections of space. The translations in space lead to the conservation of the momentum, the translations in time to the conservation of energy and the rotations of space to the conservation of the angular momentum.

Werner HEISENBERG introduced in 1932 the first internal symmetry, the isospin – a symmetry of the nuclear forces and of the strong interactions. As of 1950 new unstable particles were discovered in the cosmic rays, the hyperons and the K-mesons. In 1961 Murray GELL-MANN described the nucleons and the new particles by a broken symmetry, the SU(3)-symmetry. He interpreted the baryons, e. g. the protons, as bound states of three constituents, the quarks.

Hermann WEYL discovered in 1929, that the electrodynamics has a continuous symmetry, which he called the gauge symmetry. The electrodynamics is a gauge theory – the photon is a gauge boson. The gauge group is the group of phase transformations of the electron field.

FRITZSCH and GELL-MANN introduced in 1971 a new quantum number for the quarks, which they called “color” – the associated symmetry is described by the group SU(3). They interpreted the color group as the gauge group of a new theory, the “quantum chromodynamics”. This theory describes the strong interactions and the nuclear forces. The interaction is generated by gauge bosons, the eight mass-less gluons. The quarks and gluons are permanently confined inside the baryons – they do not exist as free particles.

Today the weak and the electromagnetic interactions are described by a gauge theory with four gauge bosons, the mass-less photon, two massive charged W-bosons and a massive neutral Z-boson. The masses of these three gauge bosons are generated by a spontaneous symmetry breaking.

1. Einführung

Eine Symmetrie liegt vor, wenn sich ein System bei Transformationen nicht ändert. Es gibt diskrete Symmetrien mit einer endlichen Zahl von Symmetrieoperationen, etwa die Symmetrie bei Spiegelungen des Raumes. Solche Symmetrien sind wichtig in vielen Bereichen, etwa in der Architektur. Eine Kirche oder ein Schloss sind oft spiegelsymmetrisch gebaut (Abb. 1). Auch in der Physik, Chemie und Biologie spielen sie eine große Rolle. Zum Beispiel ist ein Schmetterling symmetrisch bezüglich Spiegelungen.

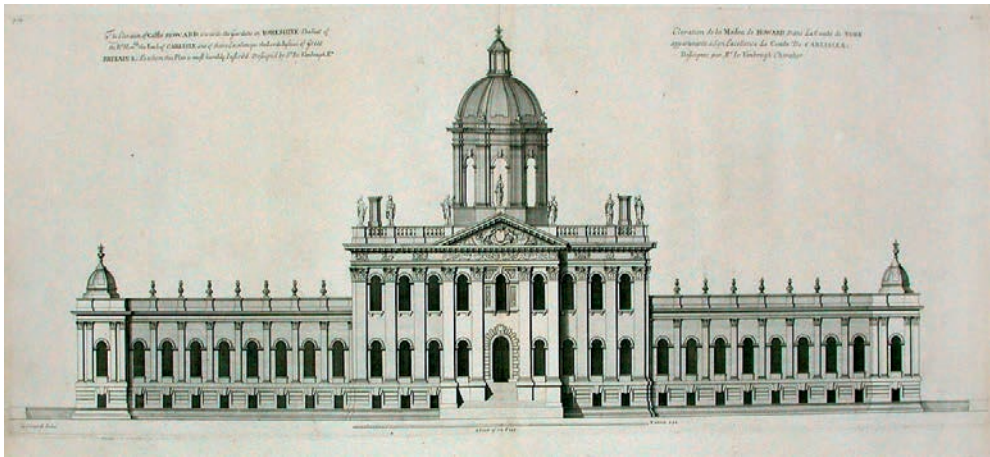


Abb. 1 Die Symmetrie eines Schlosses bezüglich Spiegelung

Kontinuierliche Symmetrien haben unendlich viele Symmetrieoperationen, z. B. die Translationen oder die Drehungen des Raumes. Die Gesetze der klassischen Mechanik sind symmetrisch bei Translationen des Raumes und der Zeit, bei Drehungen und bei Spiegelungen des Raumes. Die Symmetrien der Translationen des Raumes und der Zeit führen zur Erhaltung des Impulses und der Energie, die Symmetrie bezüglich Drehungen des Raumes zur Erhaltung des Drehimpulses. Die Transformationen des Raumes und der Zeit nennt man Galilei-Transformationen. In der Relativitätstheorie werden der dreidimensionale Raum und die Zeit zur vierdimensionalen Raum-Zeit vereinigt. Die Geschwindigkeit des Lichtes, etwa 300 000 km/s, ist die maximale Geschwindigkeit im Universum. Die Transformationen der Raum-Zeit nennt man Lorentz-Transformationen.

In der Relativitätstheorie sind Zeitdifferenzen abhängig vom Beobachter. Als Beispiel betrachten wir das Zwillingsparadoxon. Ein Beobachter bleibt auf der Erde, sein Zwillingsbruder bewegt sich mit großer Geschwindigkeit von der Erde weg und kommt nach 10 Jahren zurück. Der Beobachter auf der Erde ist jetzt älter als sein Zwillingsbruder. – Die Zeitdifferenz hängt ab von der relativen Geschwindigkeit. Sie ist groß, wenn die relative Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit ist. Eine andere Folge der Relativitätstheorie ist die Äquivalenz von Energie und Masse, gegeben durch EINSTEINS Formel:

$$E = mc^2. \quad [1]$$

Diese Äquivalenz von Energie und Masse spielt eine große Rolle im Urknall, bei dem die heute im Universum vorhandene Materie durch Energie erzeugt wurde. Bei der Explosion einer Wasserstoffbombe (Abb. 2) werden nur einige Kilogramm Materie in Energie umgewandelt.



Abb. 2 Explosion einer Wasserstoffbombe

2. Innere Symmetrien: Isospin und SU(3)

1932 wurde das Neutron entdeckt. Die Masse des Neutrons ist etwa so groß wie die Masse des Protons. – Atomkerne bestehen aus Neutronen und Protonen. Kurz nach der Entdeckung des Neutrons führte Werner HEISENBERG die erste innere Symmetrie ein, den Isospin – eine Symmetrie der Kernkräfte und der starken Wechselwirkung.

Die beiden Nukleonen, das Neutron und das Proton, bilden ein Isospin-Duplett. Bezüglich der Kernkraft und der starken Wechselwirkung sind Neutron und Proton identisch. Die Isospin-Symmetrie ist insbesondere wichtig für die Kernphysik.

Ab 1950 entdeckte man in der kosmischen Strahlung acht neue instabile Teilchen, das Lambda-Hyperon, die drei Sigma-Hyperonen, die zwei Chi-Hyperonen als auch die zwei K-Mesonen. Das Lambda-Hyperon ist ein Isospin-Singulett, die drei Sigma-Hyperonen

bilden ein Triplett, die zwei Chi-Hyperonen ein Duplett. Die beiden K-Mesonen sind ebenfalls ein Duplett.

In Berkeley fand man in der Streuung von Pionen und Nukleonen die vier Delta-Resonanzen – das sind angeregte Nukleonen mit einer Masse von etwa 1230 MeV. Sie bilden ein Isospin-Quadruplett. Später fand man auch die drei Anregungen der Sigma-Hyperonen und die zwei Anregungen der Chi-Hyperonen.

Die Isospin-Symmetrie ist keine exakte Symmetrie, da sie durch die elektromagnetische Wechselwirkung gebrochen wird. Die Symmetriebrechung ist relativ klein, von der Größenordnung 1 %.

1961 gelang es Murray GELL-MANN vom *California Institute of Technology* in Pasadena, die Nukleonen und die Hyperonen durch die neue SU(3)-Symmetrie zu beschreiben. Die zwei Nukleonen und die sechs Hyperonen bilden eine Oktett-Darstellung der SU(3)-Gruppe. Auch die drei Pionen, die zwei K-Mesonen und deren Antiteilchen und das neu entdeckte Sigma-Meson bilden ein Oktett.

Im Gegensatz zum Isospin ist die SU(3)-Symmetrie eine stark gebrochene Symmetrie. Wäre die Symmetrie exakt, müssten das Lambda-Hyperon und das Nukleon dieselbe Masse haben. Die Masse des Lambda-Hyperon ist jedoch 1116 MeV, die Masse des Nukleons ist 940 MeV – die Symmetriebrechung ist also etwa 20%. Wie diese Brechung der Symmetrie erzeugt wird, war zunächst nicht bekannt.

Ein Problem der SU(3)-Symmetrie waren die Delta-Resonanzen und die fünf Hyperon-Resonanzen. Diese neun Teilchen bilden keine Darstellung der SU(3)-Symmetrie. Es gibt jedoch eine Dekuplett-Darstellung, bestehend aus zehn Teilchen. GELL-MANN nahm an, dass es ein zehntes, negativ geladenes Teilchen geben sollte, das er als Omega bezeichnete.

1964 entdeckte man das Omega-Teilchen am *Brookhaven National Laboratory*. Die vier Delta-Resonanzen, die fünf Hyperon-Resonanzen und das Omega-Teilchen bilden eine Dekuplett-Darstellung.

3. Quarks

Die einfachste Darstellung der SU(3)-Symmetrie ist die Triplett-Darstellung. Jedoch ist diese Darstellung in der Natur nicht realisiert, ebenso nicht die Sextett-Darstellung – die einfachsten Baryonen werden durch eine Oktett-Darstellung beschrieben.

GELL-MANN und sein Doktorand George ZWEIG schlugen 1964 vor, dass die Baryonen Bindungszustände von Teilchen sind, die ein Triplett bezüglich SU(3) sind. GELL-MANN bezeichnete sie als „Quarks“. Diesen Namen entnahm GELL-MANN dem Buch von James JOYCE *Finnegans Wake*. Dort steht auf der Seite 383 der Satz: „Three Quarks for Muster Mark.“

GELL-MANN bezeichnete die drei Quarks als das „up“-Quark (u), das „down“-Quark (d) und das „seltsame“ Quark (s). Das u-Quark hat die elektrische Ladung (2/3), das d-Quark und das s-Quark haben die Ladung (−1/3).

Im Quarkmodell kann man die SU(3)-Symmetrie leicht verstehen – eine SU(3)-Transformation ist eine Transformation der drei Quarks.

Die Nukleonen bestehen aus u-Quarks und d-Quarks, die Hyperonen enthalten ein oder zwei s-Quarks – zur Substruktur der Baryonen siehe Abbildungen 3 und 4.

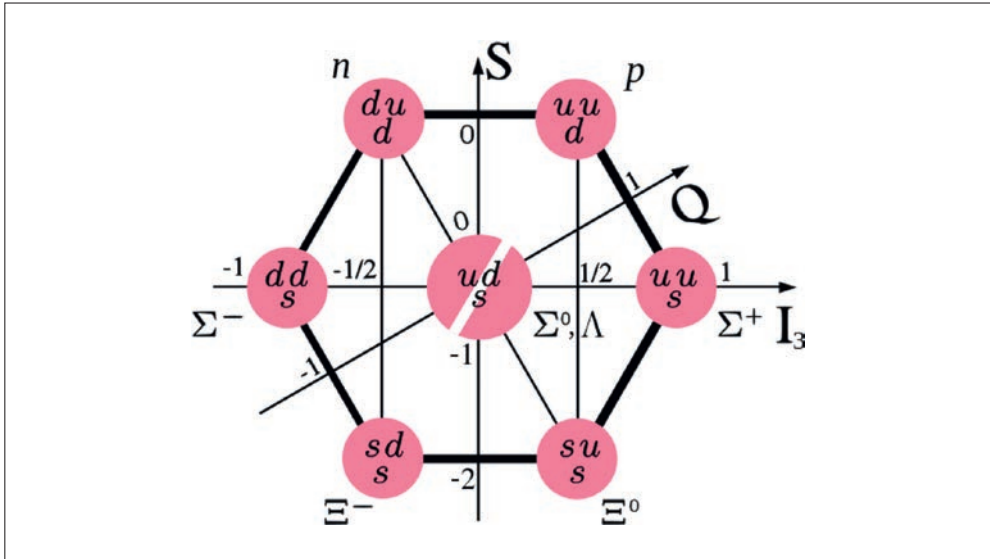


Abb. 3 Das Oktett der Baryonen und ihre Substruktur

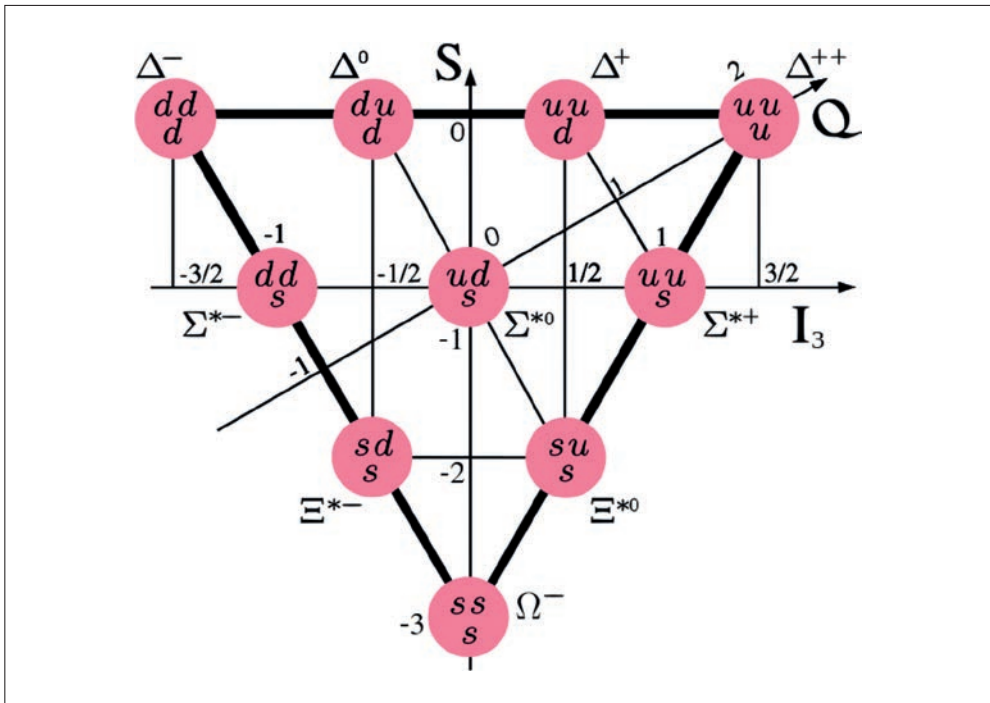


Abb. 4 Das Dekuplett der angeregten Baryonen

Die Deltaresonanzen sind wie das Proton und das Neutron Bindungszustände aus u-Quarks und d-Quarks. Jedoch sind die Spins bei den Quarks in den Deltaresonanzen parallel, so dass diese Teilchen den Drehimpuls ($3/2$) besitzen. Das Omega-Teilchen besteht aus drei s-Quarks. Auch hier sind die Spins der Quarks parallel.

Im Quarkmodell ist es möglich, die Brechung der SU(3)-Symmetrie zu verstehen. Obwohl die Quarks keine freien Teilchen sind, kann man ihnen eine Masse zuordnen. Wenn die Massen der drei Quarks identisch sind, ist die SU(3)-Symmetrie exakt. Sie ist verletzt, wenn die Massen der drei Quarks verschieden sind.

Man beobachtet, dass die SU(3)-Symmetrie zu etwa 20% verletzt ist. Das ist der Fall, wenn die Masse des s-Quarks etwa 120 MeV größer ist als die Massen von (u) und (d). Deren Masse ist relativ klein, etwa 5 MeV. Im Quarkmodell kann man also die relativ große Brechung der SU(3)-Symmetrie verstehen.

Erste Hinweise auf die Quarks erhielt man 1968 in den Experimenten am *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC). Dort studierte man Kollisionen von Elektronen und Atomkernen. Man entdeckte, dass die Elektronen im Inneren der Atomkerne durch punktförmige Objekte abgelenkt werden. Richard FEYNMAN bezeichnete sie als „Partonen“. Später stellte es sich heraus, dass es sich dabei um die Quarks handelte.

Wenn die Nukleonen nur aus Quarks bestehen, würde man erwarten, dass die Summe der Impulse der Quarks gleich dem Impuls des Nukleons ist. Mit Hilfe der SLAC-Experimente konnte man die Impulse der Quarks messen. Dabei fand man, dass die Summe der Impulse der Quarks nur etwa 45% des Impulses des Nukleons ergibt. Es muss also neben den Quarks noch etwas anderes geben, das die restlichen 55% des Impulses liefert.

1974 wurde sowohl am *Brookhaven National Laboratory* als auch am *Stanford Linear Accelerator Center* ein neues Meson mit seltsamen Eigenschaften entdeckt. Dieses Teilchen „J/psi“ hat eine Masse von 3,1 GeV und zerfällt relativ langsam. Bald stellte sich heraus, dass dieses Meson der Bindungszustand eines neuen Quarks und seines Antiquarks ist, dem „charm“-Quark mit der elektrischen Ladung ($2/3$). Die Masse des c-Quarks ist etwa 1,2 GeV.

Die Teilchen, die aus den vier Quarks u, d, s und c bestehen, kann man durch die Symmetrie SU(4) beschreiben. Jedoch ist die Brechung dieser Symmetrie sehr groß, da die Masse des c-Quarks viel größer als die Masse des s-Quarks ist.

1977 entdeckte man am *Fermi National Laboratory* bei Chicago ein schweres Meson „Upsilon“ (Y), das sich als ein Bindungszustand eines fünften Quarks erwies, des „bottom“-Quarks. Es hat eine Masse von etwa 4,3 GeV und die elektrische Ladung ($-1/3$).

Nach der Entdeckung des b-Quarks vermutete man, dass es ein sechstes Quark mit der Ladung ($2/3$) geben sollte, das man als „top“-Quark bezeichnete. Es wurde 1995 am *Fermi National Laboratory* entdeckt. Das t-Quark besitzt eine riesige Masse, vergleichbar mit der Masse eines Goldatoms – etwa 173 GeV. Es zerfällt sehr schnell, so dass sich keine Mesonen oder Baryonen bilden können, die aus einem t-Quark und anderen Quarks bestehen.

Bis heute ist unklar, warum es sechs Quarks im Universum gibt – die stabile Materie besteht nur aus u-Quarks und d-Quarks. Die vier weiteren Quarks sind instabil und zerfallen durch die schwache Wechselwirkung.

4. Elektrodynamik und Chromodynamik

Die Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung wurde 1864 von James Clerk MAXWELL vorgeschlagen. Es stellte sich heraus, dass MAXWELLS Theorie die elektromagnetischen Kräfte zwischen den geladenen Teilchen erfolgreich beschreibt. In der Quantentheorie werden diese Kräfte durch den Austausch eines neutralen Teilchens erzeugt, dem Teilchen des Lichtes, des Photons.

In der Quantentheorie beschreibt man die Elektronen durch ein komplexes Feld. Wenn man dieses Feld mit einem konstanten Phasenparameter multipliziert, ändert sich nichts. Der Mathematiker Hermann WEYL entdeckte 1929, dass die Elektrodynamik eine weitere kontinuierliche Symmetrie besitzt, die er als Eichsymmetrie bezeichnete.

Die Felder der geladenen Teilchen werden mit einem Phasenparameter multipliziert, der von Raum und Zeit abhängt. Gleichzeitig wird das Photonfeld geändert – das Potenzial dieses Feldes erhält einen neuen Term, gegeben durch die Ableitung des Phasenparameters nach Raum und Zeit. Man nennt eine solche Transformation eine Eichtransformation. Theorien, die eine solche Symmetrie besitzen, nennt man Eichtheorien.

Die Elektrodynamik ist eine Eichtheorie, das masselose Photon ist ein Eichboson. Die Eichgruppe ist die Gruppe der lokalen Phasentransformationen des Elektronfeldes.

Die Stärke der Wechselwirkung des Photons mit dem Elektron wird durch die Kopplungskonstante e beschrieben. Die Feinstrukturkonstante ist proportional zu e^2 und muss durch Experimente bestimmt werden. Sie ist etwa so groß wie das Inverse der Primzahl 137:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \approx \frac{1}{137} \quad [2]$$

FRITZSCH und GELL-MANN führten 1971 eine neue Quantenzahl für die Quarks ein, die sie als „Farbe“ bezeichneten – die entsprechende Symmetrie wird durch die Farbgruppe SU(3) beschrieben – diese Symmetrie ist eine exakte Symmetrie. FRITZSCH und GELL-MANN interpretierten die Farbgruppe als Eichgruppe einer neuen Eichtheorie, der „Quantenchromodynamik“ – die drei Farbladungen sind analog zur elektrischen Ladung in der Quantenelektrodynamik.

Die Quantenchromodynamik beschreibt die starke Wechselwirkung und die Kernkräfte. Die Wechselwirkung wird durch acht Eichbosonen vermittelt, den masselosen Gluonen. Die Quarks sind also analog zum Elektron in der Elektrodynamik, die Gluonen sind analog zum Photon. Der Impuls eines schnell bewegten Protons wird zu etwa 55% von den Gluonen geliefert.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Quantenelektrodynamik und der Quantenchromodynamik ist die Tatsache, dass in der Elektrodynamik die Photonen nur mit den Elektronen in Wechselwirkung stehen, während in der Chromodynamik die Gluonen nicht nur mit den Quarks wechselwirken, sondern auch mit den Gluonen.

In der Eichtheorie der Quantenchromodynamik gibt es eine enge Beziehung zwischen der inneren Symmetrie der Farben der Quarks und der Raum-Zeit-Geometrie. Die Transformationen der Farben hängen von Raum und Zeit ab. Dadurch wird die Wechselwirkung mit den Gluonen erzeugt. Es gibt also eine Kopplung zwischen der Raum-Zeit und der Farbsymmetrie. Ohne diese Kopplung gäbe es keine Wechselwirkung zwischen den Quarks, und das Proton würde nicht existieren.

Die Stärke der Wechselwirkung der Quarks und der Gluonen wird durch eine Kopplungskonstante g beschrieben, analog zur Kopplungskonstanten e in der Elektrodynamik. Diese Zahl ist nicht konstant, sondern abhängig von der Energie, die durch die Wechselwirkung übertragen wird. Bei wachsender Energie wird sie kleiner – diese Eigenschaft bezeichnet man als „asymptotische Freiheit“. Sie ist die Folge der Wechselwirkung der Gluonen mit sich selbst. Experimentell findet man bei einer Energie von 91 GeV, die der Masse des Z-Bosons entspricht:

$$\frac{g^2}{4\pi} = \alpha_s(M_Z) \approx 0.12 \quad [3]$$

Sowohl in der Elektrodynamik als auch in der Chromodynamik gibt es Bindungszustände. Zum Beispiel verbinden sich ein Elektron und ein Positron zu einem neutralen Zustand, dem Positronium. Das Analogon in der Chromodynamik ist ein Meson, ein Bindungszustand von einem Quark und einem Antiquark. Die Kraft zwischen dem Quark und dem Antiquark wird durch den Austausch der Gluonen erzeugt.

Die Bindung der drei Quarks im Proton (Abb. 5) wird ebenfalls durch den Austausch der Gluonen verursacht. Alle drei Quarks haben verschiedene Farben, etwa (rot – grün – blau). Die Kombination (rot – rot – blau) ist nicht erlaubt – die drei Quarks müssen ein Farbsingulett bilden. Nur dann erhält man ein Hadron.

Da es drei Farben gibt, ist es nicht möglich, dass zwei Quarks einen Bindungszustand bilden – zwei farbige Quarks können kein Farbsingulett bilden, sondern nur ein Farb-Sextett oder ein Farb-Triplett.

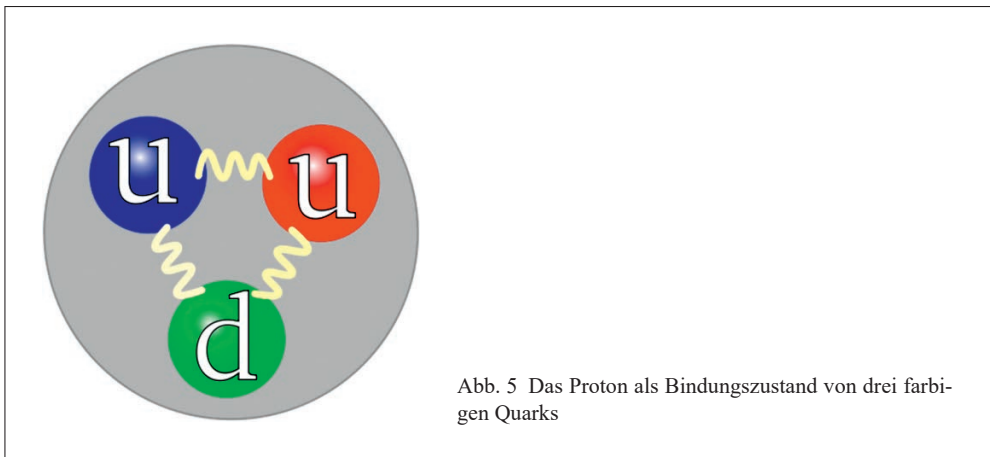


Abb. 5 Das Proton als Bindungszustand von drei farbigen Quarks

Positronium kann man leicht aufspalten in ein Elektron und ein Positron, jedoch ist es unmöglich, ein Meson in ein Quark und ein Antiquark aufzuspalten. Die Anziehung des Elektrons und des Positrons in der Elektrodynamik ist fixiert durch das Coulombsche Kraftgesetz. Bei wachsendem Abstand nimmt die Kraft ab.

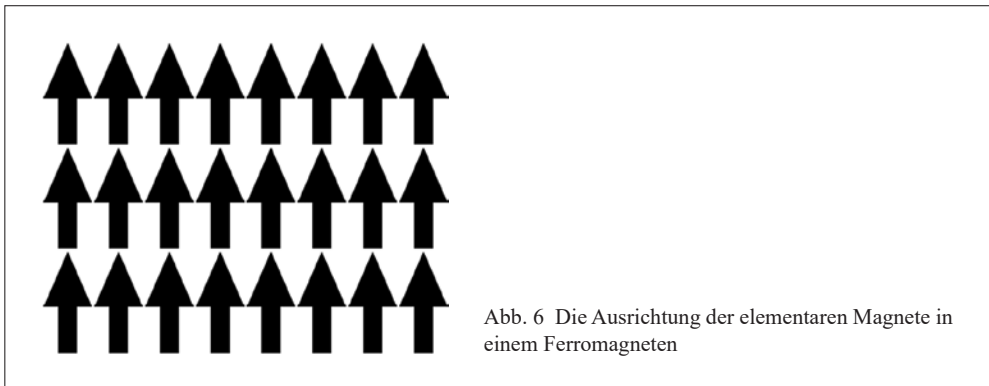
In der Chromodynamik ist dies nicht der Fall. Hier bleibt die Kraft auch bei großen Abständen konstant. Mit Hilfe von Computern kann man die Kraft berechnen. Da die Gluonen mit sich selbst wechselwirken, ziehen sich die gluonischen Feldlinien gegenseitig

an, wenn man ein Quark und ein Antiquark voneinander entfernt. Die gluonischen Feldlinien werden bei großen Abständen parallel – die Anziehungskraft zwischen dem Quark und dem Antiquark wird konstant. Die Quarks sind also permanent gebunden im Inneren der Hadronen.

5. Spontane Symmetriebrechung

Es gibt exakte Symmetrien, etwa die Farbsymmetrie in der Quantenchromodynamik, und gebrochene Symmetrien, etwa die $SU(3)$ -Symmetrie der Baryonen und Mesonen. Diese Symmetrie ist gebrochen durch die verschiedenen Massen der Quarks.

Interessant ist eine andere Symmetriebrechung, die man als „spontane Symmetriebrechung“ bezeichnet. Als Beispiel betrachten wir einen Ferromagneten. Die Atome von Eisen besitzen ein magnetisches Moment – sie verhalten sich wie elementare Magnete. Wenn man das Eisen abkühlt, richten sich die Magnete aus, so dass ein äußeres Magnetfeld aufgebaut wird. Die Ausrichtung der Magnete ist zufällig – man kann sie nicht vorher berechnen. Jedoch ist eine Richtung jetzt ausgezeichnet (Abb. 6) – die Drehsymmetrie des Raumes ist spontan gebrochen.



Die spontane Symmetriebrechung wurde zum ersten Mal 1964 in der relativistischen Quantenfeldtheorie studiert von Robert BROUT, Francois ENGLERT und Peter HIGGS. Sie studierten die Feldtheorie eines complexen massiven skalaren Feldes, das mit sich selbst in Wechselwirkung steht. Das Potenzial des Feldes sieht aus wie ein mexikanischer Hut (Abb. 7) – es ist symmetrisch bezüglich Drehungen um die vertikale Achse. Das Minimum des Potenzials ist ein Kreis um den Nullpunkt.

Diese Symmetrie bleibt auch erhalten, wenn eine kleine Kugel sich in der Mitte des Potenzials befindet. Bei einer Störung wird diese Kugel nach unten fallen. Dann ist die Richtung vom Nullpunkt zur Kugel ausgezeichnet – analog zur Richtung der Elementarmagnete bei einem Ferromagneten. Die Symmetrie der Drehungen um die vertikale Achse ist also verletzt.

In der Feldtheorie beschreibt die Position der Kugel das „Vakuum“. Da das Minimum des Potenzials ein Kreis ist, gibt es unendlich viele verschiedene Vakua. Wir betrachten ein

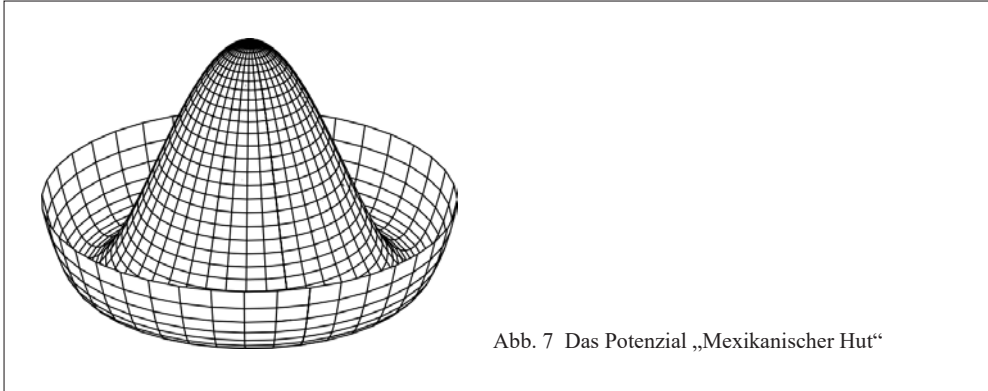


Abb. 7 Das Potenzial „Mexikanischer Hut“

solches Vakuum. Das skalare Feld beschreibt jetzt zwei verschiedene Teilchen – eines mit einer Masse, gegeben durch den Massenterm, und ein masseloses Teilchen. Das massive Teilchen entspricht den Anregungen vertikal zum Kreis des Minimums des Potentials, das masselose Teilchen entspricht den Anregungen in Richtung der Tangente des Kreises.

Die Masse eines Eichbosons kann man mit Hilfe der spontanen Symmetriebrechung erzeugen, wenn das skalare Feld mit einem Eichboson in Wechselwirkung steht. Die Masse des Eichbosons ist Null, wenn der Vakuumerwartungswert des skalaren Feldes verschwindet. Die spontane Symmetriebrechung erzeugt einen von Null verschiedenen Vakuumerwartungswert v – das Eichboson erhält eine Masse.

Ein masseloses Eichboson besitzt zwei Richtungen für die Polarisation – es ist in die Richtung des Impulses des Teilchens polarisiert oder entgegengesetzt zur Richtung des Impulses. Ein massives Eichboson hat eine weitere Polarisationsmöglichkeit – es kann auch transversal polarisiert sein.

Ein masseloses Eichboson hat also zwei Freiheitsgrade, ein massives Eichboson besitzt drei Freiheitsgrade. Die spontane Symmetriebrechung erzeugt einen weiteren Freiheitsgrad für das massive Eichboson – dieser wird geliefert durch das komplexe skalare Feld. Letzteres besitzt zwei Freiheitsgrade. Ein Freiheitsgrad wird benötigt für die transversale Polarisation des massiven Eichbosons. Der verbleibende Freiheitsgrad beschreibt ein skalares Teilchen, dessen Masse von der Stärke der Selbstwechselwirkung des skalaren Feldes und vom Vakuumerwartungswert abhängt.

Wenn keine spontane Symmetriebrechung stattfindet, gibt es also ein masseloses Eichboson (zwei Polarisationen) und zwei massive skalare Bosonen. Liegt eine spontane Symmetriebrechung vor, gibt es ein massives Eichboson (drei Polarisationen) und ein massives skalares Boson.

6. Elektroschwache Wechselwirkungen

Symmetrien sind auch wichtig bei der Beschreibung der schwachen Wechselwirkungen. Wichtig ist hier eine Symmetrie analog zum Isospin, genannt der schwache Isospin. Das Elektron und sein Neutrino bilden ein Duplett des schwachen Isospins, ebenso das

u-Quark und das d-Quark. Diese vier Teilchen fasst man zusammen zur ersten Lepton-Quark-Familie:

$$\begin{pmatrix} \nu_e & u \\ e^- & d \end{pmatrix} \quad [4]$$

Neben dem Elektron hat man in den Experimenten vier weitere Leptonen entdeckt, das Myon und sein Neutrino sowie das Tau-Lepton und sein Neutrino. Analog bilden das Myon, sein Neutrino, das c-Quark und das s-Quark die zweite Lepton-Quark-Familie:

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu & c \\ \mu^- & s \end{pmatrix} \quad [5]$$

Die dritte Familie setzt sich zusammen aus dem Tau-Lepton, seinem Neutrino, dem t-Quark und dem b-Quark:

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau & t \\ \tau^- & b \end{pmatrix} \quad [6]$$

Das Myon und sein Neutrino als auch das Tauon und sein Neutrino bilden Dupletts des schwachen Isospins, ebenso die Quarks (c, s) und (t, b).

Betrachten wir als Beispiel für die schwache Wechselwirkung den Beta-Zerfall des Neutrons. Es zerfällt in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. An der schwachen Wechselwirkung nehmen also vier Fermionen teil.

Früher nahm man an, dass die schwache Wechselwirkung die direkte Wechselwirkung von vier Fermionen ist. Heute wissen wir, dass jeweils zwei Fermionen, entweder ein Lepton und sein Antiteilchen oder ein Quark und ein Antiquark, an ein schwaches Vektorboson koppeln. Bei niedrigen Energien sind diese Vektorbosonen virtuell, treten also nicht als reelle Teilchen auf.

Beim Betazerfall emittiert ein d-Quark ein virtuelles schwaches Boson und verwandelt sich dabei in ein u-Quark. Das negativ geladene schwache Boson zerfällt in ein Elektron und ein Antineutrino (Abb. 8).

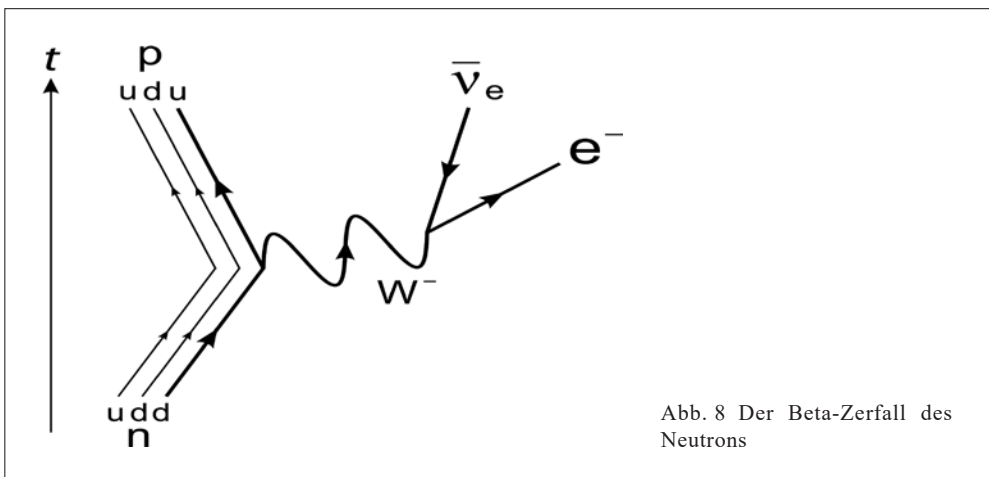


Abb. 8 Der Beta-Zerfall des Neutrons

Die Wechselwirkung des schwachen Bosons mit den sechs Leptonen und den sechs Quarks kann man durch eine Eichtheorie beschreiben – die Gruppe des schwachen Isospins ist die relevante Eichgruppe. In einer solchen Theorie gibt es drei Eichbosonen, zwei elektrisch geladene Bosonen und ein neutrales Boson. Die Massen dieser drei Bosonen sollten gleich sein.

Die schwachen Bosonen wurden 1983 am CERN entdeckt. Man beobachtete zwei geladene W-Bosonen und ein neutrales Boson. Die Massen der beiden W-Bosonen sind etwa 80,4 GeV, die Masse des neutralen Bosons ist etwa 91,2 GeV – die Masse des neutralen Bosons ist größer als die Masse der beiden W-Bosonen.

Es ist also nicht möglich, die schwachen Wechselwirkungen durch eine Eichtheorie mit der schwachen Isospingruppe $SU(2)$ zu beschreiben, denn in diesem Fall müssten die drei Eichbosonen die gleiche Masse haben.

Die schwachen und die elektromagnetischen Wechselwirkungen müssen vereinigt werden. Dies wurde um 1964 von Sheldon GLASHOW als auch von Abdus SALAM und John WARD vorgeschlagen. Die Eichgruppe dieser Theorie der elektroschwachen Wechselwirkungen ist $SU(2) \times U(1)$ – es gibt vier Eichbosonen, das masselose Photon, die zwei massiven geladenen W-Bosonen und ein massives neutrales Boson, das Z-Boson.

Sowohl das Photon als auch das Z-Boson sind Mischungen des $U(1)$ -Bosons und des neutralen $SU(2)$ -Bosons – der hier auftretende Mischungswinkel ist der elektroschwache Winkel. Dieser Winkel bestimmt auch das Verhältnis der Masse des geladenen W-Bosons und der Masse des Z-Bosons.

Der elektroschwache Winkel kann nicht berechnet werden. Die Experimente ergeben etwa 29° . In der elektroschwachen Theorie gibt es zwei Eichgruppen, also auch zwei Kopplungskonstanten. Das Verhältnis dieser beiden Konstanten ist eine Funktion des elektroschwachen Winkels.

1967 wurde von SALAM und Steven WEINBERG gezeigt, dass man die Massen der drei massiven Eichbosonen in der elektroschwachen Theorie durch eine spontane Symmetriebrechung erzeugen kann. Die Eichbosonen stehen in Wechselwirkung mit einem komplexen skalaren Feld, das ein Duplett bezüglich des schwachen Isospins ist. Die spontane Brechung der Eichsymmetrie durch das skalare Feld erzeugt die Massen für die beiden geladenen W-Bosonen und für das neutrale Z-Boson, das vierte Eichboson, das Photon, bleibt masselos.

Das skalare Feld hat vier Freiheitsgrade – drei davon werden für die Massenerzeugung der drei schwachen Bosonen benötigt. Der vierte Freiheitsgrad beschreibt ein weiteres massives skalares Teilchen, das sogenannte „Higgs“-Teilchen. Die Masse dieses Teilchens kann man nicht berechnen.

2012 wurde am CERN mit dem neuen Beschleuniger, dem *Large Hadron Collider*, ein skalares Boson entdeckt. Dieses Boson könnte das Higgs-Boson sein – seine Masse ist etwa 125 GeV. Erst in einigen Jahren wird man wissen, ob das neue Teilchen das Higgs-Boson ist.

7. Die große Vereinigung der Wechselwirkungen

Die Theorien der Quantenchromodynamik und der elektroschwachen Wechselwirkungen bezeichnet man als das Standardmodell der Teilchenphysik. Es ist eine Eichtheorie mit drei Eichgruppen, der Farbgruppe $SU(3)$, dem schwachen Isospin $SU(2)$ und der Gruppe $U(1)$.

Man hofft, mit dem *Large Hadron Collider* neue Effekte zu finden, die Hinweise auf die Physik jenseits des Standardmodells geben. Nach der Entdeckung der Neutrino-Oszillationen wissen wir, dass die Neutrinos eine kleine Masse besitzen. Das ist der erste Hinweis auf die Physik jenseits des Standardmodells, denn im Standardmodell haben die Neutrinos keine Masse.

Es kann sein, dass bei sehr hohen Energien die drei Eichgruppen des Standardmodells Untergruppen einer großen einfachen Eichgruppe sind – die entsprechende Eichtheorie wäre eine Theorie der Vereinigung der starken und elektroschwachen Wechselwirkungen.

Die Kopplungskonstante einer Eichgruppe hängt von der Energie ab. Die Quantenchromodynamik-Kopplungskonstante ist größer als die beiden Kopplungskonstanten der elektroschwachen Wechselwirkungen. Da die Quantenchromodynamik-Kopplungskonstante bei wachsender Energie kleiner wird, könnte bei hohen Energien eine Konvergenz der drei Kopplungskonstanten erfolgen. Wenn man die drei Kopplungskonstanten zu sehr hohen Energien extrapoliert, findet man, dass eine Konvergenz etwa bei 10^{16} GeV stattfinden könnte (Abb. 9).

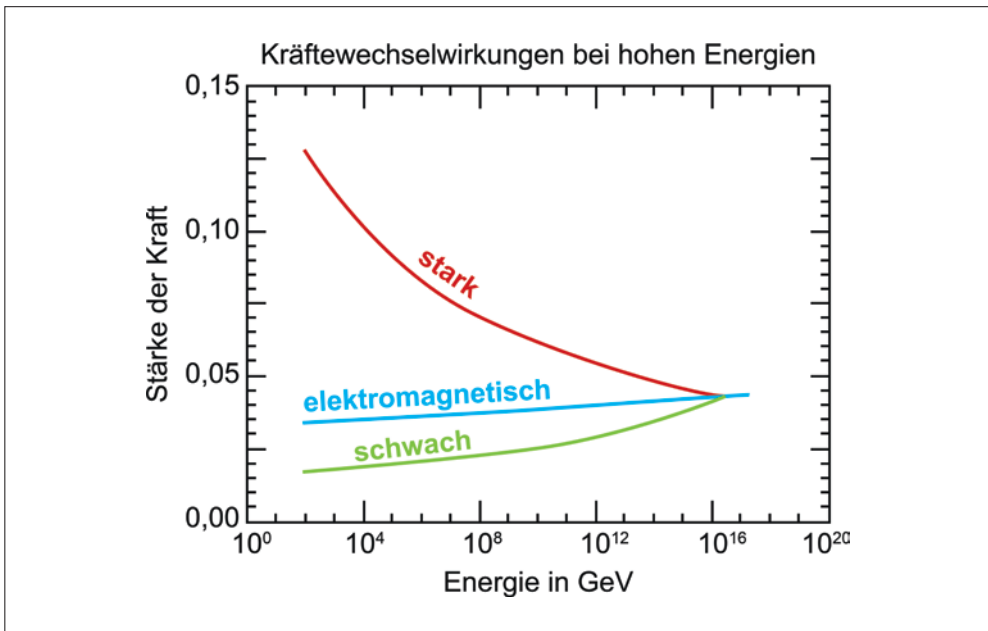


Abb. 9 Die Vereinigung der Wechselwirkungen

Eine mögliche Eichgruppe für die Vereinigung der drei Wechselwirkungen ist die Gruppe $SO(10)$, die Drehungen in einem zehndimensionalen Raum beschreibt. Sie wurde 1975 von H. FRITZSCH und P. MINKOWSKI als auch von H. GEORGI vorgeschlagen.

In $SO(10)$ gibt es 45 Eichbosonen. Die Leptonen und Quarks der drei Familien werden durch drei 16-dimensionale Darstellungen von $SO(10)$ beschrieben. Hier ist die erste Familie:

$$\begin{pmatrix} \nu_e & \bar{\nu}_e & u_r & u_g & u_b & \bar{d}_r & \bar{d}_g & \bar{d}_b \\ e^- & e^+ & d_r & d_g & d_b & \bar{u}_r & \bar{u}_g & \bar{u}_b \end{pmatrix}. \quad [7]$$

Bei einer sehr großen Energie $E(\text{GV})$ wird die Symmetrie gebrochen – bei niedrigen Energien erhält man die Eichgruppe $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Von den Details der Symmetriebrechung hängt es ab, ob die Eichgruppe des Standardmodells sofort erscheint oder ob es mehrere Stufen der Symmetriebrechung gibt.

Eine interessante Symmetriebrechung mit zwei Stufen ist $SO(10) \Rightarrow SO(6) \times SO(4)$. Die Gruppe $SO(6)$ ist isomorph zu $SU(4)$, die Gruppe $SO(4)$ ist isomorph zu $SU(2) \times SU(2)$, und man findet:

$$SO(10) \Rightarrow SU(4) \times SU(2) \times SU(2). \quad [8]$$

In der Eichtheorie bezüglich der Gruppe $SU(4)$ erscheinen die Leptonen und die farbigen Quarks zusammen – die Leptonenzahl ist die vierte „Farbe“. Ein Lepton und drei farbige Quarks bilden ein Quadruplett:

$$(4) = \begin{pmatrix} l \\ q_r \\ q_g \\ q_b \end{pmatrix} \quad [9]$$

In der nächsten Stufe der Symmetriebrechung werden Leptonen und Quarks getrennt. Man erhält das Product der Quantenchromodynamik-Gruppe und der Gruppe der elektroschwachen Wechselwirkungen:

$$SU(4) \times SU(2) \times SU(2) \Rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1). \quad [10]$$

Die erste Stufe der Symmetriebrechung ist bei etwa 10^{16} GeV , die zweite Stufe ist nicht genau fixiert. Sie könnte bei etwa 10^{10} GeV sein. Von den 45 Eichbosonen erhalten 33 Bosonen eine sehr hohe Masse – diese Bosonen nennt man X-Bosonen. Die verbleibenden 12 Bosonen sind die Eichbosonen des Standardmodells – acht Gluonen, drei schwache Bosonen und ein Photon.

Im Standardmodell sind die Protonen stabile Baryonen, da sie die leichtesten Baryonen sind und die Baryonenzahl erhalten ist. Das ist nicht so in der $SO(10)$ -Theorie. In der 16-Darstellung der Fermionen gibt es Quarks und Leptonen als auch die zugehörigen Antiteilchen. Die Baryonenzahl ist also nicht erhalten, und das Proton kann zerfallen, etwa in ein Positron und ein neutrales Pion (Abb. 10).

Um den Zerfall des Protons zu messen, wurden große Detektoren gebaut, etwa der Kamiokande-Detektor in Japan. Bis heute hat man keine Zerfälle des Protons beobachtet – die Zerfallszeit muss größer als 10^{33} Jahre sein.

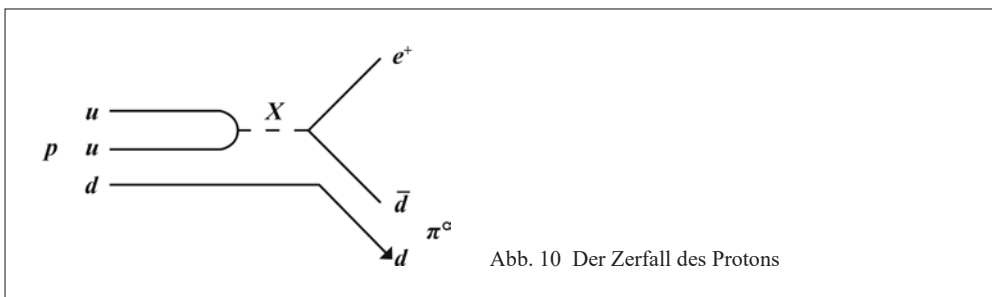


Abb. 10 Der Zerfall des Protons

In der $SO(10)$ -Theorie hängt die Zerfallszeit des Protons von den Details der Symmetriebrechung ab – sie sollte im Bereich von 10^{34} bis 10^{36} Jahren sein. Noch ist unklar, ob solche langen Zerfallszeiten überhaupt gemessen werden können.

Symmetrien sind in der Physik wichtig, insbesondere in der Kern- und Teilchenphysik. Die Isospin-Symmetrie beschreibt wichtige Aspekte der Atomkerne und der Nukleonen. Die $SU(3)$ -Symmetrie ist die Grundlage für das Verständnis der Hyperonen und K-Mesonen.

Die exakte Farbsymmetrie führt zur Eichtheorie der starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik. Hier sind die Eichbosonen masselos. Alle farbigen Objekte, insbesondere die Quarks und die Gluonen, existieren nicht als freie Teilchen – sie sind permanent gebunden im Inneren der Hadronen. Letztere sind Singulett bezüglich der Farbsymmetrie.

Die elektroschwache Eichtheorie mit der Eichgruppe $SU(2) \times U(1)$ ist spontan gebrochen – ein Eichboson, das Photon, ist masselos, die drei anderen Eichbosonen sind massiv. Die spontane Brechung der Eichsymmetrie erfolgt durch ein skalares Feld. Neben den drei massiven Eichbosonen gibt es noch ein massives Higgs-Boson, dessen Masse unbekannt ist. Eventuell ist es das Teilchen, das 2012 am *Large Hadron Collider* am CERN entdeckt wurde.

Noch ist unbekannt, ob die Idee der Großen Vereinheitlichung der starken und elektroschwachen Wechselwirkungen richtig ist. Dann müßten die Protonen zerfallen, allerdings mit einer sehr großen Zerfallszeit.

Ein bisher ungelöstes Problem ist die Beschreibung der Gravitation im Rahmen der Quantenphysik. In der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Gravitation eine Folge der Krümmung von Raum und Zeit. Eine Quantisierung von Raum und Zeit ist bis heute nicht gelungen.

Weiterführende Literatur

FRITZSCH, H.: Elementarteilchen. München: Beck 2004

FRITZSCH, H.: Quarks. Urstoff unserer Welt. München: Piper 2004

FRITZSCH, H.: Vom Urknall zum Zerfall. München: Piper 2005

FRITZSCH, H.: Sie irren, Einstein! Newton, Einstein, Heisenberg und Feynman diskutieren die Quantenphysik. München: Piper 2008

FRITZSCH, H.: Eine Formel verändert die Welt. München: Piper 2008

FRITZSCH, H.: Mikrokosmos. München: Piper 2012

Prof. Dr. Harald FRITZSCH
Ludwig-Maximilians-Universität München
Fakultät für Physik
Theoretische Teilchenphysik
Theresienstraße 37
80333 München
Bundesrepublik Deutschland
Tel: +49 89 21804380
Fax: +49 89 21804186
E-Mail: fritzsich@mppmu.mpg.de

Probing Nature’s Fundamental Symmetries One Slow Particle at a Time

Gerald GABRIELSE (Cambridge, MA, USA)



Abstract

The fundamental particles that comprise the universe that we see, and the antimatter counterparts that we can produce, manifest symmetries and asymmetries. Physicists speak of changing particles into antiparticles, and clocks running backwards, as we seek to classify and measure the most basic symmetries. Incredibly precise tests come from comparing particles and antiparticles. An introduction to the fundamental symmetries and how we learn about them is provided.

Zusammenfassung

Die fundamentalen Teilchen, aus denen das sichtbare Universum besteht, und die Antimaterie, die wir als Gegenstücke erzeugen können, offenbaren Symmetrien und Asymmetrien. Physiker sprechen von der Umwandlung von Teilchen in Antiteilchen und rückwärts laufenden Uhren, wenn wir versuchen, die grundlegendsten Symmetrien zu klassifizieren und zu messen. Unglaublich präzise Untersuchungen stammen vom Vergleich von Teilchen und Antiteilchen. Der Beitrag liefert eine anschauliche Einführung in die grundlegenden Symmetrien und die Art, wie wir sie erkennen.

1. Introduction

The “Standard Model of Particle Physics” is what we physicists unimaginatively call our most fundamental description of physical reality. The Standard Model includes a collection of fundamental particles called quarks and leptons, along with a set of interactions that are described as exchanges of other particles. Three basic symmetries are critical to the Standard Model – called parity (P), time-reversal (T) and charge conjugation (C). Each of the particle interactions are invariant under some but not all of the three symmetry transformations. All the particle interactions are invariant under the simultaneous application of all three symmetry transformations, making CPT the most fundamental symmetry of nature according to the Standard Model.

The easiest symmetry to understand is P (parity). Suppose I use an apparatus to do an experiment that has an initial set of conditions and a final set of outcomes. The initial conditions and final outcomes could each be a set of particles with all of their properties measured, for example. I can imagine (and sometime actually do) a new experiment that is a parity transform of the first. I look at my original apparatus in a mirror and then build a new apparatus that is just like what I see in the mirror. (Strictly speaking I need to also rotate the new apparatus end to end but we will assume this has no consequence.) I arrange new initial conditions that are my original initial conditions as I would view them in a mirror. With these new initial conditions and the new apparatus, I do the new experiment. If the final outcome of the new experiment is the same as the original outcome as viewed in a mirror, then I conclude that the small part of reality that I probed with the experiments is invariant under parity transformations.

To prove that P is a universal symmetry of nature is more difficult. We would need to do all possible experiments with all possible particles and all possible configurations to prove a universal symmetry. Such a proof is never possible, of course. Instead, we tend to accept the notion that parity is universal symmetry if after many experiments we fail to find any parity violations. For many years the physics community did believe that P was a universal symmetry of nature. Then, 60 years ago, this assumption was questioned by LEE and YANG, and an experiment done by WU demonstrated that P was violated whenever the weak interaction (the interaction that causes nuclei to be unstable and decay) is involved.

The other two symmetries can also be described in terms of comparing two experiments, each with their own apparatus and their own initial and final conditions. For time-reversal symmetry (T), which could better be named motion reversal, the three elements of the experiment are related by reversing all the directions of motion of all of the particles. This is easier to do in one's imagination than in the laboratory. But, with simple enough systems (for example, experiments that involve one particle at a time) this can sometimes be arranged to a good approximation. For charge-conjugation (C), the three elements of the experiment must be changed by changing all the particle into antiparticles.

For those not so familiar with antimatter, each fundamental particle in the Standard Model has an antimatter counterpart that has the same mass and charge magnitude but the opposite sign of charge. In this sense, a particle and an antiparticle are exactly opposite in the Standard Model. The familiar electron, one of the three particles that make up the matter that we see in the universe, has an antimatter particle called the positron. Particles and antimatter particles can annihilate each other. If an electron and a positron collide they both disappear, leaving their energy behind in the form of high energy light particles. For the

protons and neutrons that make up the rest of the visible matter in the universe, the anti-particles are called antiprotons and antineutrons, respectively. An antiproton and proton annihilate when they collide. So do a neutron and an antineutron.

One of the great mysteries of our universe is why it exists at all, and a related mystery is why the universe is made of matter rather than antimatter. According to the Standard Model and its symmetries, the big bang that started our universe as we know it should have created essentially equal numbers of matter and antimatter particles. As the universe expanded and cooled, these matter and antimatter particles would eventually collide and annihilate. No universe would remain. Something fundamental is clearly wrong with our “Standard Model”, and we do not know what it is given that we have a universe that is made of matter. The antimatter is gone since we see no evidence of annihilations (except in rare and very localized cases where antimatter positrons seem to be created). One powerful motivation for studying the symmetries of the Standard Model is that we know there is something fundamentally wrong with the Standard Model and its symmetries. We keep hoping to discover where the Standard Model is wrong in detail but so far we have not succeeded.

2. Why are We so Attached to a Standard Model that We Know is Wrong (or at Least Incomplete?)

The Standard Model works extremely well whenever we apply it to what we can study and measure in a laboratory. I will illustrate using the test made in my lab because it is the most precise test of the most precise prediction of the Standard Model (HANNEKE et al. 2011). An electron acts like a tiny magnet. The size of the electron’s magnet is conveniently measured in units called Bohr magnetons (much like lengths are conveniently measured in meters despite protestations to the contrary in my unenlightened country). The Standard Model provides a detailed prediction for the size of the electron’s magnet that depends on a measured fundamental constant called the fine structure constant (BOUCHENDIRA et al. 2011). After many person years of work, and many years of supercomputer time, the Standard Model’s prediction for the size of the electron’s magnet currently has a precision of about a part in 10^{12} (AOYAMA et al. 2012). This is the Standard Model’s most precise prediction.

As experimenters who know that the Standard Model is wrong or incomplete because the universe exists, we find it irresistible to test the Standard Model’s most precise prediction. We were able to suspend it in a magnetic field inside a device known as a Penning trap. Figure 1 shows a cutaway drawing of such a device with its copper electrodes and quartz spacers, all cooled to only a tenth of a degree above the absolute zero – the temperature where all motion ceases. The electron at the center is much too small to be visible in this figure but it is at the location of the dot. The details of what the various electrodes are called are not so important here. What is important is that when we put the right voltages on the various electrodes we can hold a single electron by itself while we perform experiments with it for months at a time. (We once held and played with the same electron for more than 10 months.) The distance scale in the figure is also worth noting. The cylindrical cavity within which the electron resides is about a half centimeter in height and in diameter.

Working with a series of eight very talented PhD students over more than twenty years, we devised a method to make the electron reveal its magnetism to us. The details are,

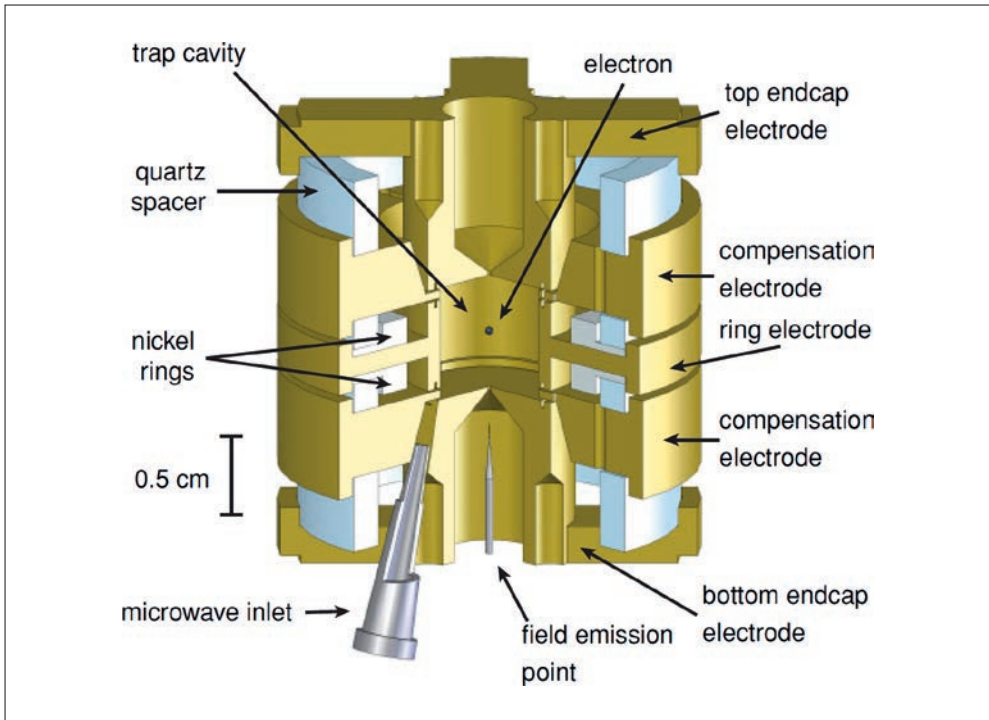


Fig. 1 Cutaway of the cylindrical Penning trap. There is a spatially uniform magnetic field that is vertical. One electron is suspended for months at a time in the center of this trap at the location show by the black dot. (Taken from HANNEKE et al. 2011.)

of course, beyond the scope here. Essentially though, the electron danced as we applied electromagnetic forces to it, and we measure the frequencies at which it danced. The size of the electron's magnet in the units mentioned is ratio of two of these measured frequencies. The measurement was a fully quantum measurement in that the two motions we measured had energy levels like the energy levels of atoms that all of us studied in high school chemistry. The dance of the electron involves "quantum jumps" between these energy levels. An electron in our apparatus thus is an artificial atom that has energy levels like ordinary atoms. The "nucleus" of our artificial atom is outside the electron. It is the trap shown, connected to a whole room full of refrigeration apparatus and electronics.

Our one-electron measurement determined the size of the electron's magnet to a precision of 3 parts in 10^{13} . This is an unusually precise measurement in physics and is the most precisely measured property of an elementary particle. The comparison of this most precisely measured property of an elementary particle to the most precise prediction of the Standard Model is the most precise confrontation of experiment and theory. Remarkably, our measurement confirms the prediction to a part in 10^{12} – arguably the Standard Model's greatest triumph (GABRIELSE 2013).

The reason that we take the Standard Model so seriously, despite its inability to account for why a universe made of matter exists, is that it is capable of making such incredibly

precise predictions of what we have been able to measure. Essentially all of the predictions of the Standard Model for the microscopic world are consistent with measurements within measurement uncertainties.

3. Testing the Standard Model's Most Fundamental Symmetry

The Standard Model's most fundamental symmetry is invariance under CPT transformations, as we have discussed. One experiment we used to test this symmetry involves a single proton suspended within a magnetic field in a trap similar to what is represented in Figure 1. The proton in the magnet field has a circular motion about the central axis of the trap. We measured the oscillation frequency very precisely by attaching a "FM radio" to the trap electrodes, and we picked up the very weak radio signal that the circulating proton produced (GABRIELSE et al. 1999). The experiment that is the CPT transform of what has been described involves suspending an antiproton in the same trap. The antiproton is suspended by the electromagnetic fields so that it never contacts the walls of the trap, and the vacuum within the cold trap electrodes is nearly perfect. The antimatter antiproton thus avoids annihilation because it never comes into contact with any protons. The antiproton circles around the center axis of the trap in the opposite direction to that of the proton. We use the same radio to measure the frequency of the antiproton's circular motion.

As for the electron experiment it took us many years to make our most precise measurement. Details are again beyond the scope of this description. Our most precise measurement compared the circular oscillation frequencies of an antiproton and a negative hydrogen ion that were stored together in the trap at the same time. While we measured the frequency of one of the particles while it was near the center of the trap we "parked" the other particle in a large circular orbit that was large enough that it did affect the orbit of the centered particle. This allowed us to minimize measurement errors that arise when a fresh particle is loaded into the trap. Antiprotons come only from large accelerators, and there is a big disturbance to the measurement apparatus when these are shot into the trap and captured. The oscillation frequencies that we measured were proportional to q/m for each particle – the ratio of the particle's charge and mass – and also to the magnetic field. By measuring in the same magnetic field, the frequency ratio that we measured was essentially a measurement of the ratio of q/m for the antiproton and the proton. The ratio that we measured (GABRIELSE et al. 1999) was consistent with the value that is predicted by the Standard Model to 9 parts in 10^{11} . Another triumph for the Standard Model.

4. When the Standard Model and Other Models Make Different Predictions

Much theoretical work has been focused upon making alternatives or additions to the Standard Model – not surprisingly given that the Standard Model is unable to explain a universe made of matter. The challenge is to make a new theoretical model that remains consistent with the many measurements of microscopic properties that have been made, include the illustrative measurements discussed above. Generally these models postulate new particles and interactions that have not yet been observed because they are too hard to detect with existing methods and available energies. Many physicists are looking for such

particles right now at CERN's Large Hadron Collider. They look at what comes out of collisions between high energy protons that travel at nearly the speed of light within a circular tunnel that is 27 km in diameter. We all hope that some such new particle will be within the energy reach of this collider, though none have been observed so far.

There is another way to test between the Standard Model (that has new particles and interactions) and new models (that have new particles and interactions). The Standard Model predicts that the distribution of charge in the electron is essentially spherically symmetric – that it looks the same no matter which way one rotates the electron. Almost without exception, the new models predict that the electron's charge should be slightly squished. Two of the basic symmetries need to be violated for the electron to be squished in this way, namely P and T. Since P violations are common, the T violation is of more current interest, and is the primary motivation for measurements of the shape of the electron's charge.

The observable consequence of the very different predictions of the Standard Model and other models shows up when we compare two energy levels of a molecule that we select. Because of the huge electric field within the molecule, if the electron's charge is not round, then one of the energy levels will shift up and the other will shift down. If we reverse the direction of the strong electric field, the two energy levels will shift oppositely. If the Standard Model's prediction is true, there is no hope to see the incredibly small relative shift of the energy levels. If most any of the alternative models and additions are true, there is a chance but the shift is still tiny – much too tiny to be resolved directly. However, if the two energy levels remain in the strong electric field for some time then the two energy levels accumulate a difference in quantum mechanical phase that can be detected with a quantum interference experiment. Figure 2 represents the basic experimental setup that our Harvard-Yale collaboration used (BARON et al. 2014).

The molecules pass between two plates which produce an electric field that determines the direction of the strong electric field within the molecule. Lasers prepare the mole-

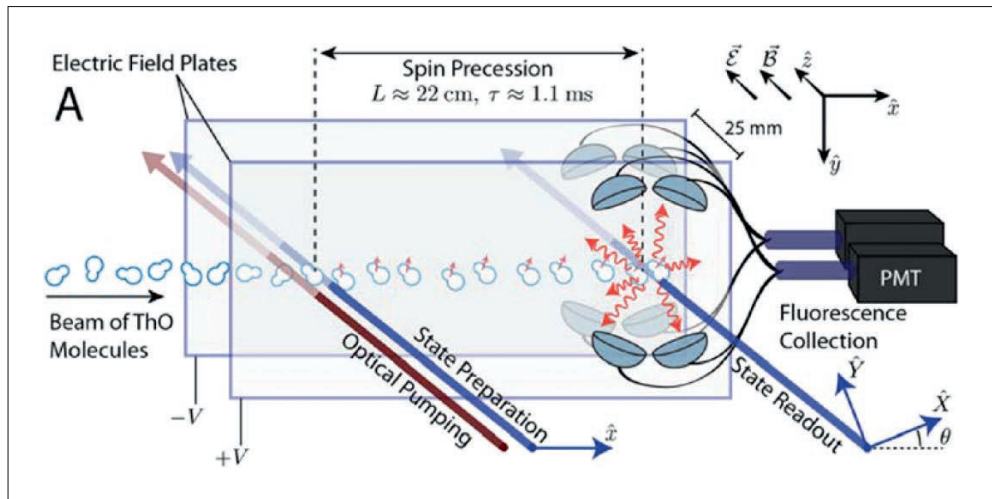


Fig. 2 Overview of apparatus used to measure whether the electron's charge distribution is spherical as predicted by the Standard Model, or squished as predicted by most other models. (Taken from BARON et al. 2014.)

cules in what is called a “coherent superposition” of the two energy states of interest. The direction of the strong electric field within the molecules continues to be determined by these plates until the readout lasers detect the quantum interference. We did our measurement “blind” – we added a small but unknown offset to the parameter that measures how squished is the electron charge so that we would not be biased to one answer or another. After we had completed our uncertainty analysis we unblinded our result. Our result: the electron charge was not squished within our incredibly small measurement uncertainty. The Standard Model is right again.

5. Conclusion

The Standard Model and its fundamental symmetries are the great triumph and the great frustration of modern physics (GABRIELSE 2013). The great triumph is that it can predict the outcome of microscopic measurements to an incredible precision (e. g., the electron’s magnetism and the relationship of the charge-to-mass ratios of the antiproton and proton above). It also successfully predicts that the electron’s charge distribution is incredibly spherical. The great frustration of this same Standard Model is that it cannot explain why our universe exists or why it is made of matter. The quest to resolve this most fundamental mystery continues motivating the design and construction of new apparatus and measurements in our lab and others. Stay tuned. We hope for exciting discoveries to come.

References

- AOYAMA, T., HAYAKAWA, M., KINOSHITA, T., and NIO, M.: Quantum electrodynamics calculation of lepton anomalous magnetic moments: Numerical approach to the perturbation theory of QED. *Prog. Theor. Exp. Phys.* 01A107 (2012)
- BARON, J., CAMPBELL, W. C., DEMILLE, D., DOYLE, J. M., GABRIELSE, G., GUREVICH, Y. V., HESS, P. W., HUTZLER, N. R., KIRILOV, E., KOZYRYEV, I., O’LEARY, B. R., PANDA, C. D., PETRIK, E. S., SPAUN, B., VUTHA, A. C., and WEST, A. D.: Order of magnitude smaller limit on the electric dipole moment of the electron. *Science* 343, 269–272 (2014)
- BOUCHENDIRA, R., CLADE, P., GUELLATI-KHÉLIFA, S., NEZ, F., and BIRABEN, F.: New determination of the fine structure constant and test of quantum electrodynamics. *Phys. Rev. Lett.* 6, 080801 (2011)
- GABRIELSE, G.: The standard model’s greatest triumph. *Physics Today* December 2003, 64–65 (2013)
- GABRIELSE, G., KHABBAZ, A., HALL, D. S., HEIMANN, C., KALINOWSKY, H., and JHE, W.: Precision mass spectroscopy of the antiproton and proton using simultaneously trapped particles. *Phys. Rev. Lett.* 82, 3198 (1999)
- HANNEKE, D., FOGWELL HOOGERHEIDE, S., and GABRIELSE, G.: Cavity control of a single-electron quantum cyclotron: Measuring the electron magnetic moment. *Phys. Rev. A* 83, 052122 (2011)

Prof. Gerald GABRIELSE
Leverett Professor of Physics
Harvard University
Department of Physics
17 Oxford Street
Cambridge
MA 02138
USA

Phone: 001 617 4954381
Fax: 001 617 4954381
E-Mail: gabrielse@physics.harvard.edu

The Long Journey to the Higgs Boson and Beyond at the Large Hadron Collider (LHC)

Peter JENNI (Genf, Schweiz; Freiburg i. Br.)



Abstract

Since 2010 the experiments at the Large Hadron Collider (LHC) investigate particle physics at the highest collision energies ever achieved in a laboratory. Following a rich harvest of results for Standard Model physics came in summer 2012 the first spectacular discovery by the ATLAS and CMS experiments observing a new, heavy particle which is most likely the long-awaited Higgs boson, fundamental to the understanding of Nature in its smallest components. All the subsequent data point strongly to the properties as expected for the boson associated with the Brout-Englert-Higgs mechanism postulated to explain the spontaneous symmetry breaking observed for the electroweak forces, and thereby to explain how elementary particles acquire mass.

Building up the experimental programme with this unique high-energy collider, and developing the very sophisticated detectors built and operated by world-wide collaborations, meant an incredible scientific and human adventure spanning now three decades. And this is only the beginning of this fantastic journey into uncharted physics territory. The LHC is restarting this year its operation at even higher collision energy, with the exciting prospects to elucidate the mystery of Dark Matter in the Universe, which could be related to a theoretically proposed overarching symmetry in particle physics, called Supersymmetry (SUSY).

Zusammenfassung

Seit 2010 erforschen Experimente am *Large Hadron Collider* (LHC) des CERN Teilchenphysik bei den höchsten Kollisionsenergien, die je in einer Versuchsanlage erreicht wurden. Nach einer reichen Ernte an Messungen zum Standardmodell der Teilchenphysik kam nun im Jahr 2012 die erste spektakuläre Entdeckung in Form eines neuen, schweren Teilchens. Dieses ist wohl das lange gesuchte Higgs-Teilchen, welches so fundamental ist zum Verständnis der Natur in ihren kleinsten Bestandteilen. Alle neuen Messdaten deuten darauf hin, dass es sich tatsächlich um das postulierte Boson handelt, das die Brout-Englert-Higgs-Theorie der spontanen Symmetriebrechung der elektroschwachen Kräfte bestätigen würde. Damit gäbe es auch eine Erklärung, wie die Elementarteilchen zu ihrer Masse kommen.

Das Experimentierprogramm mit dieser einzigartigen Kollisionsanlage und die Entwicklung der sehr komplexen technischen Nachweisgeräte, Detektoren, die von weltumspannenden riesigen Forschergruppen gebaut wurden und betrieben werden, bedeutet ein großes wissenschaftliches wie auch menschliches Unterfangen nun schon seit drei Jahrzehnten. Aber die aufregende Entdeckungsreise in Bereiche neuer Physik, auch jenseits der Grenzen des Standardmodells, hat am LHC damit erst so recht begonnen. Der Neubetrieb in diesem Jahr, bei noch höherer Energie, verspricht Aufschluss zu geben zur offenen Frage der Dunklen Materie im Universum, welche in einer umfassenden, aber noch unbestätigten, Theorie, der sogenannten Supersymmetrie (SUSY), erklärt werden könnte.

1. Introduction

The discovery of a scalar boson, which shows within the present statistical precision achieved all the expected properties for the famous Higgs boson, announced by the ATLAS and CMS Collaborations on 4th July 2012 (*ATLAS Collaboration* 2012, *CMS Collaboration* 2012), was the culminating experimental triumph for the Standard Model (GLASHOW 1961, WEINBERG 1967, SALAM 1968, ENGLERT and BROUT 1964, HIGGS 1964a, b, 1966, GURALNIK et al. 1964, KIBBLE 1967). The Standard Model (SM) of particle physics is one of the most remarkable achievements of physics over the past 50 years. Its descriptive and predictive power has been experimentally demonstrated with unprecedented accuracy in many generations of experiments ranging from low to high energies. The SM comprises the fundamental building blocks of all visible matter, with the three fermion families of quarks and leptons, and their interactions via three out of the four fundamental interactions mediated by bosons, namely the massless photon for the electromagnetism, the heavy W and Z bosons for the weak force, these two interactions unified in the electroweak theory, and the massless gluons for the strong interaction.

In order to solve the mystery of generation of mass, a spontaneous symmetry-breaking mechanism was proposed introducing a complex scalar field that permeates the entire Universe. This mechanism, known as Brout-Englert-Higgs (BEH) mechanism (ENGLERT und BROUT 1964, HIGGS 1964a, b, GURALNIK et al. 1964), gives the W and Z their large masses and leaves the photon massless. Interaction with the scalar field generates masses to the quarks and leptons in proportion to the strength of their couplings to it. This field leads to an additional massive scalar boson as its quantum, called the Higgs boson. After the discovery of the W and Z bosons in the early 1980s, the hunt for the Higgs boson, considered to be the keystone of the SM, became a central theme in particle physics, and also a primary motivation for the LHC. Finding the Higgs boson would establish the existence of the postulated BEH field, and thereby marking a crucial step in the understanding of Nature.

There is a vast body of literature available for ‘telling the story’ of the Higgs discovery at the LHC. Two examples are DELLA NEGRA et al. (2012) and JENNI and VIRDEE (2015) and an account on hadron collider experiments even before is given (GRANNIS and JENNI 2013). For scientifically rigorous accounts and full references the reader is referred to the original publications (*ATLAS Collaboration* 2012, *CMS Collaboration* 2012) and the full references therein, as well as to the updated public reference lists of publications by ATLAS¹ and CMS².

2. The LHC Project

The LHC project must be seen as a global scientific adventure, combining the accelerator complex, the experiment collaborations with their detectors, a worldwide computing grid, and a motivating theory community, that started more than 30 years ago. Obviously the main issue is the fundamental physics it addresses, but the project itself is truly “a marvel of technology”, a detailed account of which can be found in EVANS 2009.

1 ATLAS publications: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>.

2 CMS publications: <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications>.

2.1 Historical Setting and Time Line

A comprehensive history of the years leading to the LHC can be found in LLEWELLYN SMITH (2007). The great success in making the experimentally “clean” W and Z boson discoveries, despite the huge hadronic backgrounds of ordinary collision debris, at the CERN SpbarS Collider in the early 1980s was crucial for the community to dare to even dream of a future powerful high-energy hadron collider in order to make a decisive search for the Higgs boson. The idea that the tunnel for the, at that time, still future Large Electron-Positron (LEP) machine should be able to house, at some distant time, the LHC, was already in the air in the late 1970s. Thankfully, those leading CERN at the time had the vision to plan for a tunnel with dimensions that could accommodate it. Enthusiasm for an LHC surfaced strongly in 1984 at a CERN-ECFA workshop in Lausanne entitled “LHC in the LEP Tunnel”, which brought together working groups that comprised machine experts, theorists and experimentalists.

With the promise of great physics at the LHC, several motivating workshops and conferences followed, where the formidable experimental challenges started to appear manageable, provided that enough R&D work on detectors would be carried out. It cannot be stressed enough how important the many years of R&D were that preceded the final detector construction for the LHC experiments. Technologies had to be taken far beyond their state-of-the-art of the late 1980s in terms of performance criteria in the anticipated harsh LHC environment, like granularity and speed of readout, radiation resistance, reliability, but also considering buildable sizes of the detector components and number of units, and very importantly at an affordable cost. For many detector subsystems there were initially a few parallel developments pursued as options, because it was not guaranteed from the onset that a given proposed technology would finally fulfil all the necessary requirements. Increasingly more realistic prototypes were developed, in a learning process for both the detector communities and the industries involved. The long duration of the LHC project until the Higgs discovery is illustrated in Table 1, with a few selected milestones concerning the LHC and the general-purpose experiments.

2.2 The Collider

In the LHC the two counter-rotating beams travel in separate vacuum pipes in the arcs around the ring and consist of many particle bunches separated by a small distance. They are made to collide at the centre of the detectors with a small crossing angle. The nominal number of bunches is 2808, the distance between bunches is 7.5 m and the crossing angle 285 mrad. The layout of the collider is shown in Figure 1. There are eight arcs (bending radius of 2804 m), where the beams are bent, and eight straight-sections used for utilities or collision insertions. Four insertions are equipped with experimental detectors, where the two counter-rotating beams can be brought to collision.

The two most important parameters of a proton-proton collider are the energy of the collisions and the luminosity, a parameter proportional to the number of collision events per second. The energy is related to the discovery potential of new particles of higher mass and the luminosity to the production of a relevant number of the desired events in a reasonable running time. The luminosity is a measure of the quality of the beams and their collisions, which is the result of careful design and mastering of several phenomena.

Tab. 1 The LHC Timeline

| | |
|------|---|
| 1984 | Workshop on a Large Hadron Collider in the LEP tunnel, Lausanne, Switzerland. |
| 1987 | Workshop on the Physics at Future Accelerators, La Thuile, Italy. The Rubbia "Long-Range Planning Committee" recommends the Large Hadron Collider as the right choice for CERN's future. |
| 1990 | LHC Workshop, Aachen, Germany (discussion of physics, technologies and detector design concepts). |
| 1992 | General Meeting on LHC Physics and Detectors, Evian-les-Bains, France (with four general-purpose experiment designs presented). |
| 1993 | Three Letters of Intent evaluated by the CERN peer review committee LHCC. ATLAS and CMS selected to proceed to a detailed technical proposal. |
| 1994 | The LHC accelerator approved for construction, initially in two stages. |
| 1996 | ATLAS and CMS technical proposals approved. |
| 1997 | Formal approval for ATLAS and CMS to move to construction (materials cost ceiling of 475 MCHF). |
| 1997 | Construction commences (after approval of detailed Technical Design Reports of detector sub-systems). |
| 2000 | Assembly of experiments commences, LEP accelerator is closed down to make way for the LHC. |
| 2008 | LHC experiments ready for pp collisions. LHC starts operation. An incident stops LHC operation. |
| 2009 | LHC restarts operation, pp collisions recorded by LHC detectors. |
| 2010 | LHC collides protons at high energy (centre of mass energy of 7 TeV). |
| 2012 | LHC operates at 8 TeV: discovery of a Higgs boson. |
| 2015 | LHC starts Run-2 at 13 TeV collision energy. |

The **beam energy** is proportional to the product of B (the magnetic field of the main dipole magnets) and ρ (the bending radius of the arcs). Since ρ was fixed by the dimensions of the existing LEP tunnel, it was important to aim at the highest possible field B . The choice for LHC was to use NbTi superconductors cooled at a temperature of 1.9 K provided by superfluid helium (He-II). The design with a 8.3 Tesla magnetic field in the dipoles resulted in a nominal beam energy of 7 TeV. Out of the almost ten thousands magnets forming the collider, the 1232 dipole magnets (length 16 m, mass 27 t) represented a major design and constructional effort.

The solution of NbTi conductors at 1.9 K offers important advantages at the expense of a more complex cryogenic system. This is due to the peculiar transport properties of pressurized superfluid helium, such as high heat capacity, low viscosity, and good effective thermal conductivity: it permits to cool the long string of magnets with a very small flow of liquid. The total cold mass of 35,000 t operating at 1.9 K is the coldest spot in the Universe.

The considerable beam power (362 MJ) and the large electromagnetic energy stored in the magnets (11 GJ for the complete system) require a very sophisticated protection system to prevent damage in case of beam guiding problems or resistive transition (quench). In fact each of the two beams has an energy sufficient to melt 500 kg of copper and the electromagnetic energy of the magnets, if not properly discharged, could provoke large damages.

The **luminosity** L is related to the properties of the colliding beams at the collision point and it is measured in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. It is proportional to the square of number of particle per bunch, the number of bunches around the ring and inversely proportional to the transverse dimensions of the beams at the collision point. The product of L with the cross-section σ of the process to be investigated gives the average number of events produced per second.

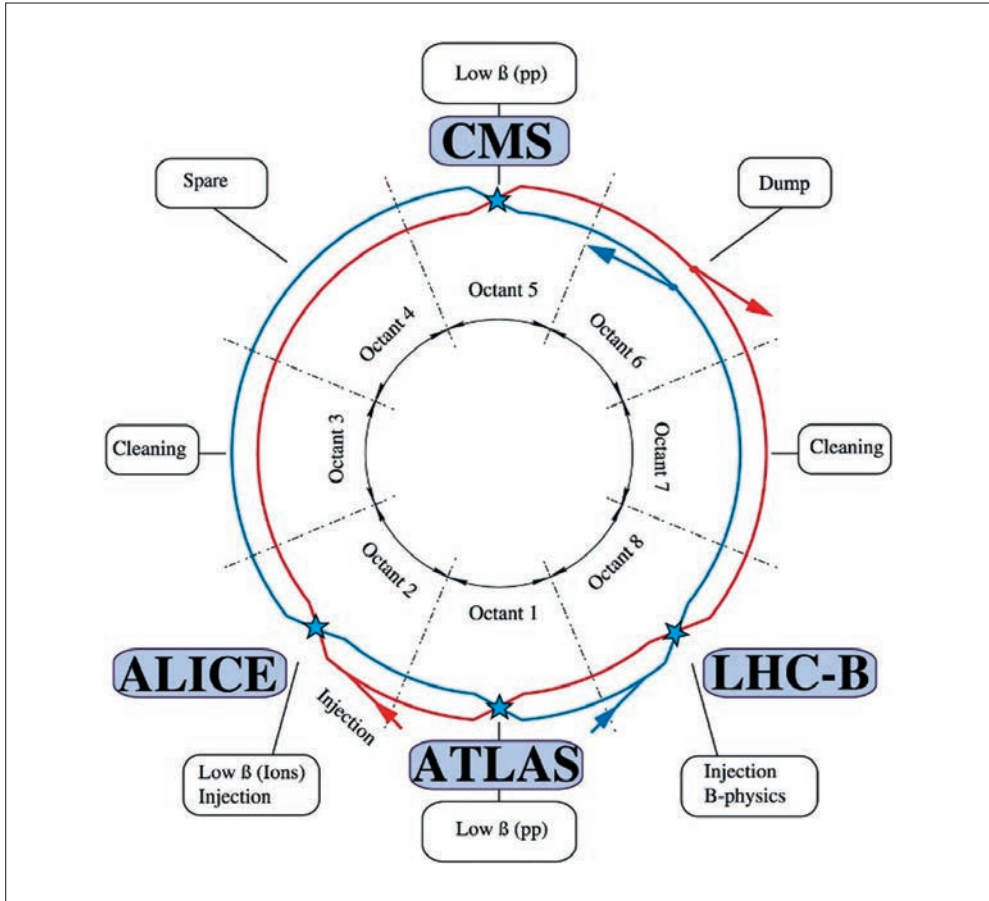


Fig. 1 Layout of the Large Hadron Collider

L varies with time, since the stored beams degrade during the collision run. The integrated luminosity is the integral over a certain time period. The luminosity can be considered as a figure of merit of the global quality of the machine. During the 2012 run, with beam energy of 4 TeV, the highest initial luminosity was $7.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The integrated luminosity collected by ATLAS and CMS in 2012 was 21.5 fb^{-1} .

2.3 Overview and Motivation for the LHC Detectors

The enthusiasm for the great physics potential of an LHC arose in the community at the Lausanne ECFA-CERN workshop in 1984. Finding the Higgs boson, the direct experimental manifestation of the Brout-Englert-Higgs mechanism, was clearly a priority for the future of particle physics, but was also expected to be very challenging. Its mass is not predicted by the Standard Model and could have been as high as 1 TeV (about 1000-times the mass of the proton). This required a search over a broad range of mass, hence ideally suited at a high-energy pp collider where the energy spectrum of the constituents of the protons

(quarks and gluons) allow all possible Higgs masses to be looked for at the same time. Because of the predicted low detectable cross-sections a very high-luminosity collider was mandatory.

But the Higgs search was by far not the only reason to stimulate great interest for the LHC. Already in the 1980s there were clear motivations from speculative theories predicting physics Beyond the Standard Model (BSM), the most popular one being Supersymmetry (SUSY) with its characteristic missing transverse energy signatures due to the escaping lightest neutral SUSY particle (LSP). Other hypothetical models predicted new heavy resonances, or leptoquarks (particles containing both quarks and leptons), or even substructure to quarks, and many other exotic ideas were around. It was also realized early on that the LHC would produce huge numbers of heavy flavour particles (containing heavy quarks from the third quark family), opening a new frontier in precision flavour physics. Furthermore, unprecedented exploratory steps could be made in studying the quark-gluon plasma at high density and temperatures when colliding heavy ions, like fully ionized lead nuclei. Motivated by these physics prospects, CERN opted ultimately for an experimental programme with two very large general-purpose detectors (ATLAS and CMS), and two large apparatus optimized respectively for flavour physics (LHCb) and for heavy ion collisions (ALICE).

The search for the Higgs boson played a particularly important role in the design of the **general-purpose experiments ATLAS and CMS**. In the region of low mass ($m_H < 150$ GeV), the two channels considered mostly suited for unambiguous discovery were the decay to two photons and the decay to two Z bosons, each decaying in turn into lepton pairs, e^+e^- or $\mu^+\mu^-$ where one or both of the Z bosons could be virtual. As the natural width of the low-mass Higgs boson is < 10 MeV, the width of any observed mass peak would be entirely dominated by the instrumental resolution. In designing the general-purpose detectors, considerable care was placed on the value of the magnetic field strength, on the precision tracking systems and on high-resolution electromagnetic (em) calorimeters. The high-mass region, as well as the signatures from supersymmetry, drove the need for good resolution for jets and missing transverse energy (E_T^{miss}), implying also almost full phase space (4π) hadronic calorimetry coverage.

The choice of the field configuration determined the overall design for these experiments. It was also well understood that to stand the best chance of making discoveries at the new energy scale of the LHC – and in the harsh conditions generated by about a billion pairs of protons interacting every second, several tens every bunch crossing – would require the invention of new technologies while at the same time pushing existing ones to their limits. In fact, a prevalent saying was: “We think we know how to build a high-energy, high-luminosity hadron collider – but we don’t have the technology to build a detector for it.” In reality of course both turned out to be difficult and demanded technological breakthroughs. Early on it was realized that detectors will have to face eventually even luminosities beyond the initial LHC design to reach some of the ultimate physics goals. That the general-purpose experiments have worked so marvellously well since the start-up of the LHC is a testament to the difficult technology-choices made by the conceivers and the critical decisions made during the construction of these experiments. It is noteworthy that indeed the very same elements mentioned above were crucial in the discovery of a Higgs boson.

Very different challenges were faced for the two **special-purpose experiments LHCb and ALICE**, which are reflected in their very different specific designs. They operate at

lower luminosity, typically at $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ or lower, avoiding basically multiple events per bunch crossing, and they feature specific optimizations for final state particle identifications.

It is far beyond the scope of this article to give a comprehensive description of these four sophisticated instruments that have been developed with very considerable R&D efforts, culminating in many large-scale prototype measurement campaigns in particle beams at CERN and other accelerator laboratories, over the 1990s and early 2000s. The construction of the various components took place over about 10 years, starting in the second half of the 1990s, in universities, national laboratories, and industries. Typically, after local initial testing, the components were sent to CERN, where after reception tests they were assembled and installed in the experimental caverns, followed by commissioning tests. Figure 2 shows photographs of the four detectors during their late installation phase, before the detectors were completely closed for operation. The four collaborations have published very detailed and comprehensive technical descriptions of their detectors as finally built and operated during the first years of LHC in (*ATLAS Collaboration 2008*, *CMS Collaboration 2008*, *LHCb Collaboration 2008*, *ALICE Collaboration 2008*). The interested reader is invited to consult these major documentations for detailed information.

The design of the **ATLAS detector** is based on a large toroid magnet system for the muon spectrometer complemented with a small superconducting solenoid around the inner tracking cylinder, centred at the interaction point. The novel and challenging superconducting air-core toroid magnet system, contains about 80 km of superconductor cable

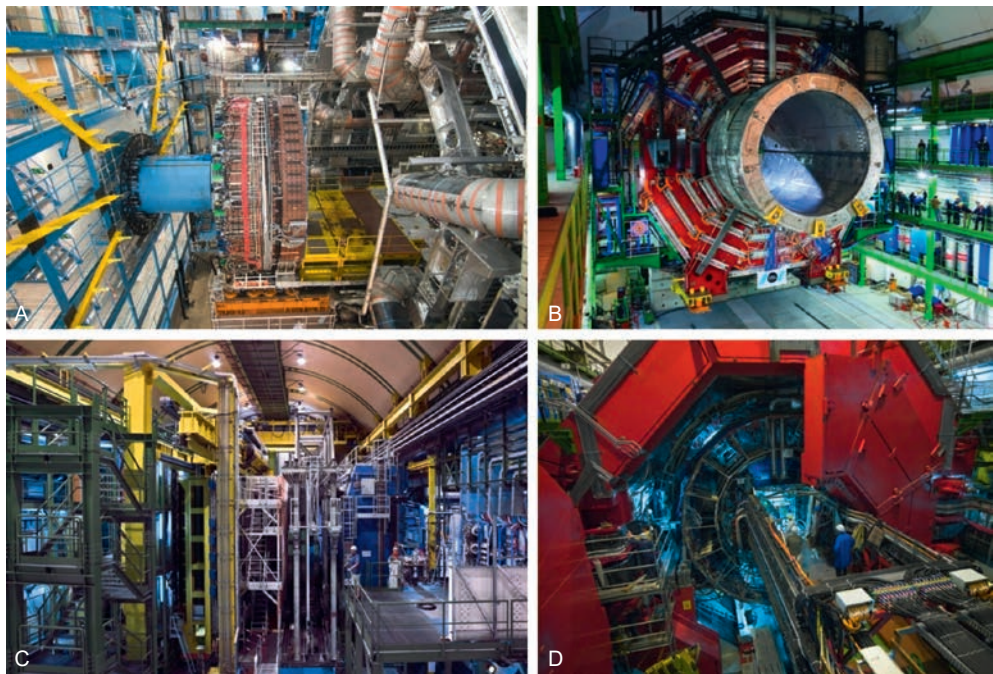


Fig. 2 The four LHC detectors during the installation phase. (A) ATLAS, (B) CMS, (C) LHCb, (D) ALICE

in eight separate barrel coils (each $25 \times 5 \text{ m}^2$ in a ‘racetrack’ shape) and two matching end-cap toroids. A field of ~ 0.5 Tesla is generated over a large volume. The toroids are complemented with a thin solenoid (2.4 m diameter, 5.3 m length), which provides an axial magnetic field of 2 Tesla. The momentum of the muons can be precisely measured as they travel unperturbed by material for more than 5 m in the air-core toroid field.

In the field-free region between solenoid and toroids there is a highly granular em calorimeter using a novel Lead-liquid Argon (LAr) sampling calorimeter complemented by full-coverage hadronic sampling calorimeters. For the latter a plastic scintillator – iron sampling technique, also with a novel geometry – is used in the barrel part of the experiment, whereas LAr calorimeters cover the end-cap regions near the beam axis where particle fluxes, and thereby radiation exposures, are highest. The reconstruction of all charged particles, including those of displaced secondary vertices, is done in the inner tracking detector, which combines highly granular pixel (80 million channels) and microstrip (6 million channels) silicon semiconductor sensors close to the beam axis, and a ‘straw tube’ gaseous detector. The latter also helps in the identification of electrons using information from the effect of transition radiation.

Figure 2A shows one end of the cylindrical barrel detector after about 4 years of *in-situ* installation work in the underground cavern, 1.5 years before completion. The ends of four of the barrel toroid coils are visible, illustrating the eightfold symmetry of the structure. The relatively lightweight overall structure of the detector adds up to 7,000 t, spanning over a large volume of 22 m diameter with a length of 46 m.

The **CMS detector** features prominently a state-of-the-art superconducting high-field solenoid of 4 Tesla. This single magnet solution serves both the high precision inner tracking chambers as well as the external muon detector, which is instrumented with large gaseous drift chambers in the barrel and cathode strip chambers in the end-caps complemented by resistive plate trigger chambers, embedded in the return yoke. This configuration allowed one to achieve a compact overall design, limiting the diameter to 15 m. The magnet yoke makes up for most of the total detector weight of 12,500 t.

Muon detection, and their most accurate measurement, was a priority criterion for the CMS design, followed by precision measurements for photons and electrons, achieved with a new type of radiation hard em crystal calorimeter, the largest ever built. The challenging, but very successful development and manufacture of the 75,848 lead tungstate scintillating crystals, in the final set-up pointing to the interaction point, took more than a decade. Charged particle tracking is done with a small number of precise position measurements for each charged particle trajectory leading to a large number of cells distributed inside a cylindrical volume 5.8 m long and 2.5 m in diameter: 66 million silicon pixels and 9.3 million silicon microstrips. With 198 m^2 of silicon detector area the CMS tracker is by far the largest silicon tracker ever built. The hadron calorimeter is built from alternate plates of brass absorber and scintillator plates that sample the shower energy.

The iron yoke of the CMS detector is sectioned into five barrel wheels and three end-cap disks at each end. The sectioning enabled the detector to be assembled and tested in a large surface hall while the underground cavern was being prepared. The sections, weighing between 350 and 2,000 tonnes, were then lowered into the cavern (Fig. 2B) between October 2006 and January 2008, using a dedicated gantry crane system equipped with strand jacks: a pioneering use of this technology to simplify the underground assembly of large experiments.

The **LHCb detector** concept exploits the dominant rate of beauty particle production towards the beam directions, and for practical reasons concentrates just on one of the two sides. Away from the LHC collision region the layout therefore resembles a fixed target spectrometer, but with very unique features. A silicon strip vertex locator detector can be positioned during stable beams very close to the interaction region and beam line in order to measure accurately primary and secondary vertices, selecting events with b-quarks. Particle identification to cleanly identify the various final states is achieved by two ring image Cerenkov detectors. Figure 2C shows a picture of the fully installed detector in LHC Point-8.

The **ALICE detector** has to cope with extremely high multiplicity events, characteristic of heavy ion collisions, including charged particle measurements at an as low as possible momentum threshold. Furthermore, particle identification is needed for many of the specific heavy ion physics signatures. The ALICE Collaboration has reused the former huge L3 warm solenoid magnet providing a field of 0.5 Tesla over a large central volume. Within the magnet, with its 10,000 t heavy iron yoke, is located, as central tracking detector, the world's largest Time Projection Chamber. A front view of the ALICE detector nearing installation completion is shown in Figure 2D.

2.4 Triggering and Computing

A particular challenge for ATLAS and CMS are the very high collision rates in the LHC, necessary for the Higgs search and studies, given the small production cross section combined with the need to investigate final states with very small branching fractions. In the first three years of operation the LHC reached a peak instantaneous luminosity of $7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ with a 50 ns bunch spacing, which meant that the detectors had to simultaneously cope with up to ~ 50 overlapping (pile-up) events in a given bunch crossing. In the years ahead, the instantaneous luminosity is still expected to rise two- to three-fold.

It is technically not possible to store all data for all events, therefore, a trigger system is used to reject large numbers of events and retain only the interesting ones from crossings with potential physics processes of interest. This is done in real time by sophisticated integrated trigger and data acquisition systems, involving custom-made fast electronics in a first stage and large computing farms in subsequent stages before the data, a few hundred events per second, are transferred to mass storage for further analyses.

The LHC experiments generate huge amounts of data (tens of petabytes of data per year) requiring a fully distributed computing model. The Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) was developed to deal with this task (EVANS 2009).³ With its hierarchical architecture of tiered centres it allows any user anywhere access to any data recorded or produced in the analyses steps during the lifetime of the experiments. The centre at CERN receives the raw data, carries out prompt reconstruction, almost in real time, and exports the raw and reconstructed data to the 12 Tier-1 centres and also to more than 100 Tier-2 centres for physics analyses. These are located all over the globe and give physicists access to the data from their home institutions in the worldwide collaborations.

3 WLCG comprehensive information: <http://wlcg.web.cern.ch>.

2.5 Comment on Testing and Commissioning

The Individual detector components (e. g. chambers) were built and assembled in a distributed way all around the globe in the numerous participating institutes and were typically first tested at their production sites, then also after being delivered to CERN, and finally again after their installation in the underground caverns. The collaborations invested in addition enormous efforts in testing representative samples of the detectors in test beams at CERN and other accelerator laboratories around the world. These test beam campaigns not only verified that performance criteria were met over the several years of production of detector components, but were also used to prepare the calibration and alignment data for LHC operation.

During the progressing installation the experiments made extensive use of the constant flow of cosmic rays impinging on Earth providing a reasonable flux of muons even at a depth of 100 m underground, typically a few hundred per second traversing the detectors. These muons were used to check the whole chain from hardware to analysis programs of the experiments, and to align the detector elements and calibrate their response prior to the pp collisions.

3. The Discovery of the Higgs Boson

3.1 Standard Model Measurements to Demonstrate the Performance

Observing, and measuring accurately, at the LHC collision energies, the production of known particles of the SM, was always considered to be a necessary stepping stone towards exploring the full potential of the LHC with its promise of new physics, firstly of the discovery of the Higgs boson. The SM processes, such as W and Z production, are often referred to as ‘standard candles’ for the experiments. However, there is much more value to measuring SM processes than this: never before could the SM physics be studied at a hadron collider with such sophisticated and highly accurate detectors, ultimately allowing tests of detailed predictions of the SM with unprecedented precision and minimal instrumental systematic errors.

An example of a very early measurement is shown in Figure 3, produced only after a month or so after first high-energy collisions in spring 2010. ATLAS and CMS observed in such di-muon invariant mass distributions a ‘summary’ of decades of particle physics, with remarkable mass resolution.

The charged and neutral Intermediate Vector Bosons (IVB) W and Z are the major benchmark measurements at the LHC for demonstrating the excellent detector performance, as well as for testing model predictions to a high degree of accuracy. The Z decays into electron and muon pairs can be extracted almost free of any backgrounds, as shown in Figure 4.

As an example, the good agreement between the measured and expected W cross-sections times the leptonic decay branching ratios (which is the expected rate for W bosons to be produced and then decay to leptons) is illustrated in Figure 5. With the presently available data samples the measurements are expected to already strongly constrain the theoretical model parameters. Figure 5 shows the cross-section measurements and pre-

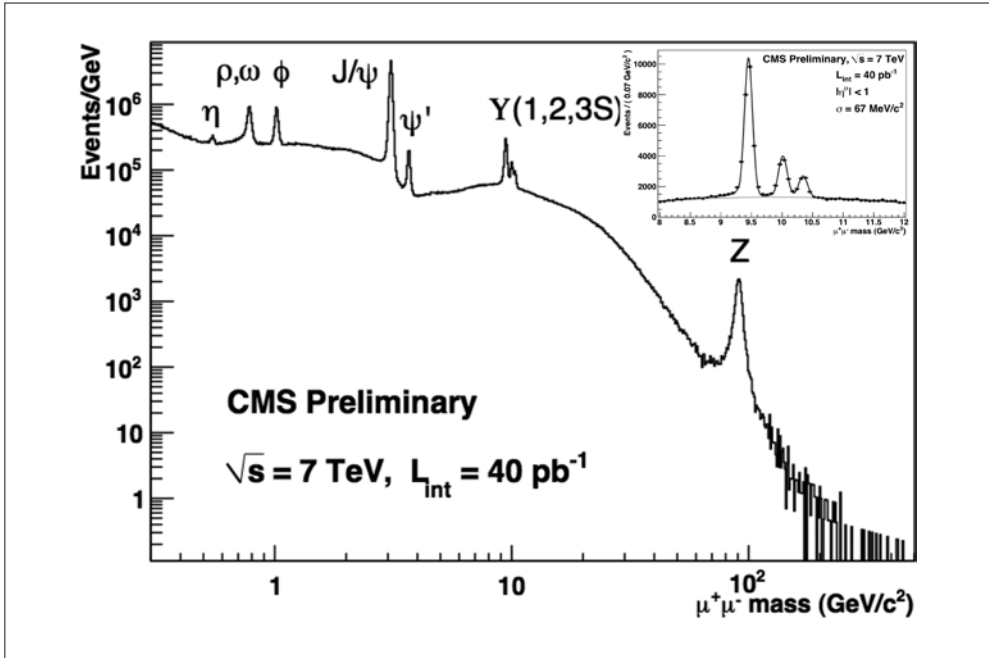


Fig. 3 The distribution of the invariant mass for di-muon events, shown here from CMS, displays the various well-known resonant states of the SM. The inset illustrates the excellent mass resolution for the three states of the Y family.

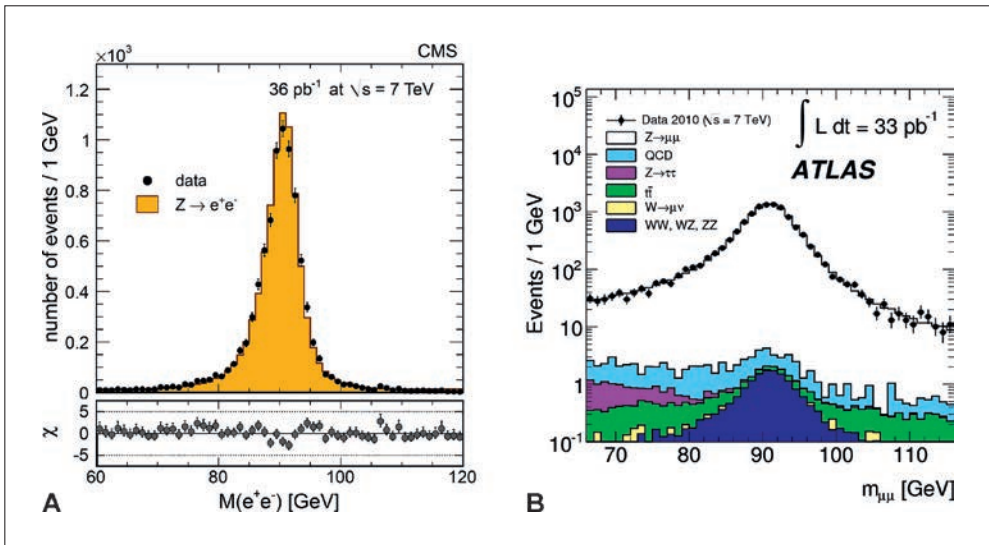


Fig. 4 The CMS electron-pair mass distribution on a linear (A) and the ATLAS muon-pair mass distribution on a logarithmic (B) vertical scale, in the Z mass region. The estimated small background contributions are indicated, as well as the expected signal shape from MC simulations.

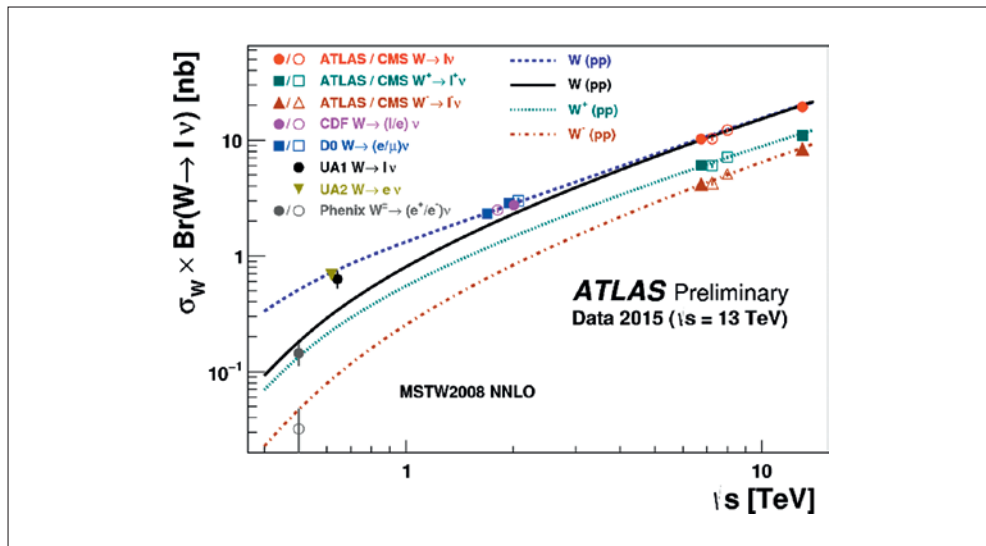


Fig. 5 ATLAS W production cross-sections times leptonic branching ratio as a function of the collision energy, showing also previous measurements at lower energy colliders.

dictions as a function of the collision energy. Detailed measurements of properties for IVB production and decay at the LHC have been published already and are being refined now with the full Run-1 data samples. They include, for example, the lepton charge asymmetry measurements for W decays, which were an important signature of the electro-weak nature of the W at the time of their discovery some 30 years ago.

Hard collisions (characterized by having final state particles with significant transverse energy) at the LHC are dominated by the production of high transverse momentum jets, which are the collimated sprays of particles from the hadronization of the initially scattered partons (quarks, gluons) in the colliding protons. At work is the strong interaction described by Quantum Chromo Dynamics (QCD). Most commonly two jets emerge at opposite azimuth with balanced transverse momenta, from an initially lowest order parton-parton scattering process. However, higher order QCD corrections alter this picture significantly, and detailed measurements of multi-jet configurations are very important to constrain the QCD descriptions of hadronic processes.

The heaviest known particle in the SM is the top quark with its roughly 175 GeV mass. It decays almost exclusively into a W and a bottom quark. The measurement of top quark pair production typically requests that at least one of the W decays leptonically (also needed to trigger the events), and therefore the final states require one or two leptons (electrons or muons), E_T^{miss} , and jets, some of which, coming from the b-quarks, can be tagged by the displaced secondary vertices due to the finite life times of b-hadrons. Whilst it is beyond the scope of these notes to describe the sophisticated analyses employed, the message is that there are clear top pair signals in ATLAS and CMS, both in the single and two-lepton channels, when considering the correct jet topologies. The resulting cross-sections are shown in Figure 6 which also illustrates the expected large rise of the cross-section with the collision energy increase from 2 TeV at the Tevatron to 13 TeV

at the LHC. Good agreement with NLO QCD calculations is seen within the present few percent measurement errors. It can be mentioned that both ATLAS and CMS have also reported first rare single top measurements (events with just one top quark) at a rate in good agreement with theoretical expectations, as well as detailed studies of top properties like its mass.

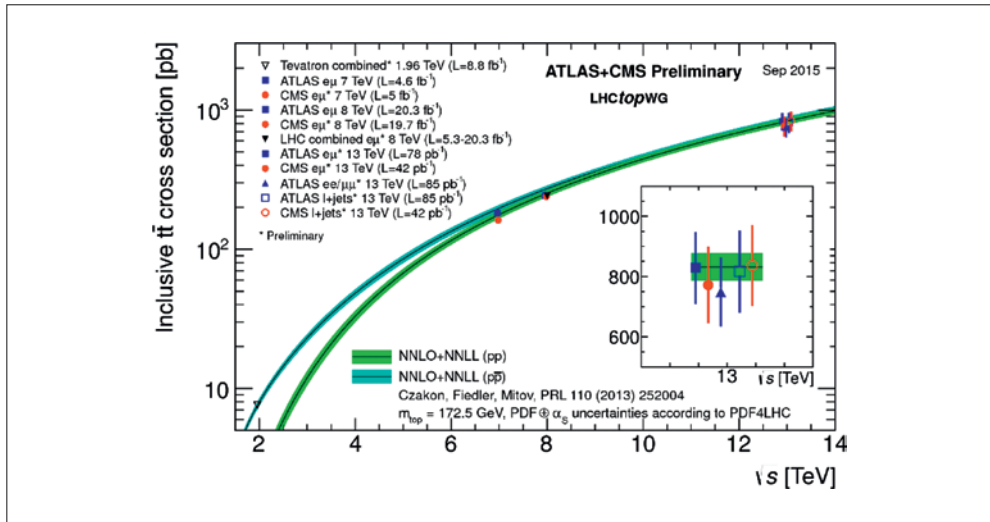


Fig. 6 Top pair production cross-section as a function of the collision energy, showing the Tevatron and LHC measurements

At this stage one can note that the data collected in the first three years of high-energy LHC operation have allowed ATLAS and CMS to make numerous precise measurements of SM processes, including production of bottom and top quarks, W and Z bosons, singly and in pairs. In particular very detailed measurements of QCD processes have been made. The very diverse measurements, probing cross-sections over a range of many orders of magnitude, confirm the predictions of the SM within the errors in all cases. Establishing this agreement is essential before any claims for discoveries can be made, i. e. to demonstrate on the one hand that the detector performance is well understood, and on the other hand that known SM processes are correctly observed in the experiments as they often constitute large backgrounds to signatures of new physics, such as those expected for the Higgs boson.

3.2 Discovery and Measurements of the Higgs Boson

The discovery of a heavy scalar boson was announced jointly by the ATLAS and CMS Collaborations (*ATLAS Collaboration 2012*, *CMS Collaboration 2012*) on 4th July 2012 with a partial data sample corresponding to about 10 fb⁻¹ coming to about equal parts from running at 7 TeV collision energy in 2011 and 8 TeV in 2012 until June. The fantastic performance of the LHC during the second half of 2012 allowed the experiments to more than

double their data sets. By the end of 2012 (LHC Run-1) the total amount of data that had been examined corresponded to $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$ at $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ and $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$ at $\sqrt{s}=8 \text{ TeV}$, equating to the examination of some 2000 trillion proton-proton collisions. Using these data first measurements of the properties of the new boson were also made.

3.3 Decays to Bosons: The $H \rightarrow \gamma\gamma$, the $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Leptons}$ and $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$ Decay Modes

As examples for the full data sets, the results from the ATLAS experiment are shown for the $H \rightarrow \gamma\gamma$ decay mode (Fig. 7A) and those from the CMS experiment for the $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 l$ mode (Fig. 7B). The signal is unmistakable, and the significances are summarized in Table 2. The data show a clear excess of events above the expected background around 125 GeV. The search for $H \rightarrow WW$ is primarily based on the study of the final state in which both W bosons decay leptonically, resulting in a signature with two isolated, oppositely charged, high p_T leptons (electrons or muons) and large E_T^{miss} due to the undetected neutrinos. The signal sensitivity is improved by separating events according to lepton flavour; into e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, and $e\mu$ samples, and according to jet multiplicity into 0-jet and 1-jet samples. The dominant background arises from irreducible non-resonant WW production.

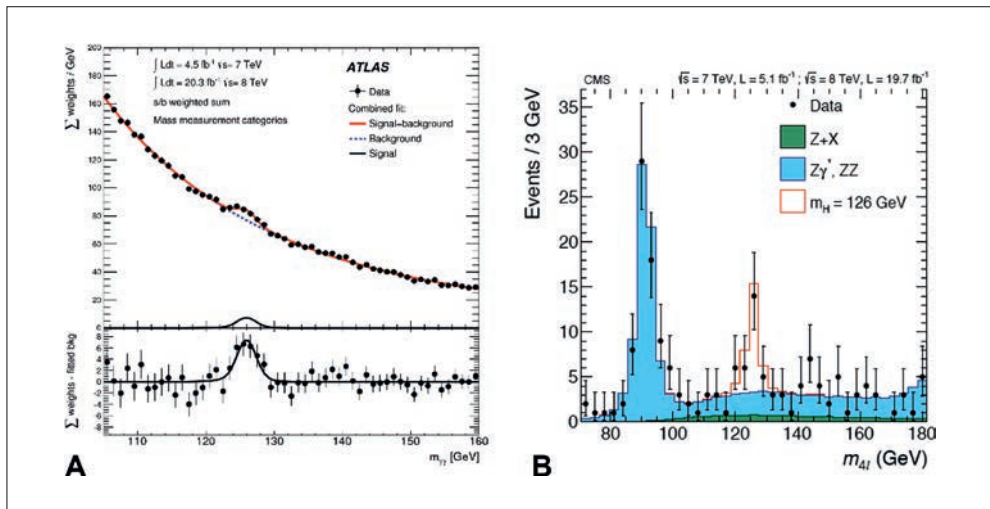


Fig. 7 (A) Invariant mass distribution of di-photon candidates. The result of a fit to the background described by a polynomial and the sum of signal components is superimposed. The bottom inset displays the residuals of the data with respect to the fitted background component. (B) Invariant mass distribution of 4 leptons (electrons, muons) in the CMS experiment for selected candidates relative to the background expectation. The expected signal contribution is also shown.

3.4 Decays to Fermions: The $H \rightarrow \tau\tau$ and the $H \rightarrow bb$ Decay Modes

It is important to establish whether this new particle also couples to fermions, and in particular to down-type fermions, since the measurements above mainly constrain the couplings to the up-type top quark (indirectly from the production). Determination of the

couplings to down-type fermions requires direct measurement of the Higgs boson decays to bottom quarks and τ leptons. These analyses are very involved, and describing them would be beyond the scope of this report. Indications of signals have been observed, as specified in Table 2, albeit still with limited statistical significance with the present data samples available.

Tab. 2 The expected and observed signals in ATLAS and CMS expressed as the corresponding number of standard deviations of the observed excess from the background-only hypothesis, for $m_H = 125$ GeV, for various decay modes

| Experiment Decay mode | ATLAS | | CMS | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Expected (σ) | Observed (σ) | Expected (σ) | Observed (σ) |
| $\gamma\gamma$ | 4.6 | 5.2 | 5.3 | 5.6 |
| ZZ | 6.2 | 8.1 | 6.3 | 6.5 |
| WW | 5.8 | 6.1 | 5.4 | 4.7 |
| bb | 2.6 | 1.4 | 2.6 | 2.0 |
| $\tau\tau$ | 3.4 | 4.5 | 3.9 | 3.8 |

3.5 Higgs Boson Properties

Both ATLAS and CMS experiments have separately combined their measurements of the mass of the Higgs bosons from the two channels that have the best mass resolution, namely $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$. The signal in all channels is assumed to be due to a state with a unique mass. The obtained values are

from ATLAS $m_H = 125.36 \pm 0.37(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$ GeV and

from CMS $m_H = 125.02 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst})$ GeV,

in excellent agreement. The two experiments have then combined in a global analyses their measurements, and determined the Higgs boson mass to be

$m_H = 125.09 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.11(\text{syst})$ GeV, meaning with a remarkable accuracy of 0.2%.

To establish whether or not the newly found state is the Higgs boson of the SM, one needs to precisely measure its other properties and attributes. Several tests of compatibility of the observed excesses with those expected from a standard model Higgs boson have been made.

In one comparison, labelled as the signal strength $\mu = \sigma/\sigma_{\text{SM}}$, the measured production times decay rate of the signal is compared with the SM expectation, determined for each decay mode individually and for the overall combination of all channels. A signal strength of one would be indicative of a SM Higgs boson. For all observed decay channels the measurements are compatible with the SM predictions, and the combined result is $\mu = 1.09 \pm 0.11$, in good agreement with the expectation from the SM.

Another key to the identity of the new boson is its quantum numbers amongst which is the spin-parity (J^P). The angular distributions of the decay particles can be used to test various spin hypotheses. Detailed analyses show that the expected spin-parity $J^P = 0^+$ hypothesis for a SM Higgs boson is strongly favoured by both experiment, with the alternatives hypotheses rejected with confidence levels larger than 97.8%.

4. Beyond the Standard Model at the LHC

Besides the quest to elucidate the mechanism of the electro-weak symmetry breaking by searching for the Higgs boson, the major excitement for LHC comes from the great potential to explore uncharted territory of physics Beyond the Standard Model (BSM), thanks to its highest collision energy ever available in a laboratory so far. Since the beginning of the project, the search for Supersymmetry (SUSY) was a strong motivation, and besides the H boson it has been the other main benchmark physics that was guiding the detector designs. However, many other hypothetical new processes can be searched for, and indeed ATLAS and CMS have already reported in many publications a very broad spectrum of searches for BSM signatures (mass peaks for new particles or kinematical distributions with deviations from the expectations of known physics processes). No such new effect has yet been found, and all of these searches result in highly-improved, stringent exclusion limits, often well beyond the 1 TeV scale already. Only a few examples are mentioned below.

The most popular searches concern SUSY, which predicts additional fundamental particles. The search for SUSY is motivated in part by the prospect that the lightest stable neutral SUSY particle (LSP) could be an excellent candidate for explaining the Dark Matter (DM) in the Universe. The mysterious existence of DM was postulated by Fritz ZWICKY, and rather convincingly evidenced by Vera RUBIN, both astronomers, in the 1930s and 1970s, respectively.

The SUSY searches at LHC are very complex as they must be sensitive to many (model-dependent) decay chains, implying a large variety of possible final state topologies. A common feature for most of them is the existence of significant missing transverse energy, E_T^{miss} , due to the escaping LSPs (an experimental signature similar to that of the neutrinos in the W decays). Furthermore, the SUSY signatures often include high transverse momentum jets, some tagged as b-jets for third-generation squarks as particularly motivated by so-called naturalness arguments, and leptons. The expected topologies depend not only on the model parameters, but also on the mass relations between various squarks and gluinos (the SUSY partners of the SM quarks and the gluons). A summary of 95% CL mass exclusion regions from many SUSY searches is shown in Figure 8 from ATLAS.

Many other searches aimed at exploring BSM physics have been conducted, at this stage all without finding anywhere an excess of observed event rates over the expected backgrounds from the known SM processes. However, much more stringent limits and constraints could be established than what were available up to now.

5. Outlook

The LHC has just started operation again in 2015 with Run-2 at the collision energy of 13 TeV, increasing eventually to 14 TeV in the coming years. Together with the increase in energy there will be also an increase in the luminosity, bringing the LHC to its full design performance ($14 \text{ TeV}, 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). The projected integrated luminosity by 2022 is about 300 fb^{-1} . The increased energy means larger cross-sections, particularly striking for heavy objects. It is therefore with great expectations that the experiments are looking forward to collect data in the forthcoming Run-2 and Run-3 periods, covering the initial LHC project planning.

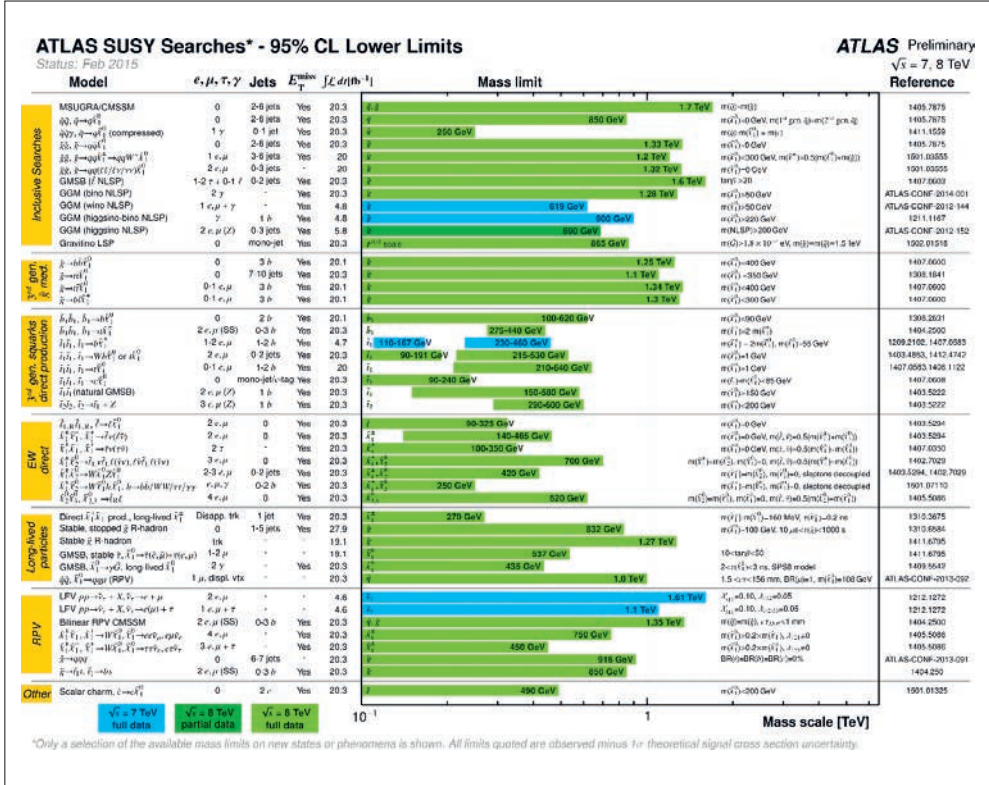


Fig. 8 A summary of 95% CL mass exclusion limits from many SUSY searches as obtained by ATLAS (similar results are available from CMS as well).

The roadmap of physics at the LHC beyond its initial design phase, with typically 300 fb⁻¹ integrated luminosity until the early 2020s, has dramatically changed with the discovery of the Higgs-like boson. Not only will there be the unchallenged window for directly observable hypothetical heavy mass particles, messengers of new physics beyond the Standard Model, but also a clear task to investigate in greatest details the properties of the new boson. Needless to say, this basic scenario could well be strongly enriched further if the forthcoming 14 TeV data of the current decade would reveal any new BSM physics, which would then be of course exploited best with the highest available integrated luminosity.

These prospects have strongly motivated to launch a very mayor high luminosity upgrade project planning both for the experiments and the LHC machine, called the HL-LHC, with the goal to integrate a tenfold luminosity (3000 fb⁻¹) by the early 2030s.

References

ALICE Collaboration: The ALICE experiment at the LHC. JINST 3, S08002 (2008)
 ATLAS Collaboration: The ATLAS experiment at the LHC. JINST 3, S08003 (2008)
 ATLAS Collaboration: Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Phys. Lett. B 716, 1 (2012)

- CMS Collaboration: The CMS experiment at the LHC. JINST 3, S08004 (2008)
- CMS Collaboration: Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. Phys. Lett. B 716, 30 (2012)
- DELLA NEGRA, M., JENNI, P., and VIRDEE, T. S.: Journey in the search for the Higgs boson: The ATLAS and CMS experiments at the Large Hadron Collider. Science 338/6114, 1560–1568 (2012)
<http://www.sciencemag.org/content/338/6114/1560.full.html>
- ENGLERT, F., and BROUT, R.: Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons. Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964)
- EVANS, L. (Ed.): The Large Hadron Collider, a Marvel of Technology. Lausanne: EPFL Press 2009
- GLASHOW, S. L.: Partial-symmetries of weak interactions. Nucl. Phys. 22, 579 (1961)
- GRANNIS, P., and JENNI, P.: The evolution of hadron-collider experiments. Phys. Today 66/6, 38 (2013)
- GURALNIK, G. S., HAGEN, C. R., and KIBBLE, T. W. B.: Global conservation laws and massless particles. Phys. Rev. Lett. 13, 585 (1964)
- HIGGS, P. W.: Broken symmetries, massless particles and gauge fields. Phys. Lett. 12, 132 (1964a)
- HIGGS, P. W.: Broken symmetries and the masses of gauge bosons. Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964b)
- HIGGS, P. W.: Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons. Phys. Rev. 145, 1156 (1966)
- JENNI, P., and VIRDEE, T. S.: The discovery of the Higgs boson at the LHC. In: SCHOPPER, H., and DI LELLA, L. (Eds.): 60 Years of CERN Experiments and Discoveries. Advanced Series on Directions in High Energy Physics Vol. 23, pp. 1–30. Singapore (et al.): World Scientific 2015
- KIBBLE, T. W. B.: Symmetry breaking in non-Abelian gauge theories. Phys. Rev. 155, 1554 (1967)
- LHCb Collaboration: The LHCb detector at the LHC. JINST 3, S08005 (2008)
- LLEWELLYN SMITH, C.: How the LHC came to be. Nature 448, 281 (2007)
- SALAM, A.: Weak and electromagnetic interactions. In: SVARTHOLM, N. (Ed.): Proceedings of the Eighth Nobel Symposium; p. 367. Almquist & Wiskell 1968
- WEINBERG, S.: A model of leptons. Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967)

Prof. Dr. Peter JENNI
CERN
1211 Genève 23
Schweiz
Phone: +41 22 7673046
Fax: +41 22 7678350
E-Mail: peter.jenni@cern.ch

Die Spiegelsymmetrie des Raumes und die Chiralität in Chemie, Physik und in der biologischen Evolution

Martin QUACK ML (Zürich, Schweiz)

Mitglied des Präsidiums der Akademie



Zusammenfassung

Die Spiegelsymmetrie des Raumes gehört zu den grundlegenden Symmetrien der Physik. Sie ist verknüpft mit der Erhaltung der Quantenzahl Parität und einer grundsätzlich nicht beobachtbaren Eigenschaft des Raumes, etwa im Sinne eines absoluten „rechts“- oder „links“-Koordinatensystems. Die Entdeckung der Verletzung dieser Symmetrie – die Nichterhaltung der Parität oder Paritätsverletzung – 1956/1957 hat die weitere Entwicklung der Physik maßgeblich beeinflusst.

In der Chemie ist die Spiegelsymmetrie des Raumes mit der Existenz von symmetrisch exakt äquivalenten Spiegelbildisomeren, den Enantiomeren chiraler, „händiger“ Moleküle (von griechisch $\chi\epsilon\rho$ für Hand) verbunden, die sich zueinander wie Bild und Spiegelbild oder wie die idealisierte linke und rechte Hand verhalten. Paritätsverletzung führt zu einem extrem kleinen „paritätsverletzenden“ Energieunterschied zwischen Enantiomeren, der theoretisch molekülabhängig zu etwa 100 Attoelektronenvolt (100 aeV, entsprechend etwa 10^{-11} J/mol) berechnet wird, aber bisher noch nicht experimentell nachgewiesen wurde. Wir zeigen, wie mit spektroskopischen Experimenten, die zwar schwierig, aber im Vergleich zu Experimenten der Hochenergiephysik noch sehr einfach sind, einige grundlegende Fragen der Physik beantwortet werden können, da sie Symmetrien und ihre Verletzungen betreffen, die beiden Arten von Experimenten zugänglich sind.

In der Biochemie und Molekularbiologie gehört die Evolution der Homochiralität, also das praktisch ausschließliche Vorkommen von jeweils nur einer chiralen Form (den L-Aminosäuren und D-Zuckern, nicht aber den entsprechenden D- und L-Enantiomeren) in den Biopolymeren (Proteine und DNA) bei allen bekannten Lebewesen zu den großen, seit mehr als hundert Jahren ungelösten Fragen. In der Astrobiologie könnte der spektroskopische Nachweis der Homochiralität als starkes Indiz für die Existenz außerirdischen Lebens verwendet werden.

In dem Vortrag werden diese verwandten Fragestellungen aus verschiedenen Gebieten auf einer gemeinsamen Grundlage der Symmetrie des Raumes behandelt, und es wird über den aktuellen Stand ihrer Beantwortung berichtet.

Abstract

The reflection (or “mirror”) symmetry of space is among the fundamental symmetries of physics. It is connected with the conservation law for the quantum number parity and a fundamental “non-observable” property of space (as defined by an absolute “left-handed” or “right-handed” coordinate system). The discovery of the violation of this symmetry – the non-conservation of parity or “parity violation” – in 1956/1957 has had an important influence on the further development of physics.

In chemistry the mirror symmetry of space is connected with the existence of symmetrically exactly equivalent “mirror image isomers”, the enantiomers of chiral (“handed”, from Greek $\chi\epsilon\rho$ for hand) molecules, which relate to each other as image and mirror image or as idealized left and right hand. Parity violation results in an extremely small “parity violating” energy difference between enantiomers, which can be theoretically calculated to be about 100 aeV (equivalent to about 10^{-11} J/mol), depending on the molecule, but which has not yet been detected experimentally. We show, how with spectroscopic experiments, which are difficult, but much simpler than the experiments in high energy physics, one can answer some fundamental questions of physics, as they relate to symmetries and their violation, detectable by both types of experiment.

In biochemistry and molecular biology one finds a related fundamental question unanswered since more than 100 years: The evolution of “homochirality”, which is the practically exclusive existence of one chiral, enantiomeric form in the biopolymers of all known forms of life (the L-aminoacids in proteins and the D-sugars in DNA, not the reverse D-aminoacids and L-sugars). In astrobiology the spectroscopic detection of homochirality could be used as strong evidence for the existence of extra-terrestrial life, if any.

In the lecture we discuss the related questions from these different areas on a common ground of the symmetry of space, and we report about the current status of answering these questions.

1. Einleitung

Symmetrie und Asymmetrie als Thema der Jahresversammlung 2015 umfasst weite Bereiche der menschlichen Kultur, in Wissenschaft und Kunst und darüber hinaus. Das ist erkennbar schon aus der Festrede der Kanzlerin Angela MERKEL, wo auch die Rolle von Symmetrie und Asymmetrien im sozialen Bereich, bei Mehrheitsverhältnissen oder in „asymmetrischen“ internationalen Konflikten angesprochen wurde, die Asymmetrien im Datenschutz wie auch die Frage einer fairen, also nicht allzu asymmetrischen Verteilung von Lasten in politischen Fragen, sei es bei der Klimafrage oder bei der Versorgung von Flüchtlingen (MERKEL 2016). Auch die Grußworte des Ministerpräsidenten Reiner HASELOFF stellten einen Bezug des Themas zur Politik her, etwa bei der Notwendigkeit der Asymmetrie von Stimmenverhältnissen bei der demokratischen Entscheidungsfindung – neben seiner Erinnerung an die Studienzeit, die ihn mit Symmetrien in der Physik vertraut machte (SCHMUTZER 1972).

Von den weiteren Rednern auf der Jahresversammlung gibt es Beiträge aus dem Bereich der Physik von Harald FRITZSCH (2016), Gerald GABRIELSE (2016) und Peter JENNI (2016) (insbesondere auch aus der Hochenergiephysik), aus der Astrophysik und Kosmologie von Günther HASINGER (2016), aus der Kristallographie von Daniel SHECHTMAN (2015), aus der Mathematik von Anna WIENHARD (2016). Weitere Beiträge kommen aus der Biologie, biophysikalischen Chemie und Medizin von Ansgar BÜSCHGES (2016), Petra SCHWILLE (2015), Sabine WERNER (2016) und Leena BRUCKNER-TUDERMAN (2015) sowie schließlich aus der Wissenschaftsgeschichte und -theorie von Giora HON und Bernard R. GOLDSTEIN (2016) und Andreas KABLITZ (2016), aus der Philosophie von Dieter BIRNBACHER (2016) und aus Kunst und Architektur von Horst BREDEKAMP (2016).

Mein Vortrag soll eine Brücke schlagen zwischen Grundlagenphysik, Chemie und biologischer Evolution. Das wollen wir mit Hilfe des sehr bemerkenswerten Beispiels der Chiralität oder Händigkeit erläutern, die wir auf unterschiedliche Weise in der Natur vorfinden. Diese Brücke findet sich im Bereich der Physikalischen Chemie (QUACK 2014a, b, 2015b). Tabelle 1 zeigt eine Betrachtung von Friedrich HUND (1957), ergänzt durch QUACK (2014a), zur Begreifbarkeit der Natur aus Sicht der Naturwissenschaft, welche die physikalisch-chemischen Prozesse im Zentrum und als Bindeglied zwischen Atom- und Elementarteilchenphysik und der Biologie mit dem in vieler Hinsicht rätselhaften und komplexen Phänomen des Lebens betrachtet. Auf diese Verknüpfungen werde ich in meinem Beitrag genauer eingehen.

Tab. 1 Die Begreifbarkeit der Natur nach HUND (1957) und QUACK (2014a; siehe auch QUACK 1993b, 1995b)

| Friedrich Hund (ML) – Die Begreifbarkeit der Natur (1957) | |
|---|---|
| Geist | Spirit-Mind |
| Seele | Soul |
| Leben | Life |
| Physikalisch-Chemische Prozesse | Physical-Chemical Processes |
| Atom | Atom |
| Elementarteilchen | Elementary Particles |
| Elementare Materie | Elementary Matter |
| Friedrich HUND (1957): | Can this continued at the bottom? |
| Martin QUACK (1990): | Yes by Geist = Underlying Fundamental Laws = Mind |

Die Naturwissenschaft setzt in der Regel die Existenz einer externen Realität voraus, die uns mit den beobachteten Tatsachen konfrontiert (QUACK 2015a). Nun besteht die Naturwissenschaft nicht einfach im Sammeln von solchen Tatsachen, wie POINCARÉ sehr schön zum Ausdruck gebracht hat (QUACK 2014a, 2015a):

„On fait de la science avec des faits comme on fait une maison avec des pierres; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres est une maison.“¹

(„Wissenschaft wird aus Tatsachen aufgebaut, so wie ein Haus aus Steinen aufgebaut wird; aber eine Anhäufung von Tatsachen ist genauso wenig eine Wissenschaft, wie ein Steinhaufen ein Haus wäre.“)²

Wir ordnen und „verstehen“ die beobachteten Tatsachen durch Modelle, Hypothesen und Theorien, auch im Rahmen von „Naturgesetzen“ (Abb. 1). Hierbei spielen oft Symmetrien als grundlegende Eigenschaften in Modellen und Theorien eine besondere Rolle. In der Tat kann man Symmetrien in Beziehung setzen zu einem Konzept grundlegender „Beobachtbarkeit“, wie ich hier am Beispiel der Spiegelsymmetrie des Raumes und der Chiralität genauer erläutern werde.

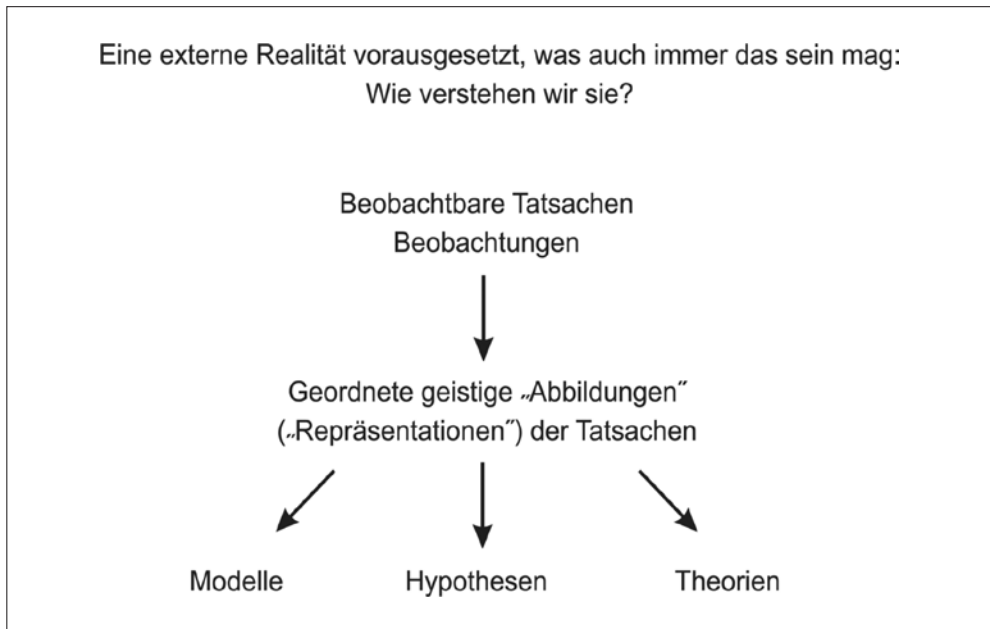


Abb. 1 Naturwissenschaftliches Verständnis durch Ordnung der „Tatsachen der Realität“ mit Modellen, Hypothesen und Theorien (nach QUACK 2014a, 2015a). In diesen spielen auf einer weiteren Ebene Symmetrien und ihre Verletzungen im Zusammenhang mit „beobachtbaren Größen“ eine wichtige Rolle.

In meinem Vortrag werde ich einführend zunächst etwas zu „klassischen“, makroskopischen und quasimakroskopischen Betrachtungen der Händigkeit von Objekten wie etwa auch Molekülen und der großen ungelösten Frage der biomolekularen Homochiralität sagen.

1 POINCARÉ 1917.

2 Übersetzung aus QUACK 2014a.

Diese Konzepte haben sich über Jahrhunderte zwischen 1600 und 1990 aus Überlegungen von DESCARTES, KANT, PASTEUR, VAN'T HOFF, KELVIN, FISCHER, BIJVOET, EIGEN und PRELOG neben vielen anderen entwickelt, und ich will einige wichtige Etappen aus dieser Entwicklung beispielhaft herausgreifen. Dann werde ich auf unser heutiges quantenmechanisches Verständnis von chiralen Molekülen, den in diesem Zusammenhang wichtigen Tunneleffekt und den Einfluss der Paritätsverletzung eingehen. An diesem Beispiel will ich danach die Beziehung zu den grundlegenden Symmetrien und den Erhaltungssätzen der Physik herstellen und die Rolle der „Symmetrieverletzungen“ durch kleinere Asymmetrien sowie der „beobachtbaren Größen“ erläutern. Hier folgen wir auch besonders den Entwicklungen der Teilchen- und Atomphysik des 20. Jahrhunderts. Schließlich will ich dann auf unsere aktuellen Arbeiten auf dem langen Weg zur Messung der sehr kleinen paritätsverletzenden Energiedifferenz zwischen den Enantiomeren (Spiegelbildisomeren) von chiralen Molekülen eingehen. Mit einer Zusammenfassung und einigen Spekulationen zu offenen Fragen der CPT-Symmetrie,³ Chiralität und dunkler Materie will ich dann schließen.⁴

2. Spiegelsymmetrie des Raumes, Händigkeit und Molekulare Chiralität als quasi-makroskopische, geometrische Eigenschaft

„Was kann wohl meiner Hand oder meinem Ohr ähnlicher und in allen Stücken gleicher sein, als ihr Bild im Spiegel? Und dennoch kann ich eine solche Hand, als im Spiegel gesehen wird, nicht an die Stelle ihres Urbildes setzen, denn wenn dieses eine rechte Hand war, so ist jene im Spiegel eine linke, und das Bild des rechten Ohres ist ein linkes, das nimmermehr die Stelle des ersteren vertreten kann.“ (Immanuel KANT)⁵

Schon DESCARTES (CARTESIUS) hatte die Händigkeit seines „cartesischen“ Koordinatensystems erkannt und bemerkt, dass man bei Spiegelung am Ursprung ein symmetrisch äquivalentes Koordinatensystem anderer Händigkeit erhält. KANT hat bemerkenswerte Überlegungen zur Symmetrie von Spiegelbildobjekten mit einer Umkehrung der „Händigkeit“ bei Spiegelung und sonst identischer Struktur gemacht. Man kann die Merkwürdigkeit dieses Phänomens kaum besser als im Eingangszitat dieses Kapitels ausdrücken.

Dass Kristalle „Händigkeit“ zeigen können, war in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gut bekannt, ebenso wie die „optische Aktivität“, die zu einer Drehung der Polarisationsrichtung von linear polarisiertem Licht führt (beim Quarz durch ARAGO 1811 und BIOT 1812, 1818a, b, der auch die optische Aktivität bei organischen Flüssigkeiten wie Terpentin und Lösungen von Kampher beobachtete).⁶

Quarz bleibt ein klassisches Beispiel und Abbildung 2 zeigt ein „reales“ Paar von D- und L-Quarzkristallen, die als natürliche Fundstücke nicht die perfekte Spiegelsymmetrie zeigen, wohl aber die wesentlichen spiegelbildähnlichen Strukturmerkmale aufweisen.

3 Abgeleitet aus dem Englischen: C – charge conjugation (particle – antiparticle – symmetry), P – parity, T – time reversal.

4 Hintergrundliteratur zum Inhalt dieses Vortrages findet sich in einigen früheren Übersichtsartikeln (QUACK 1989, 1993a, b, 1995a, b, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2006, 2011a, b, c, 2012, 2014a, b, 2015a und QUACK et al. 2008).

5 KANT 1783.

6 Siehe auch BARRON 2004, BOURGOIS 1986.

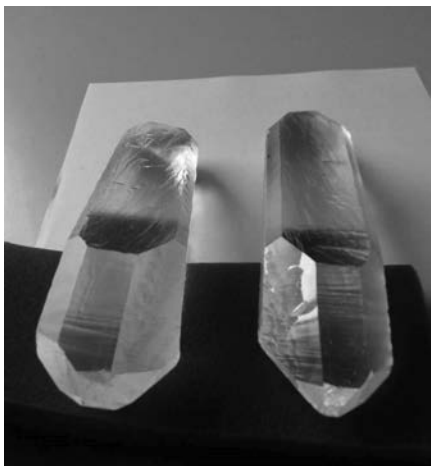


Abb. 2 Beispiele für „realen“ D- und L-Quarz (diese Kristalle sind ein Geschenk von Richard N. ZARE an den Autor).

Eines der bemerkenswertesten Experimente wurde von Louis PASTEUR (1848) durchgeführt (angeregt durch Beobachtungen von M. MITSCHERLICH). Er konnte Kristalle von Salzen der Weinsäure, die aus einer optisch nicht aktiven Lösung auskristallisiert waren, in zwei spiegelbildähnliche Gruppen von Kristallen unter dem Mikroskop „von Hand“ trennen, die nach Wiederauflösung der so getrennten unterschiedlichen Spiegelbildformen optische Aktivität mit entgegengesetzter Drehrichtung zeigten. PASTEUR schloss hieraus, dass die zugrundeliegenden Moleküle auch spiegelbildähnlich sein müssten. Er führte hierfür den Begriff „Dissymmetrie“ ein. Heute hat sich für diese Eigenschaft der viel später von Lord KELVIN (1904)⁷ eingeführte Begriff der „Chiralität“ („Händigkeit“, von griechisch *χειρ*, Hand) durchgesetzt, da die spiegelbildähnlichen Formen sich ja wie Bilder der linken und rechten Hand zueinander verhalten. Das Paar von solchen chiralen Spiegelbildisomeren bezeichnet man heute als die „Enantiomere“ des betreffenden Moleküls.

PASTEUR hat einen Bericht der „Begutachtung“ seiner Arbeit für die Publikation in den *Comptes Rendus der Académie des Sciences* (PASTEUR 1848) durch BIOT gegeben: BIOT ließ PASTEUR das Experiment vor seinen Augen wiederholen und war von dem in der Vorführung gelungenen Experiment so begeistert, dass er zu PASTEUR (damals 26 Jahre alt) sagte: „Mon cher enfant, j’ai tant aimé les sciences dans ma vie que cela me fait battre le coeur.“ Sorgfältiger kann eine Begutachtung und begeisterter ein Gutachterkommentar wohl kaum ausfallen.⁸

Während PASTEUR also schon die Dissymmetrie oder Chiralität als molekulare Spiegelbildisomerie erkannte, gab es zu dieser Zeit noch keine genauere Vorstellung von den räumlichen Strukturen der betreffenden Moleküle. Das Verdienst der Aufklärung der prinzipiellen räumlichen Struktureigenschaften solcher Moleküle kommt VAN’T HOFF und LE BEL (1874) zu.⁹ Insbesondere VAN’T HOFF hat durch eine Reihe von raffinierten Überlegungen zu möglichen und tatsächlich beobachteten Isomeren organischer Moleküle die

7 Siehe Lecture 20.

8 Siehe BOURGOIS 1986.

9 Siehe BOURGOIS 1986 und VAN’T HOFF 1887, 1899, 1908.

spiegelbildähnlichen Strukturen von chiralen Methanderivaten etabliert.¹⁰ Beispielhaft zeigt Abbildung 3 die möglichen (falschen) Strukturen des Moleküls CHFCIBr , ein Methanderivat mit vier verschiedenen Substituenten in einer ebenen Geometrie mit drei hypothetisch möglichen Isomeren (Moleküle gleicher Zusammensetzung, aber unterschiedlicher Struktur), die nicht wirklich beobachtet werden, während Abbildung 4 die wirklichen Verhältnisse bei solchen tetraedrisch aufgebauten Molekülen, mit genau zwei Spiegelbildisomeren (Enantiomeren), zeigt. Diese findet man in der Natur als unterscheidbare, optisch unterschiedlich aktive Substanzen, die sonst gleiche physikalische Eigenschaften haben, aber die Polarisations Ebene von linear polarisiertem Licht in entgegengesetzte Richtungen „drehen“. Solche Moleküle spielen in der Biochemie eine große Rolle.

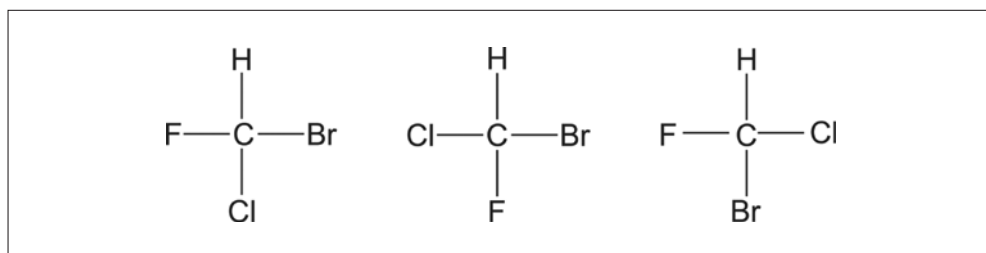


Abb. 3 Die falschen hypothetisch ebenen Strukturen mit drei unterscheidbaren planaren Isomeren des CHFCIBr -Moleküls (nach Quack 2014a)

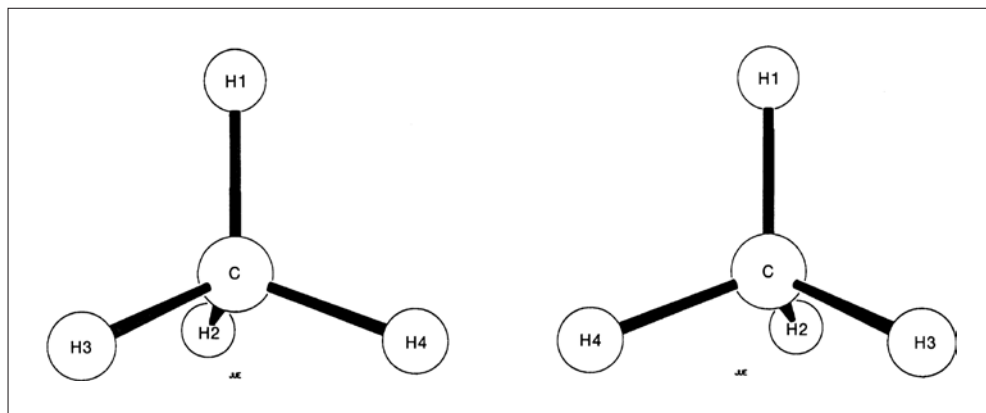


Abb. 4 Die zwei Enantiomere chiraler Methanderivate mit tetraedrischer Struktur und vier verschiedenen Substituenten (nach QUACK 2014b). Mit den drei Substituenten NH_2 , COOH und einem variablen Fragment R (für H2, H3, H4) erhält man die Aminosäuren.

Abbildung 5 zeigt die beiden Enantiomeren des Alaninmoleküls und Abbildung 6 die Enantiomeren des Glycerinaldehyds.

¹⁰ Siehe auch QUACK 2014a.

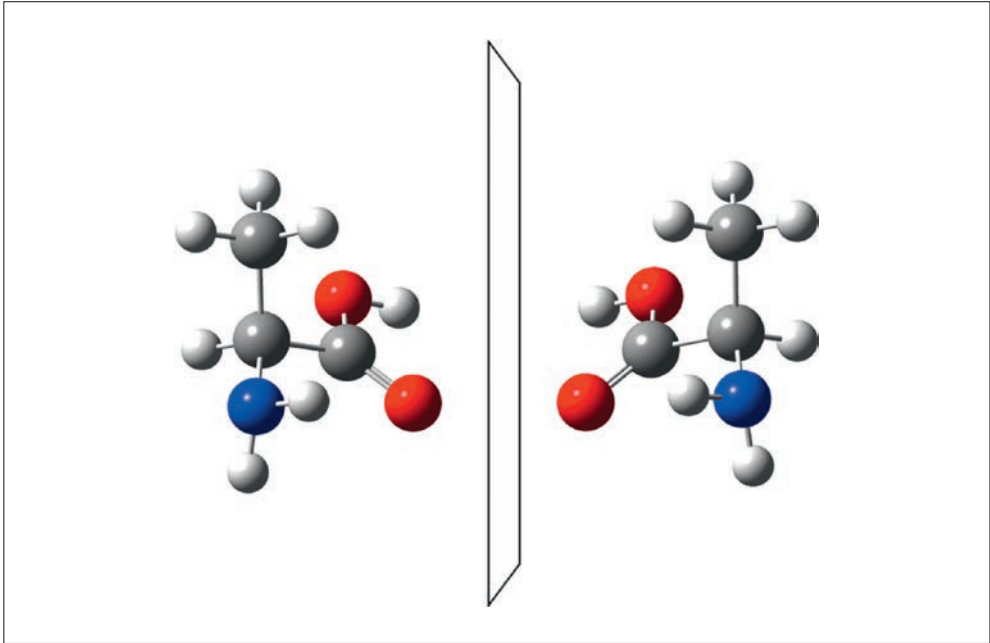


Abb. 5 Molekülmodell der beiden Enantiomeren der Aminosäure Alanin $\text{CH}(\text{CH}_3)(\text{NH}_2)(\text{COOH})$ (weißgrau: Wasserstoff H, dunkelgrau: Kohlenstoff C, blau: Stickstoff N, rot: Sauerstoff O)

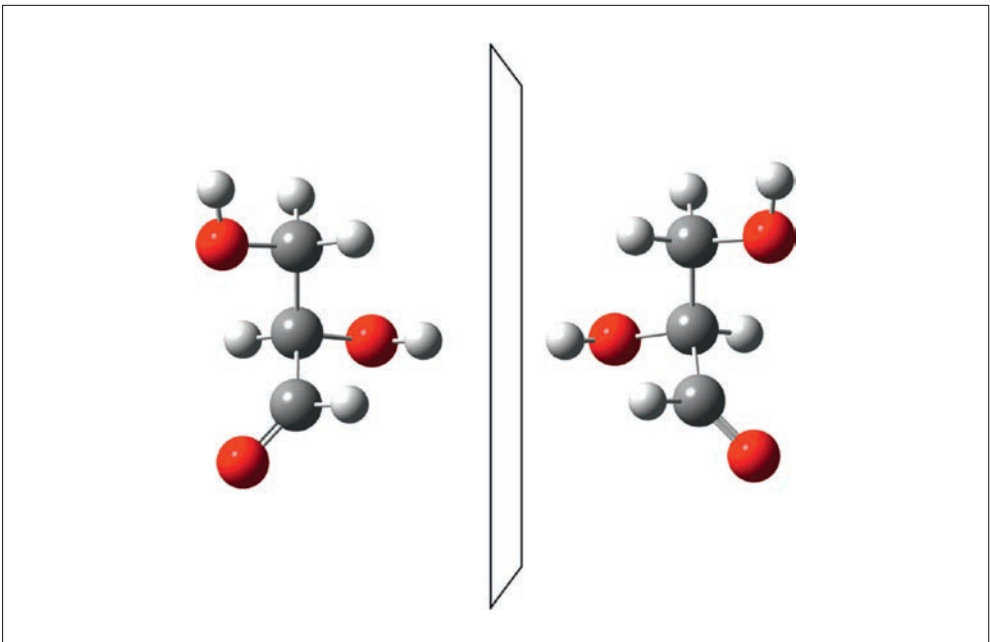


Abb. 6 Molekülmodell der beiden Enantiomeren des „einfachsten Zuckermoleküls“ Glycerinaldehyd $\text{CH}(\text{CH}_2\text{OH})(\text{OH})\text{CHO}$ (siehe auch Abb. 5)

Abbildung 7 zeigt Bild und Spiegelbild eines regulären Tetraeders mit vier gleichen Substituenten, wie beim Methanmolekül CH_4 . Hier findet man keine unterschiedlichen Enantiomeren, da die Spiegelbilder identisch sind und durch eine einfache Rotation im Raum ineinander übergeführt werden: die Spiegelbilder beschreiben das gleiche Molekül.

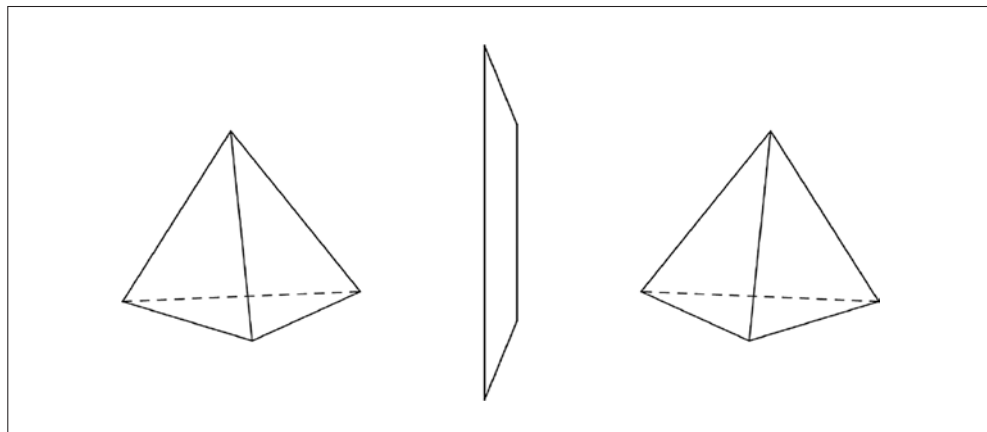


Abb. 7 Symmetrischer Tetraeder (achiral, „nicht händig“)

Die Enantiomere chiraler Moleküle sind zwar durch ihre Händigkeit unterscheidbar, aber ansonsten symmetrisch äquivalent, also z. B. von gleicher Energie, gleicher Verbrennungsenergie usw. VAN'T HOFF (1887) hat diese Symmetrie klar erkannt und zum Ausdruck gebracht. Für das chemische Gleichgewicht zwischen den D- und L-Enantiomeren schreibt er:

„[...] Un tel équilibre dépend du travail (E) que la transformation peut produire, travail, qui doit être égal à zéro dans le cas en question, vue la symétrie mécanique parfaite des deux isomères [...]“¹¹

(„Ein solches Gleichgewicht hängt von der Arbeit (E) ab, die eine solche Umwandlung hervorbringen kann, eine Arbeit, die gleich Null sein muss in einem solchen Fall wegen der perfekten mechanischen Symmetrie der beiden Isomeren.“)

Die moderne Cahn-Ingold-Prelog-Nomenklatur (CAHN et al. 1966) schreibt hierfür R und S):

$$R (D) \rightleftharpoons S (L) \quad [1]$$

$$\ln K = -\frac{\Delta_R G^\circ(T)}{RT} = 0 \quad [2]$$

$$\Delta_R S^\circ(T) = 0 \quad \text{alle } T \quad [3]$$

$$\Delta_R H^\circ(T) = 0 \quad \text{alle } T \quad [4]$$

$$E_D^0 = E_L^0 \quad [5]$$

¹¹ VAN'T HOFF 1887.

$$\Delta_R G^\ominus(T) = \Delta H^\ominus(T) - T\Delta S^\ominus(T) \quad [6]$$

$$K = [S]/[R] = 1 \quad [7]$$

Wir haben in den Gleichungen die moderne Schreibweise für die freie Energie der Reaktion $\Delta_R G^\ominus$ statt der „Arbeit“ E verwendet sowie die Beziehung $\Delta_R G^\ominus(T) = \Delta_R H^\ominus(T) - T\Delta_R S^\ominus(T)$ nach VAN'T HOFF in moderner Schreibweise für die Entropie S und Enthalpie H .

Ende des 19. Jahrhunderts war also diese Situation bekannt und gut verstanden. Sie entspricht auch heute noch dem „Standardlehrbuchwissen“ der organischen Chemie, wobei wir noch sehen werden, dass diese Beschreibung durch eine kleine, tatsächlich vorhandene (theoretisch vorhergesagte) Asymmetrie ergänzt werden muss. VAN'T HOFF verwendet hier implizit das Konzept der „Spiegelungssymmetrie des Raumes“ (Paritätssymmetrie), die aber nach heutiger Kenntnis nicht exakt gilt (siehe Kap. 4). Die heutige Vorhersage für eine Abweichung der Gleichgewichtskonstanten K von 1 liegt in der Größenordnung 10^{-14} (also $K = 1 \pm 10^{-14}$), was in der Praxis allerdings eine unmessbar kleine Abweichung ist (QUACK 2011c). Eine weitere Beobachtung kam auch noch im 19. Jahrhundert hinzu: Die biochemische Selektivität bezüglich enantiomerer Strukturen und die biomolekulare „Homochiralität“.

3. Biomolekulare Chiralität als charakteristische Eigenschaft der Chemie des Lebens

„Si les principes immédiats de la vie immédiate sont dissymétriques, c'est que, à leur élaboration, président des forces cosmiques dissymétriques; c'est là, suivant moi, un des liens entre la vie à la surface de la terre et le cosmos, c'est à dire l'ensemble des forces répandues dans l'univers.“ (LOUIS PASTEUR)¹²

(„Wenn die unmittelbaren Grundlagen des unmittelbaren Lebens dissymmetrisch sind, dann, weil bei ihrer Entwicklung dissymmetrische kosmische Kräfte wirken, das ist meiner Meinung nach eines der Bande zwischen dem Leben auf der Erde und dem Kosmos, das heißt der Gesamtheit der im Universum vorhandenen Kräfte [...]“)¹³

PASTEUR bezieht sich in diesem Zitat auf den schon ihm bekannten Befund, dass natürliche chirale „dissymmetrische“ Moleküle wie die Aminosäuren und die Zucker in der Regel nur in einer der beiden enantiomeren Formen vorkommen. Auch die Weinsäure im normalen Wein und die daraus kristallisierenden Salze (Weinstein) zeigen nur eine der enantiomeren Formen, während auf andere Weise gewonnene, synthetisierte Weinsäure (damals „para-Weinsäure“) aus einer je hälftigen Mischung der beiden Formen besteht, das sogenannte „Racemat“, das er aus der Kristallmischung von Hand trennen konnte. Nachdem WÖHLER durch die Synthese des Harnstoffs aus einem anorganischen Vorläufer gezeigt hatte, dass die „gewöhnliche“ organische Chemie auch ohne Lebensprozesse synthetisch und auch aus anorganischen Grundstoffen zugänglich ist, war der Befund der biomolekularen Chiralität die einzige einfache verbleibende chemische Signatur von Lebensprozessen: Normale organisch-chemische Synthesen aus achiralen Grundstoffen erzeugen Racemate. Streng genommen muss man sagen, dass die biochemische Homochiralität in erster Linie für die Biopolymere gilt. Die Proteine (Eiweiße) sind nur aus L-Aminosäuren aufgebaut, die Polymere der Erbsubstanz

12 Zitiert in BOURGOIS 1986.

13 Übersetzung nach QUACK 1989.

Desoxyribonukleinsäure (DNA) enthalten nur die D-Zucker. Die jeweils komplementären Enantiomeren (D-Aminosäuren und L-Zucker) werden in den Biopolymeren nicht verwendet. Sie kommen in der belebten Natur in anderem Zusammenhang als Ausnahme für andere Verwendungen vor (etwa für bestimmte Zwecke in den Zellwänden oder auch als Gift bei Schlangen), oder sie bilden sich durch Alterungsprozesse als Verunreinigung. So wandelt sich die L-Asparaginsäure im Dentin der Zähne langsam in D-Asparaginsäure um, ein Prozess, der auch zum Datieren von Leichenfunden benutzt wird.

Die Selektivität von biologischen Prozessen für die enantiomere Struktur chiraler Moleküle wurde von Emil FISCHER (1894) bei seiner Untersuchung von Enzymreaktionen gefunden und gedeutet. Er schreibt in den Schlussworten seiner Publikation über den „Einfluss der Configuration auf die Wirkung der Enzyme“:

„Um ein Bild zu gebrauchen, will ich sagen, dass Enzym und Glucosid wie Schloss und Schlüssel zueinander passen müssen, um eine chemische Wirkung auf einander ausüben zu können. Diese Vorstellung hat jedenfalls an Wahrscheinlichkeit und an Werth für die stereochemische Forschung gewonnen [...], denn die Ueberzeugung, dass der geometrische Bau des Moleküls selbst bei Spiegelbildformen einen so grossen Einfluss auf das Spiel der chemischen Affinitäten ausübe, konnte meiner Ansicht nach nur durch neue thatsächliche Beobachtungen gewonnen werden.“¹⁴

Wenn die Lebewesen homochiral sind, so ist ihre Fähigkeit zur Unterscheidung von Enantiomeren chiraler Moleküle mit diesem Bild leicht zu verstehen. Die Enantiomeren „passen“ in die chiralen Bindungsstellen von Enzymen oder auch von Rezeptoren wie Geruchs- und Geschmacksrezeptoren sehr verschieden gut hinein, wie Schlüssel und Schloss, oder – vielleicht mit einem noch besseren Bild – wie die rechte oder linke Hand in den rechten oder linken Handschuh. Wir können die Enantiomere z. B. durch unseren Geschmackssinn unterscheiden: L-Asparagin schmeckt schwach ausgeprägt bitter, D-Asparagin schmeckt deutlich süß, was ebenfalls mit dem Schlüssel-Schloss-Prinzip von Emil FISCHER leicht verstanden werden kann. Emil FISCHER hat sich auch um die systematische Nomenklatur chiraler Moleküle verdient gemacht. Seine D- und L-Nomenklatur wird noch heute in der Biochemie viel verwendet (VOET und VOET 1992), wenn sie auch in neuerer Zeit durch die R, S (und P, M)-Nomenklatur nach CAHN, INGOLD und PRELOG (CAHN et al. 1966) ersetzt wird. FISCHER hat bereits eine einfache graphische Darstellung für die Strukturen angegeben (Fischer-Projektion), die auch die enantiomere Struktur festlegt. Zu seiner Zeit (und bis etwa 1950) wusste man aber nicht, ob die einer Substanz in einem Reaktionskolben (oder im Körper) zugeordnete Konfiguration auch dem entsprechenden makroskopischen Molekülmodell entsprach. FISCHER hat dies zunächst willkürlich als Konvention für die Festlegung relativer Konfigurationen chiraler Moleküle eingeführt. Erst um 1950 hat BIJVOET die tatsächliche absolute Konfiguration von chiralen Molekülen mit Hilfe einer speziellen Methode der Röntgenstrukturanalyse bestimmt (BIJVOET et al. 1951).¹⁵

Während die biomolekulare Selektivität für die Enantiomere chiraler Moleküle mit Hilfe dieser Konzepte verstanden werden kann, wie auch die Erhaltung einer bestimmten Homochiralität über die molekularen Mechanismen der Vererbung, bleibt der Ursprung der Homochiralität sowie die Auswahl einer bestimmten enantiomeren Form (wie der L-Aminosäuren) durch die Evolution rätselhaft. Hierzu gibt es unterschiedliche Ansichten,

¹⁴ FISCHER 1894.

¹⁵ Siehe auch DUNITZ 1979.

worauf wir in einem früheren Vortrag vor dieser Akademie hingewiesen haben (QUACK 1999). Dabei kann man mehrere „Glaubensgemeinschaften“ zur Lösung dieses Rätsels unterscheiden, mit ganz ähnlichen „Glaubensgemeinden“ zu den etwas anders gelagerten Fragen der Irreversibilität oder der zugrundeliegenden physikalischen Natur einer chiralen Struktur. Bezüglich der Evolution der biomolekularen Homochiralität können wir hier nahezu wörtlich zitieren:

„Die Frage des Ursprungs der biochemischen Selektion gewisser Enantiomere gegenüber anderen wird von den diversen ‚Glaubensgemeinden‘ kontrovers diskutiert. Wir können heute etwa die folgenden Grundhypothesen unterscheiden, die wiederum jeweils in zahlreichen unterschiedlichen Varianten existieren.

- (1) Eine stochastische ‚Alles oder Nichts‘-Selektion eines Enantiomers (D oder L) mittels eines biochemischen Selektionsmechanismus (FRANK 1953, EIGEN und WINKLER 1975, EIGEN 1971, 1982, 1987, BOLLI et al. 1997, SIEGEL 1998) oder auch abiotisch, etwa durch Kristallisation (CALVIN 1969, NICOLIS und PRIGOGINE 1981, BONNER 1995). Nach dieser Hypothese wird mit Sicherheit bei jeder Einzelevolution nur ein Enantiomer selektiert, wobei aber in vielen, separaten Evolutionsexperimenten D und L im Mittel mit gleicher Häufigkeit selektiert werden.
- (2) Eine zufällige äußere chirale Beeinflussung eines einmaligen Evolutionsvorganges selektiert bevorzugt ein Enantiomer. Schon PASTEUR und später VAN’T HOFF haben eine solche Möglichkeit in Betracht gezogen, und seither gibt es geradezu unzählige unterschiedliche Vorschläge dieser Art. Als Beispiel nennen wir hier den Start einer Evolution auf einer zufälligen chiralen Matrix, z. B. einem Linksquarkristall (KAVASMANECK und BONNER 1977). Wenn dann unter dieser Evolution einmal ein bevorzugtes Enantiomer gebildet wurde, könnte es sich dauerhaft fortpflanzen und erhalten bleiben (KUHN und WASER 1983). Auch hier könnte die Wiederholung der Evolution (z. B. dann gelegentlich auf einem Rechtsquarz) im statistischen Mittel mit gleicher Häufigkeit beide Formen (D und L) der Homochiralität erzeugen. Auch die bekannte bevorzugte Photolyse durch zirkular polarisiertes Licht (BONNER 1988) in einer lokalen Umgebung auf der Erde oder im Weltraum gehört zu solchen Hypothesen. Eine weitere Variante, die Photolyse durch zirkular polarisierte γ -Strahlung, kann hier – oder unter Berücksichtigung der Paritätsverletzung bei der β -Radioaktivität unter Punkt 4 eingeordnet werden (VESTER, et al. 1959), oder eventuell der Einfluß von Magnetfeldern (KLEINDIENST und WAGNIÈRE 1998).
- (3) Ein Tieftemperaturphasenübergang erzeugt präbiotisch (oder allgemeiner: abiotisch) ein reines Enantiomer aufgrund der paritätsverletzenden schwachen Wechselwirkung. Enantiomerenreines oder angereichertes organisches Ausgangsmaterial liefert die Grundlage für eine spätere biotische Selektion (SALAM 1991, 1992, 1995, CHELA-FLORES 1991).
- (4) Ein durch die paritätsverletzende schwache Wechselwirkung thermodynamisch oder kinetisch geringfügig begünstigtes Enantiomer wird durch nichtlineare kinetische Mechanismen bevorzugt und am Ende ausschließlich selektiert (YAMAGATA 1966, REIN 1974, KONDEPUDI und NELSON 1984, 1985, MASON 1991b, JANOSCHEK 1991, MACDERMOTT und TRANTER 1989a, b).¹⁶

Diese vier Grundhypothesen lassen sich in die beiden *De-facto*-Selektionshypothesen (1) und (2) (Zufallsselektion) und die beiden *De-lege*-Selektionshypothesen (3) und (4) (notwendige Selektion einer ganz bestimmten Form) gruppieren.

„[...] Zwischen den einzelnen Glaubensgemeinden gibt es hier gelegentlich hitzige Debatten. Nach unserer Ansicht ist die Frage völlig offen. Sicher gibt es keinerlei experimentelle Beweise. Obwohl besonders zur Hypothese (2) ein unglaubliches Datenmaterial mit unterschiedlichsten Teilhypothesen gesammelt wurde, ist nichts davon wirklich beweisend.

Es ist auch sehr schwierig, solche Beweise bei makroskopischen Experimenten zur Selektion der Chiralität durchzuführen, da es äußerst schwierig ist, Nebeneffekte auszuschließen. Ein frühes Beispiel solcher Nebeneffekte wird bei PRELOG (1991) berichtet mit einem für die Person, über die er berichtet, zu Unrecht negativen Ausgang. Die Geschichte von mehrfach wiederholten ‚Beweisen‘ und ‚Widerlegungen‘ zu Befunden von enantiomerenangereicherten Materialien in Meteoriten ist ein weiteres Beispiel. Die Behauptungen zu bevorzugt angereicherten Enantiomeren bei neuesten Kristallisationsexperimenten geben ein anderes Beispiel (SZABO-NAGY und KESZTHELYI 1999). Auf die Falschberichte zur Selektion der Chiralität in Magnetfeldern wollen wir hier nicht mehr eingehen, da sie an einem extremen Ende solcher Berichte zu finden und sicher nicht typisch sind.

16 QUACK 1999, S. 152. Siehe auch QUACK 2002.

In aller Regel ist bei all diesen makroskopischen Experimenten die Beweisführung das ungelöste Problem. Nach unserer Ansicht müssten für eine korrekte Beweisführung zugunsten einer der Hypothesen in einem Experiment zur makroskopischen Selektion der Chiralität mindestens zwei Voraussetzungen erfüllt sein. Erstens müssen alle denkbaren Kontrollexperimente desselben Typs ausgeführt werden, die mit der Zielsetzung der Widerlegung der betreffenden Hypothese beginnen. Zweitens muss der Mechanismus, der zum Ausgang des Selektionsexperimentes führt, theoretisch verstanden sein. Diese zweite Bedingung dürfte sehr schwer zu erfüllen sein. Prinzipiell ist es aber klar, dass die vier Grundhypothesen zur biologischen Homochiralität experimentell nachprüfbar und unterscheidbar sind. Man kann sich zum Beispiel vorstellen, dass ein zukünftiges Laborexperiment zur systematischen Evolution von lebenden Objekten aus toter Materie im direkten Nachbau der frühen Evolution auf der Erde entwickelt wird (EIGEN 1971). Die Wiederholung dieses Experimentes würde nach den *De-facto*-Hypothesen mit statistisch gleicher Häufigkeit ‚D‘ und ‚L‘ Leben erzeugen. Nach den *De-lege*-Hypothesen würde bevorzugt oder ausschließlich L (Aminosäure) Leben erzeugen. Wenn weiterhin der genaue Mechanismus der Lebensentstehung in diesem reproduzierbaren Experiment verstanden ist und deshalb klar ist, warum es ‚*De-facto*‘ oder ‚*De-lege*‘-Ergebnisse gibt, kann man von einem im naturwissenschaftlichen Sinne beweisenden Experiment sprechen, das die prinzipielle Frage klärt.

Die historische Frage nach dem genauen Weg der Lebensentstehung auf der Erde bleibt dabei ungeklärt und ist sicher viel schwerer, wenn überhaupt zu beantworten. Das ist aber für die prinzipiellen Hypothesen nicht relevant. In jedem Fall sind die Bedingungen für beweisende Selektionsexperimente dieser Art hinreichend problematisch, daß man sie wohl erst in der ferneren Zukunft erwarten darf.¹⁷

Allerdings gibt es schon heute ernsthafte Bestrebungen ein „synthetisches Leben“ zu konstruieren und zu verstehen (SCHWILLE 2012, 2015).

Die Frage der Evolution der biomolekularen Homochiralität ist offenbar eng mit der Frage der Lebensentstehung selbst verknüpft. Man kann den heute vorliegenden Befund einer konsistenten biologischen Homochiralität auf unserem Planeten als ein Quasi-Fossil der frühen Evolution auffassen (QUACK 2014b), dessen Interpretation bis heute rätselhaft und kontrovers bleibt. Die Situation ist noch schwieriger als bei anderen „Fossilien“ frühen Lebens (SCHOPF 1999). Wir haben in QUACK (2014b) einen Überblick gegeben über verschiedene Alternativen, die man schrittweise bezüglich der Lebensentstehung und der Homochiralität angeben kann (Abb. 8). Schon bei der ersten Frage, ob Lebensentstehung im Universum (etwa auf Exoplaneten; BONFILS et al. 2013) wahrscheinlich ist oder unwahrscheinlich, scheiden sich die Geister. In neuerer Zeit habe ich bei diversen „Abstimmungen“ mit unterschiedlichen Zuhörerschaften jeweils eine Mehrheit für „wahrscheinliche Lebensentstehung“ gefunden (auch bei der Abstimmung in meinem Vortrag bei der Leopoldina). Vor 1975 etwa schienen jedoch die Meinungen eher zu „unwahrscheinlichem Leben“ tendiert zu haben, wie es im Buch von Jacques MONOD (ML) *Le Hasard et la Nécessité* (1970) zum Ausdruck gebracht wurde. Wir können analog jeden Schritt im Entscheidungsbaum in Abbildung 8 weiterverfolgen mit jeweils verschiedenen möglichen Antworten: Es gibt viele offene Fragen in diesem Zusammenhang. Das liegt nicht daran, dass man keinerlei Erklärungen für die heutigen Befunde hätte, sondern daran, dass es eben gegensätzliche Erklärungen gibt, wobei man nicht weiß, welche richtig ist (QUACK 1993b, 1995b, EIGEN 1987). Hierzu können wir auch Manfred EIGEN (ML) zitieren:

„Natürlich gibt es – und zwar nicht nur in Bezug auf die historischen Rahmenbedingungen – noch viele offene Fragen, zum Beispiel: Auf welcher Ebene wurde die Händigkeit oder Chiralität der biologischen Makromoleküle entschieden? Wir wissen, dass alle Proteine – soweit sie durch den informations-gesteuerten Syntheseparat der Zelle produziert werden – ausschließlich von ‚links-händigen‘ Aminosäuren Gebrauch machen und daher links-gewendelte Strukturen aufbauen. Bei den Nukleinsäuren sind es die ‚rechts-händigen‘ Monomere, die ausgewählt wurden, die allerdings sowohl rechts- als auch links-gewendelte Doppelspiralen ausbilden. [...]

17 QUACK 1999, S. 152–153.

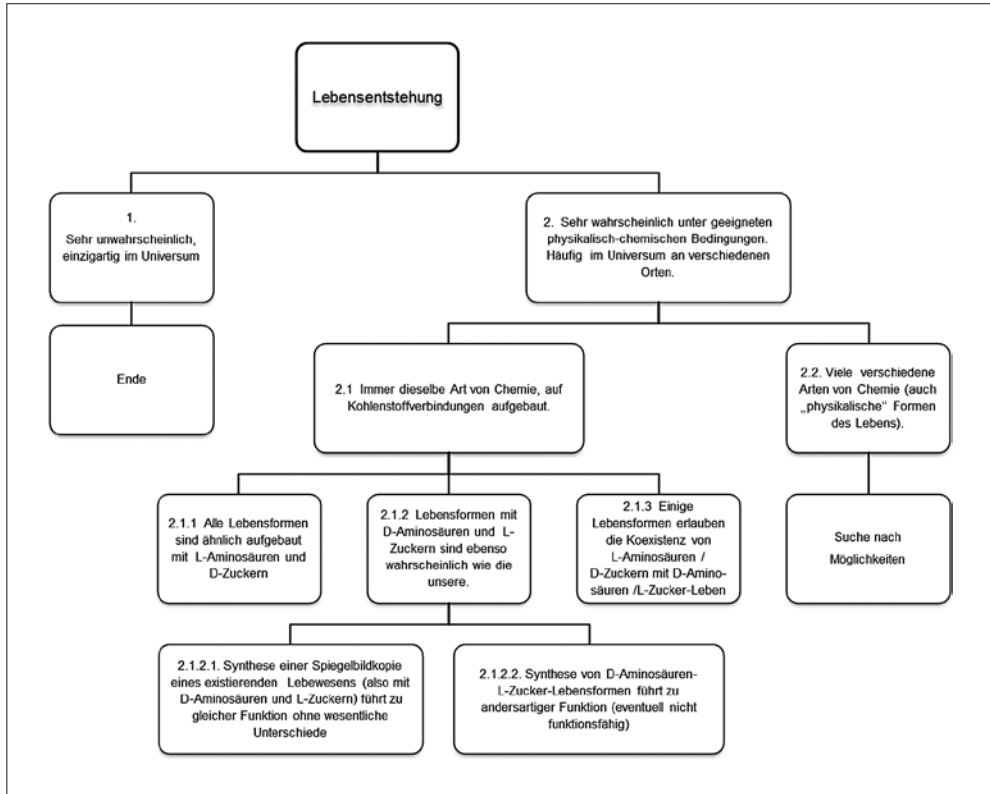


Abb. 8 Zusammenfassung der Hypothesen zum Ursprung des Lebens und der Homochiralität (nach QUACK 2014b)

Hier gibt es eher ein Zuviel als ein Zuwenig an Antworten. Wir stehen nicht etwa vor irgendeinem Paradoxon, für das es keine Erklärungsmöglichkeiten gäbe. Das Problem ist, daß Physik und Chemie ein Überangebot an alternativen Erklärungen bereithalten. Obwohl Forschergruppen in aller Welt an Fragestellungen dieser Art arbeiten, sind bisher nur wenige der möglichen Mechanismen im Detail experimentell untersucht worden.¹⁸

Die Aussagen in dem Buch von EIGEN (1987) können heute ergänzt werden durch eine Reihe von interessanten neueren Untersuchungen zur „absoluten asymmetrischen Synthese“ und Selektion der enantiomeren Struktur auch unter abiotischen Bedingungen.¹⁹

Weitere Fragen betreffen astrophysikalische und „astrobiologische“ Beobachtungen (MEIERHENRICH 2008, PIZZARELLO 2004, 2006). Eine hochinteressante Frage ist, wie man durch spektroskopische Beobachtungen an Planeten, Monden oder auch Exoplaneten Leben nachweisen könnte (BONFILS et al. 2013). Wir haben hierzu vorgeschlagen, dass die

¹⁸ EIGEN 1987.

¹⁹ SOAI et al. 1995, 1999, KAWASAKI et al. 2009, GIRARD und KAGAN 1998, MISLOW 2003, ZEPK et al. 2002, BLACKMOND et al. 2001, BLACKMOND 2007, MAUSCH et al. 2007, VIEDMA 2007, BRESLOW und LEVINE 2006, BRESLOW und CHENG 2009; siehe auch die Übersichtsartikel FRANK et al. 2001, LEHN 2002, SIEGEL 1998, FUSS 2009, BONNER 1995, QUACK 2014b sowie die Bücher von LUISI 2006 und MEIERHENRICH 2008.

spektroskopische Beobachtung einer konsistenten Homochiralität organischer Moleküle in der Atmosphäre von Exoplaneten ein relativ sicheres Indiz für Leben ist, da kein anderer Mechanismus für die Erzeugung einer konsistenten Homochiralität bekannt ist (QUACK 2014b). Solche Messungen sind prinzipiell durch spektroskopische Bestimmung des Zirkulardichroismus (auch Schwingungszirkulardichroismus und Raman-optische Aktivität möglich; QUACK 2014b). Diese astrophysikalischen spektroskopischen Messungen sind zweifellos sehr schwierig, aber prinzipiell möglich. Die Homochiralität ist also nicht nur ein Quasi-Fossil der Lebensentstehung, sondern auch ein potentieller Indikator für außerirdisches Leben.

Ein weiteres schwieriges Experiment wurde von uns schon 1990 vorgeschlagen (QUACK 1990): Prinzipiell ist es vorstellbar, die komplette Biochemie (DNA, Proteine, Membranen) eines einfachen Lebewesens, etwa eines sehr einfachen Bakteriums, zu analysieren und dann eine Totalsynthese aller Bausteine mit der entgegengesetzten enantiomeren Struktur durchzuführen. Wenn man diese dann zusammensetzt, stellt sich die Frage, ob das betreffende „enantiomere Lebewesen“ genauso funktioniert wie die ursprüngliche Form (natürlich bei enantiomere, passender Nährlösung), oder anders, eventuell gar nicht. Das betrifft die letzte Zeile in dem Entscheidungsdiagramm in Abbildung 8. Die Mehrheit der Biochemiker und Biologen würde wohl gleichartige Funktion vermuten, in Wahrheit ist die Frage aber offen. Prinzipiell ist es denkbar, dass die kleine Asymmetrie durch Paritätsverletzung in einem so komplexen kinetisch-biologischen System große, sogar katastrophale Konsequenzen hat (QUACK 1990, 2014b). Allerdings gibt es Synthesen für die „nicht natürlichen“ Enantiomere von Enzymen (z. B. beide Enantiomere von HIV-1-Protease), für welche die entsprechende Substratspezifität gezeigt wurde (MILTON et al. 1992). Das beweist aber nicht, dass das komplexe kinetische System eines kompletten Lebewesens ebenso symmetrisch äquivalent funktioniert.

4. Molekulare Chiralität in der Quantenmechanik: Tunneleffekt und Paritätsverletzung als Verletzung der Spiegelsymmetrie

„The underlying physical laws for the mathematical theory of a large part of physics and the whole of chemistry are thus completely known and the difficulty is only that the exact application of these laws leads to equations much too complicated to be soluble.

It therefore becomes desirable that approximate practical methods of applying quantum mechanics should be developed, which can lead to an explanation of complex atomic systems without too much computation.“ (Paul A. M. DIRAC)²⁰

Bisher haben wir Moleküle wie auch Kristalle als quasi-makroskopische Objekte betrachtet, die sich nach den Gesetzen der klassischen Mechanik verhalten. Wir werden hier zunächst die neuen Aspekte diskutieren, die durch die Quantenmechanik chiraler Moleküle ins Spiel kommen. Nach den eingangs zitierten Worten von DIRAC beschreibt die Quantenmechanik in umfassender Weise das Verhalten von Atomen und Molekülen. Allerdings werden wir sehen, dass seine Aussage von 1929 nicht ganz richtig war: Der für die Stereochemie chiraler Moleküle wichtige Effekt der Paritätsverletzung war in der damaligen Quantenmechanik mit „spiegelsymmetrischen Gesetzmäßigkeiten“ noch nicht bekannt, und wir werden seine Auswirkungen besprechen.

²⁰ DIRAC 1929.

Abbildung 9 zeigt im Vergleich ein helikal oder axial chirales Molekül, wie Wasserstoffperoxid (HOOH) oder Dichlordisulfid (ClSSCl), und Schneckenhäuser, die spiegelbildlich „symmetrisch äquivalent“ erscheinen.

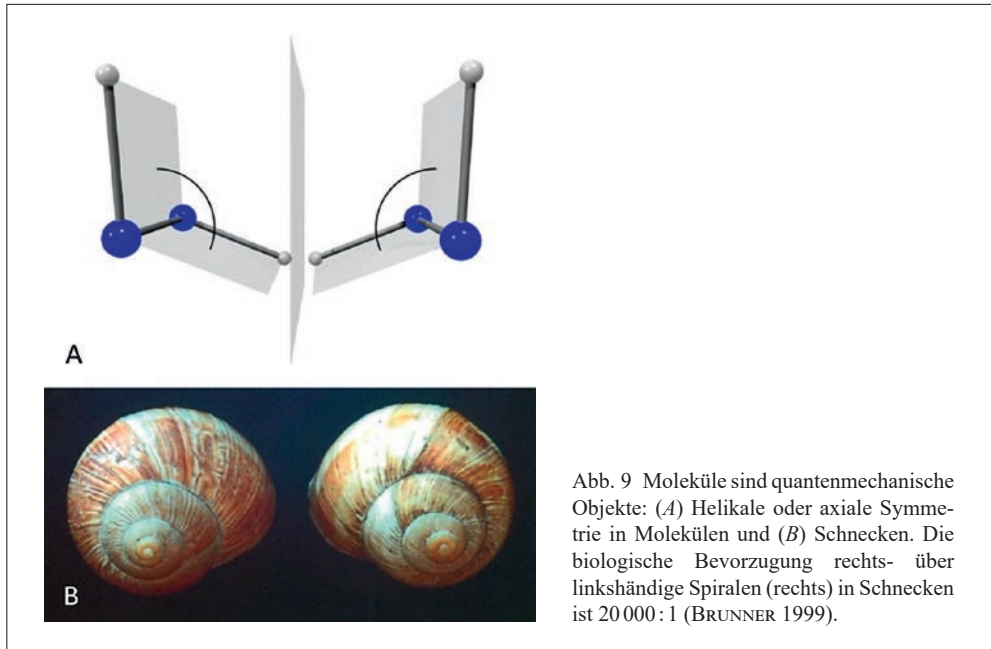


Abb. 9 Moleküle sind quantenmechanische Objekte: (A) Helikale oder axiale Symmetrie in Molekülen und (B) Schnecken. Die biologische Bevorzugung rechts- über linkshändige Spiralen (rechts) in Schnecken ist 20 000 : 1 (BRUNNER 1999).

Wie schon in Kapitel 3 erwähnt, ist aber der molekulare Aufbau der beiden Schnecken nicht wirklich spiegelbildlich, da beide Typen von Schnecken in ihren Proteinen nur die L-Aminosäuren (und in der DNA die D-Zucker) enthalten. Die makroskopische Spiegelbildsymmetrie ist also täuschend. In der Tat kommen die beiden Schneckenformen auch nicht gleich häufig vor, sondern im Verhältnis 20 000 : 1. Nach BRUNNER (1999) lässt sich das vermutlich auf die molekulare Prävalenz nur einer Spiegelbildform in der Erbsubstanz DNA zurückführen. Im Gegensatz hierzu finden sich etwa Quarzkristalle ungefähr gleich häufig als D- und L-Form (McBRIDE 1992). Beide Beobachtungen kann man aber mit Konzepten der Geometrie von makroskopischen Modellen „klassisch mechanisch“ verstehen.

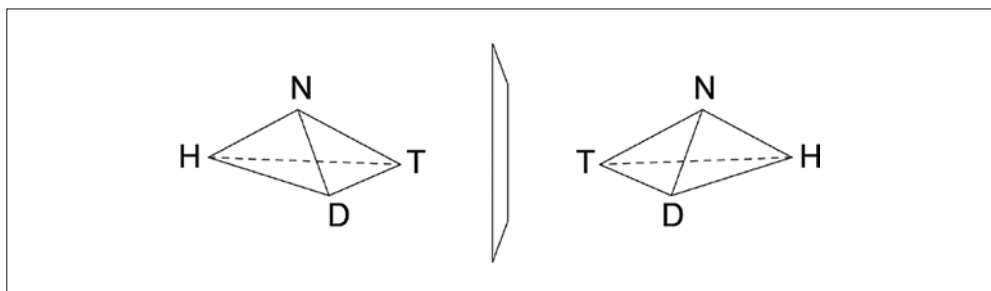


Abb. 10 Asymmetrisch substituierter Tetraeder: Isotop markierter Ammoniak. Bild verschieden vom Spiegelbild. Händige, chirale Struktur (aber kurzlebig, ps; FÁBRI et al. 2015b)

Chirale Moleküle (Abb. 9A) zeigen nun aufgrund der Quantenmechanik ganz neue Verhaltensweisen. Für sie ist die in der Abbildung 9 gezeigte „klassische“ Modellstruktur nicht wirklich angemessen. Nach HUND (1927a, b) kann man chirale Moleküle, wie in Abbildung 9 und 10 gezeigt, vereinfacht durch die quantenmechanische Bewegung eines Massenpunktes in einem Potential V (als Funktion einer Koordinate q) mit zwei symmetrisch äquivalenten Minima beschreiben. In der zeitunabhängigen Schrödingergleichung [9] der Quantenmechanik findet man dann stationäre Eigenzustände $\varphi_k(q)$ („Eigenfunktionen“) mit Energieeigenwerten E_k

$$\hat{H} = \hat{T} + V(q) \tag{8}$$

$$\hat{H}\varphi_k(q) = E_k\varphi_k(q). \tag{9}$$

\hat{H} ist der Hamiltonoperator, \hat{T} der Operator der kinetischen Energie und $V(q)$ die potentielle Energie. Bei exakter Spiegelsymmetrie des Potentials $V(q)$ haben diese Eigenfunktionen eine Symmetrieeigenschaft, die man als Parität der Eigenfunktion bezeichnet. Die Eigenfunktionen mit positiver Parität sind symmetrisch bezüglich der Spiegelung am Ursprung des Koordinatensystems (im eindimensionalen Modell in Abb. 11 ist das der Punkt q_C), während die Eigenfunktionen mit negativer Parität antisymmetrisch bezüglich dieser Spiegelung sind, d. h., dass ihr Betrag bei Spiegelung gleich bleibt, aber das Vorzeichen sich ändert. Die „beobachtbare Struktur“ der Eigenzustände in der Quantenmechanik entspricht der Wahrscheinlichkeitsdichte $p_k(q)$:

$$p_k(q) = |\varphi_k(q)|^2, \tag{10}$$

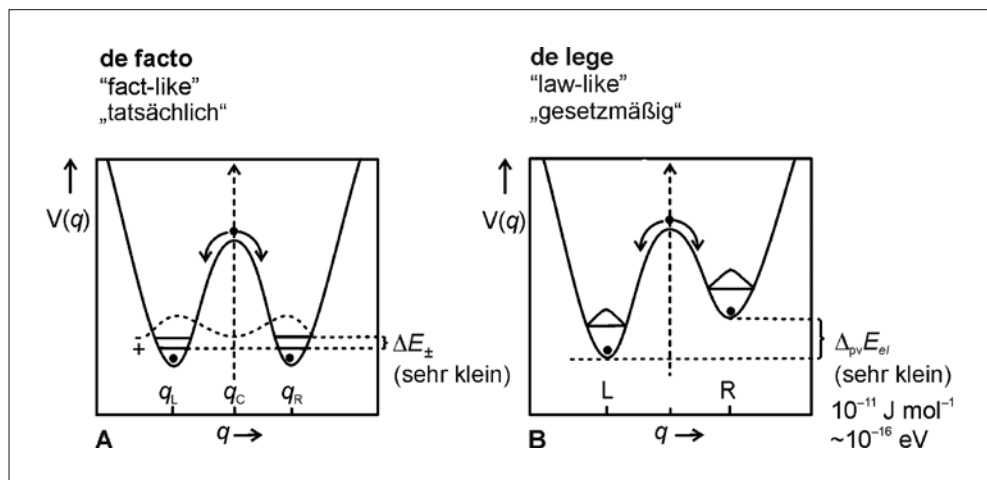


Abb. 11 Tunnel effekt, Symmetriebrechung und Symmetrieverletzung; spontan: „klassisch“ → quantenmechanisch, „De-facto“-Symmetriebrechung (HUND 1927a, b); Stereomutation durch Tunnel effekt in chiralen Molekülen, Parität und Paritätserhaltung, De-lege-Symmetrieverletzung (LEE und YANG 1956, WU et al. 1957, QUACK 1986); Messung von $E_R - E_L = \Delta_{pv}E$ durch Zeitentwicklung der Parität, Paritätsverletzung! Wir verwenden hier die „physikalische“ Nomenklatur L und R für die Enantiomere.

die durch das Betragsquadrat der Eigenfunktion gegeben ist. Hieraus folgt für ein symmetrisches Potential, dass die Wahrscheinlichkeit, in einem Eigenzustand φ_k eine „linke“ oder „rechte“ chirale Struktur zu finden, gleich ist, wobei man im Grundzustand lokale Maxima für die linke und rechte Struktur findet, das Molekül ist in einem solchen Zustand „bistruktuell“ delokalisiert, es hat keine eindeutige enantiomere Struktur, wie es durch die gepunktete Funktion in Abbildung 11 angedeutet ist. Das Molekül ist „gleichzeitig links- und rechtshändig“ chiral. Ein solches Verhalten ist mit unserer „klassisch mechanisch“ geprägten Vorstellung unmöglich und wird gelegentlich mit „Schrödingers Katze“ verglichen, die „gleichzeitig lebendig und tot“ ist.

HUND (1927a, b) hat nun gezeigt, dass man aus der zeitabhängigen Schrödingergleichung [11] enantiomere Strukturen erhalten kann:

$$i \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial \psi(q, t)}{\partial t} = \hat{H} \psi(q, t) \quad [11]$$

mit den Lösungen

$$\psi(q, t) = \sum_k c_k \varphi_k(q) \exp(-2\pi i E_k t / \hbar). \quad [12]$$

Für die Lösung, die nur die beiden tiefsten Zustände $\varphi_1(q)$ mit positiver Parität und $\varphi_2(q)$ mit negativer Parität verwendet, erhält man eine Wahrscheinlichkeitsdichte

$$|\psi(q, t)|^2 = \frac{1}{2} \left[\varphi_1 + \varphi_2 \exp(-2\pi i \Delta E_{1,2} t / \hbar) \right]^2. \quad [13]$$

Dies ist eine Funktion, die periodisch zwischen der linken und rechten Enantiomeren-Struktur hin und her pendelt, mit einer Periode

$$\tau_T = \frac{\hbar}{\Delta E_{1,2}} = \frac{\hbar}{(E_2 - E_1)}. \quad [14]$$

Die Umklappzeit für den Wechsel von einer linken zu einer rechten Struktur ist gerade die halbe Periode

$$t_{L \rightarrow R} = \frac{\hbar}{2\Delta E_{1,2}}. \quad [15]$$

Diese zeitabhängigen Funktionen zeigen also eine zeitlich veränderliche enantiomere Struktur. Das sehr überraschende Phänomen, dass die Struktur in einem solchen Zustand von einem Enantiomeren zum andern wechseln kann, obwohl die Energien (E_1 und E_2) bei weitem nicht ausreichen, um das Potentialmaximum bei q_c zu überwinden, bezeichnet man als „quantenmechanischen Tunneleffekt“, da das Molekül sich so verhält, als gäbe es einen Tunnel durch den Potentialberg (natürlich gibt es nicht wirklich einen Tunnel). In der

klassischen Mechanik ist mindestens eine Energie erforderlich, die dem Potentialmaximum in der Mitte bei q_c entspricht, um eine Strukturänderung von links nach rechts zu erhalten. Bei tieferen Energien lebt eine enantiomere Struktur „ewig“, die Strukturen zeigen dann nicht die Symmetrie des Potentials, man sagt auch, die Symmetrie ist klassisch „spontan“ gebrochen.

Die Größe $\Delta E_{1,2} = E_2 - E_1$ nennt man auch „Tunnelaufspaltung“ des Grundzustandes. Wenn $\Delta E_{1,2}$ sehr klein ist, so erhält man nach Gleichung [15] sehr lange Zeiten für den Wechsel von links nach rechts. „De facto“ hat man also wie in der klassischen Mechanik für kürzere Zeiten auch quantenmechanisch lokalisierte Strukturen, die Symmetrie ist „de facto“ gebrochen. Da allerdings in der Quantenmechanik auch die symmetrischen Zustände (etwa als Eigenzustände) möglich sind und die Wahrscheinlichkeitsdichte im langzeitlichen Mittel symmetrisch ist, ist es sinnvoll, diese quantenmechanische Symmetriebrechung „de facto“ von der klassisch spontanen Symmetriebrechung zu unterscheiden. Für weitergehende Diskussionen verweisen wir auf QUACK (1989, 1995b, 1999, 2011b, c), wo auch weitere überraschende Effekte aus der Quantenmechanik chiraler Moleküle diskutiert sind.

Abbildung 12 zeigt die Verhältnisse im dreidimensionalen Raum, wo man sehen kann, dass der Spiegelung am Ursprung ($x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$) ein Übergang von einem rechtshändigen (oben links) in ein linkshändiges (unten) Koordinatensystem entspricht, wobei ein solcher Übergang auch durch ein „gewöhnliches“ Spiegelbild (oben rechts) erzeugt wird, indem man das untere Koordinatensystem durch eine zusätzliche 180° Rotation um die x-Achse erzeugt. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Struktur eines

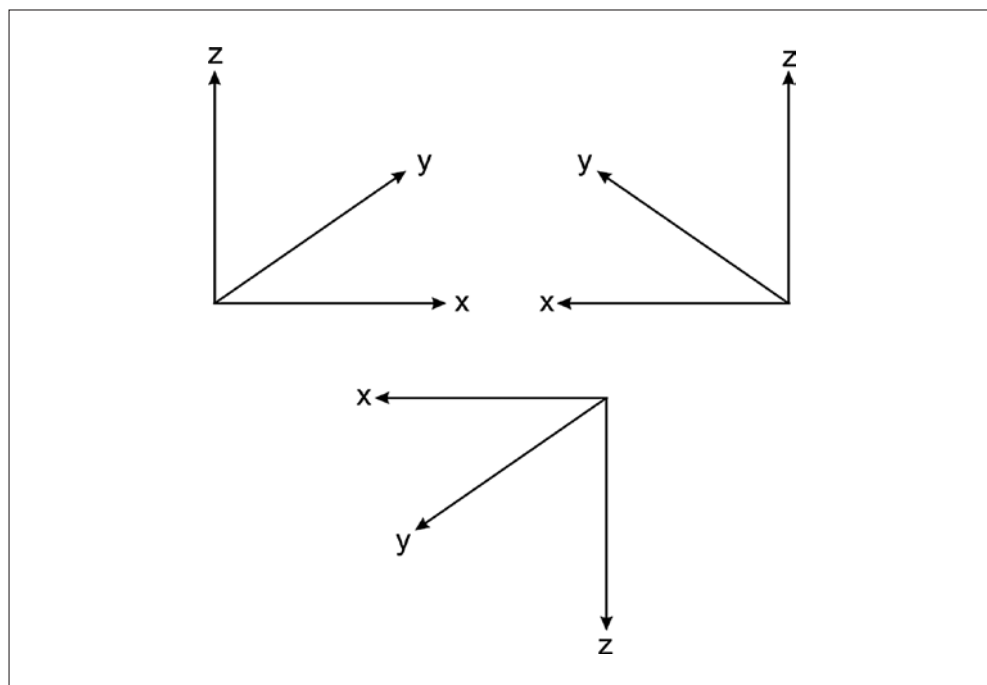


Abb. 12 Cartesisches Koordinatensystem: Inversion und Spiegelung und molekulare Quantenzustände. Wohldefinierte Parität = achiraler Zustand, nicht ‚händig‘. Quantenzahl Parität (+1, -1, positiv oder negativ), als Eigenschaft der Energieeigenfunktionen, die symmetrisch (+1) oder antisymmetrisch (-1) bezüglich der Spiegelung sind.

vieratomigen Moleküls wie H_2O_2 kann als Funktion $|\psi(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)|^2$ in einem mathematisch sechsdimensionalen Raum dargestellt werden. In neuerer Zeit kann man die zeitabhängige Schrödingergleichung für solche Probleme numerisch („exakt“) lösen, und Abbildung 13 zeigt eine graphische Darstellung einer solchen sechsdimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichte als Funktion eines Winkels τ (siehe Winkelsymbol in Abb. 9 und 18). Man sieht sehr gut das Umklappen von einer enantiomeren Struktur (mit τ zwischen 100 und 150°) in die andere (mit τ zwischen 210 und 260°) in einer sehr kurzen Zeit von ca. 1,5 ps ($1,5 \times 10^{-12}$ s), während bei den tiefen Energien dieses Beispiels in der klassischen Mechanik ein solcher Prozess gar nicht stattfinden würde („ewig“ dauert).

Die Symmetrie der potentiellen Energie $V(q)$ (und des Hamiltonoperators) bezüglich der Spiegelung im Raum (Abb. 12) führt dazu, dass die Parität einer Wellenfunktion eine „gute Quantenzahl“ oder eine „Erhaltungsgröße“ ist, sie ändert sich in einer zeitlichen Ent-

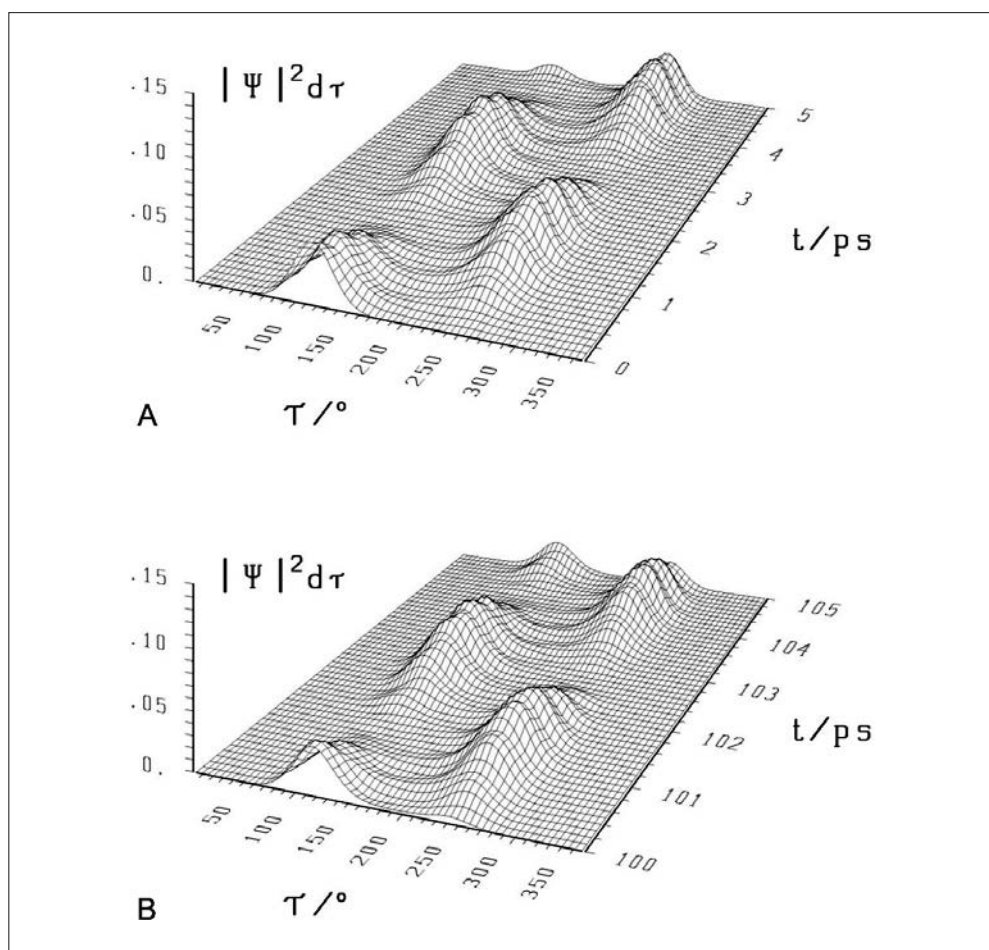


Abb. 13 Sechsdimensionales ‚Wellenpaket‘ im Grundzustand von Wasserstoffperoxid HOOH als Wahrscheinlichkeitsdichte in der Torsionskoordinate (FEHRENSSEN et al. 2007). τ entspricht dem durch das Winkelsymbol in Abb. 9 (A) gezeigten Winkel. Bild (A) zeigt die Anfangszeitentwicklung und Bild (B) die Periodizität auch nach „langer“ Zeit. (100 ps).

wicklung nicht. Andere „Erhaltungsgrößen“ sind Energie, Impuls, Drehimpuls,²¹ die mit anderen Symmetrioperationen verknüpft sind. Die Verbindung von grundlegenden Symmetrioperationen mit mechanischen Erhaltungsgrößen gehört zum allgemeinen Lehrbuchstoff der Physik (SCHMUTZER 1972).

Weniger geläufig ist die Verbindung zwischen einer exakten Symmetrie- und Erhaltungsgröße mit einer grundsätzlich „nicht beobachtbaren Größe“. EINSTEIN (1922) hat diesen Sachverhalt für die Spiegelsymmetrie wie folgt ausgedrückt:

„Es gibt also zweierlei kartesische Koordinatensysteme, welche man als ‚Rechtssysteme‘ und ‚Linkssysteme‘ bezeichnet. Der Unterschied zwischen beiden ist jedem Physiker und Ingenieur geläufig. Interessant ist, dass man Rechtssysteme bzw. Linkssysteme an sich nicht geometrisch definieren kann, wohl aber die Gegensätzlichkeit beider Systeme.“²²

Das bedeutet, dass eine absolute „Rechtshändigkeit“ oder „Linkshändigkeit“ des Raumes oder von Enantiomeren in einem gewissen Sinne „nicht beobachtbar“ oder definierbar ist, nur die relative Händigkeit der Enantiomeren zueinander ist in diesem Sinne „beobachtbar“,²³ wenn die Spiegelsymmetrie exakt gilt und die Parität exakt erhalten bleibt. Seit 1956/57 wissen wir aber, dass die Paritätserhaltung nicht exakt gilt, was bei chiralen Molekülen zu einer kleinen Asymmetrie im effektiven Potential führt, wie in Abbildung 11 (B). Das führt bei vielen chiralen Molekülen dazu, dass die Eigenzustände lokalisiert rechts oder links sind, wie in Abbildung 11 (B) schematisch gezeigt ist.

Diese lokalisierten enantiomeren Strukturen zeigen keine Umwandlung durch den Tunneleffekt und haben keine Paritätssymmetrie, die Spiegelsymmetrie des Raumes ist „de lege“ verletzt (QUACK 1989). Allerdings sind die entsprechenden Energien für typische chirale Moleküle sehr klein (100 aeV im Beispiel von Abb. 11) und bisher nur theoretisch vorhergesagt. Ein Vorschlag, wie man den betreffenden paritätsverletzenden Energieunterschied $\Delta_{p,v}E$ zwischen den beiden Grundzuständen der Enantiomere messen könnte, wurde von QUACK (1986, 1989) publiziert.

Das grundlegende Phänomen der Paritätsverletzung wurde in der Kern- und Teilchenphysik schrittweise entdeckt. Enrico FERMI (ML) formulierte 1934 eine Theorie für eine neue grundlegende „Kraft“ oder Wechselwirkung in der Physik zur Erklärung des β -Zerfalls des Neutrons und von gewissen Atomkernen (FERMI 1934b). Zunächst nahm man aber an, dass diese neue Wechselwirkung paritätserhaltend wäre, wie die lange bekannte „elektromagnetische Wechselwirkung“. Wegen des sogenannten $\theta - \tau$ -Rätsels der Teilchenphysik, wo man fand, dass zwei Teilchen (θ , τ), die in allen Eigenschaften genau übereinstimmten außer in ihrer Parität, die aus den beobachteten Zerfallskanälen (zwei Pionen mit positiver Parität scheinbar aus θ und 3 Pionen mit negativer Parität, scheinbar aus τ) erschlossen wurde, schlugen LEE und YANG (1956) vor, dass es sich möglicherweise um dasselbe Teilchen handelt (heute sagt man hierzu ein „ K^+ -Meson“), dass aber die Parität bei den beiden möglichen Zerfällen keine Erhaltungsgröße ist (LEE und YANG 1956). Experimentelle Bestätigungen für die Paritätsverletzung folgten in schneller Folge durch WU et al. (1957), FRIEDMAN und TELEGI (1957), GARWIN et al. (1957), SCHOPPER (1957a, b). Die Paritätsverletzung ist heute ein Teil der allgemeinen Theorie der schwachen Wechsel-

21 Siehe z. B. FRITZSCH 2016, QUACK 1999, 2011b.

22 EINSTEIN 1922.

23 Siehe auch QUACK 1999, 2011b.

wirkung im Rahmen des „Standardmodells“ der Hochenergiephysik (GLASHOW 1961, WEINBERG 1967, SALAM 1968, VELTMAN 2000, 'T HOOFT 2000).²⁴ Auch in der Atomspektroskopie sind die Effekte der Paritätsverletzung schon nachgewiesen worden (BOUCHIAT und BOUCHIAT 1974, 1975, CONTI et al. 1979, BENNETT und WIEMAN 1999, SHABAEV et al. 2005, TSIGUTKIN et al. 2009). Bei chiralen Molekülen sind die Effekte der Paritätsverletzung bisher nur theoretisch berechnet worden, aber noch nicht experimentell bestätigt. Wir werden im folgenden Kapitel über den aktuellen Stand dieser Forschung berichten.

5. Der lange Weg zur Bestimmung der paritätsverletzenden Energiedifferenz $\Delta_{pv}E$ zwischen den Enantiomeren chiraler Moleküle

„The time at my disposition also does not permit me to deal with the manifold biochemical and biological aspects of molecular chirality. Two of these must be mentioned, however, briefly. The first is the fact that although most compounds involved in fundamental life processes, such as sugars and amino acids, are chiral and *although the energy of both enantiomers and the probability of their formation in an achiral environment are equal, only one enantiomer occurs in Nature*; the enantiomers involved in life processes are the same in men, animals, plants and microorganisms, independent on their place and time on Earth. Many hypotheses have been conceived about this subject, which can be regarded as one of the first problems of molecular theology. One possible explanation is that the creation of living matter was an extremely improbable event, which occurred only once.“ (Vladimir PRELOG)²⁵

Das Zitat stammt aus den Schlussworten der Nobelpreisrede des Zürcher Stereochemikers Vladimir PRELOG (ML). Zum einen enthält es die Erwähnung der großen ungelösten Frage nach dem Ursprung der biologischen Homochiralität, wobei er das mit einem halb ernst gemeinten Ausblick auf eine mögliche „Molekulartheologie“ erweitert. Das hat mich an anderer Stelle (QUACK 2014b) zu einer Diskussion des Bibeltextes bei *Jona 4* (Vers 10, 11) veranlasst, nach der Übersetzung von Martin LUTHER:

„Und der Herr sprach: Dich jammert des Kürbisses, daran du nicht gearbeitet hast, hast ihn auch nicht aufgezogen, welcher in einer Nacht ward und in einer Nacht verdarb. Und mich sollte nicht jammern Ninives, solcher grossen Stadt, in welcher sind mehr denn hundertundzwanzigtausend Menschen, die nicht wissen Unterschied, was rechts oder links ist, dazu auch viele Tiere.“²⁶

Das scheint in der Tat die möglicherweise erste Erwähnung der Grundfrage nach rechts und links in der Menschheitsliteratur zu sein (soweit bekannt). Man kann sich fragen, was der Autor dieses Teils der Bibel gemeint hat, als er diese Zeilen schrieb. Gelegentlich hört man, dies stehe für Gut und Böse, was aber im Zusammenhang kaum passt. Eine andere Interpretation findet sich versteckt in der Zürcher Bibel nach der Übersetzung von ZWINGLI: „[...] die zwischen rechts und links *noch nicht* unterscheiden können, dazu die Menge Vieh.“²⁷ Diese Übersetzung legt nahe, dass es sich um den Bevölkerungsteil der 120 000 noch sehr kleinen Kinder handelt, die bekanntlich erst recht spät diese Unterscheidung lernen, was auch mit „der Menge Vieh“ zusammenpasst, da die vielen Kinder und das Vieh gewissermaßen den Reichtum der Stadt darstellen. Allerdings kann man im Original (auch

24 Siehe auch FRITZSCH 2016.

25 PRELOG 1976, Schlussätze der Nobelpreisrede. Hervorhebung von Q.

26 Zitiert nach der Ausgabe Elberfeld 1858.

27 Zitiert nach der Zürcher Ausgabe von 1931.

in der *Septuaginta*) keinen rechten Hinweis auf ein „noch nicht“ finden. ZWINGLI hat sich hier eine gewisse Freiheit genommen, und in der Zürcher Bibel von 2007 ist das „noch“ entfernt. („[...] die nicht unterscheiden können zwischen ihrer Rechten und ihrer Linken, und um die vielen Tiere.“) In einer englischen Übersetzung findet sich „[...] who do not know their right hand from their left, and also many animals“ (ohne ein „not yet“), und in einer amerikanischen „modern translation“ fand ich das „right and left“ ganz entfernt und wie folgt durch den Übersetzungstext interpretiert: „[...] who live in utter spiritual darkness“. Wenn man sich solche Freiheiten nehmen darf, so habe ich in QUACK (2014b) eine „ultramoderne Übersetzung vorgeschlagen, „[...] who do not know about molecular chirality and electroweak parity violation“, in kühner Vorhersage des Propheten *Jona* zu den Entdeckungen der Physik des 20. Jahrhunderts.

Eine mögliche, seriösere Interpretation ist die Annahme, dass die Kultur von Niniveh im Gegensatz zu den Hebräern das abstrakte Konzept der Rechts- oder Linkshändigkeit nicht kannte, also hier in einer tieferen „Stufe der Zivilisation“ eingeordnet wurde. Ein möglicher Hinweis darauf sind Darstellungen aus Ägypten, wo Menschen mit zwei Händen gleicher Händigkeit dargestellt werden, also die Hände vielleicht wirklich generell nicht so scharf diesbezüglich unterschieden wurden (Abb. 14)

Nach diesem theologischen Exkurs wenden wir uns der zweiten bemerkenswerten Aussage im Zitat von PRELOG zu, die wir im Druck kursiv hervorgehoben haben (es ist im Original normal gedruckt). Ich habe nach meinem Eintreffen in Zürich in freundschaftlichen Diskussionen Vladimir PRELOG darauf hingewiesen, dass es hier einen Fehler in seiner



Abb. 14 Grabbild der Königin NEFERTARI, der großen königlichen Frau von RAMSES II., das zwei Hände gleicher Händigkeit zeigt (*Wikimedia public domain*).

Nobelpreisrede gibt. Wir wissen heute prinzipiell aus dem Effekt der Paritätsverletzung, dass die Energie der beiden Enantiomeren eben nicht gleich ist, wenn auch der Energieunterschied bis heute nicht gemessen ist. Am Symposium zum 80. Geburtstag von PRELOG habe ich ihm dann eine Arbeit gewidmet, wo ich ein experimentelles Konzept vorstellte, wie man den Unterschied messen kann. (Eine erste Präsentation dieses Konzeptes hatte ich 1980 auf einer Tagung in Bielefeld in einem außerordentlichen Abendseminar vorgestellt, wo Peter PFEIFER dies danach unter Bezug auf diesen Vortrag als „Quack’s experiment“ zitiert hat, wovon es aber nur diese rudimentäre Erwähnung im Druck gibt [PFEIFER 1983].)

On the Measurement of the Parity Violating Energy Difference between Enantiomers

Martin Quack

Laboratorium für Physikalische Chemie, ETH Zurich (Zentrum)
CH-8092 Zurich, Switzerland

Presented at the ETH / Weizmann Institute Symposium, and
Dedicated to Professor Vladimir Prelog on the Occasion of his 80th Birthday

Chemical Physics Letters, Volume 132 p. 147–153 (1986)

Abb. 15 Titel der Vladimir PRELOG gewidmeten Arbeit (QUACK 1986)



Abb. 16 Fotografie der Tagungsteilnehmer am „Prelog-Symposium“ der ETH Zürich und des *Weizmann Institute of Science*, über *Structure, Bonding and Reactivity*, Rehovot März 1986. Außer PRELOG (ML) in der Mitte kann man hier noch einige weitere Mitglieder der Leopoldina erkennen, Jack DUNITZ (ML) vorne links 2. Reihe, Helmut SCHWARZ (ML) letzte Reihe am linken Zipfel des Banners, Ada YONATH (ML) und Richard ERNST (ML) am rechten Zipfel (von vorne betrachtet) des Banners, und weitere. Der Autor sitzt ganz vorne links außen.

Abbildung 15 zeigt den Titel der Widmungsarbeit und Abbildung 16 das Foto von der Tagung am Weizmann-Institut 1986.

1986 war für PRELOG auch insofern ein besonderes Jahr, als er zum zweiten Mal in seinem Leben den Halleyschen Kometen sah. Er berichtete mir damals, dass er sich noch daran erinnerte, den Kometen schon als kleines Kind gesehen zu haben.

Im Jahr 1986 fehlten nahezu alle Grundlagen, um das von mir vorgeschlagene experimentelle Konzept im Laboratorium zu realisieren. Das Experiment erschien „unmöglich“. Getreu dem Motto von A. A. MICHELSON – „The greatest inspiration is a challenge to attempt the impossible“ – haben wir aber seit 1986 diese Herausforderung angenommen, und ich werde hier knapp über die Entwicklungen berichten.²⁸

5.1 Theorie der Paritätsverletzung in chiralen Molekülen

Die erste Aufgabe betraf die Entwicklung einer zuverlässigen Theorie. Schon seit den frühen Jahren nach der Entdeckung der Paritätsverletzung in der Kern- und Teilchenphysik gab es qualitative Abschätzungen der Auswirkungen auf die Energien chiraler Moleküle (ZELDOVICH 1959, YAMAGATA 1966, REIN 1974, LETOKHOV 1975, ZELDOVICH et al. 1977, HARRIS und STODOLSKY 1978). Es folgten dann später quantenchemische Berechnungen von paritätsverletzenden Energiedifferenzen zwischen den Enantiomeren chiraler Moleküle ab 1979 (REIN et al. 1979, HEGSTRÖM et al. 1980, MASON und TRANTER 1983, 1984, MACDERMOTT und TRANTER 1989a, KIKUCHI und WANG 1990, KIKUCHI et al. 1990, KIKUCHI und KIYONAGA 1994) mit zum Teil weitreichenden Schlussfolgerungen auch zur Evolution der biomolekularen Homochiralität (MASON 1984, MACDERMOTT und TRANTER 1989a, b, MASON 1991a, b). Diese frühen Berechnungen waren jedoch von ungenügender Qualität und ergaben typischerweise um 1–2 Größenordnungen zu kleine Werte für die paritätsverletzenden Energien, wie unsere genauere Analyse der Theorie ergab (BAKASOV et al. 1996, 1998, BAKASOV und QUACK 1999, BERGER und QUACK 2000a, b). Über diese Entwicklungen haben wir schon früher bei der Leopoldina berichtet (QUACK 1999). Die frühen Ergebnisse und Schlussfolgerungen vor 1995 können nicht aufrechterhalten werden. Die neuen, wesentlich größeren Werte nach 1995 (aber immer noch sehr klein!) sind inzwischen vielfach mit unterschiedlichen Verfahren bestätigt und erweitert worden (BAKASOV et al. 1996, 1998, LAZZERETTI und ZANASI 1997, LAERDAHL und SCHWERDTFEGER 1999, BERGER et al. 2000, QUACK und STOHNER 2000a, b, LAERDAHL et al. 2000a, b, HENNUM et al. 2002, QUACK und STOHNER 2001, 2003, SCHWERDTFEGER et al. 2005, BERGER und VAN WÜLLEN 2005, BAST et al. 2011, HORNÝ und QUACK 2015b). Wir können hier keinen vollständigen Überblick über die inzwischen sehr umfangreiche Literatur der Theorie geben. Abbildung 17 illustriert den sehr „großen Sprung“ in der Größenordnung der kleinen, paritätsverletzenden Energieunterschiede, der sich 1995/96 ergab, am Beispiel des Prototypmoleküls Wasserstoffperoxid HOOH (QUACK 2011a).

Einen detaillierten Überblick mit Zahlenwerten bis 2015 findet man bei HORNÝ und QUACK (2015b), und wir verweisen auf entsprechende Übersichtsartikel, die die Theorie auch im weitergehenden Detail erklären (QUACK 2002, BERGER 2004, QUACK und STOHNER 2005, QUACK 2006, QUACK et al. 2008, QUACK 2011b, 2014b). Zusammenfassend lässt sich sagen,

²⁸ Siehe auch QUACK 1989, 1995b, 1999, 2002, 2006, 2011b, c sowie QUACK et al. 2008 für einige Übersichtsartikel zu diversen Etappen auf dem langen Weg.

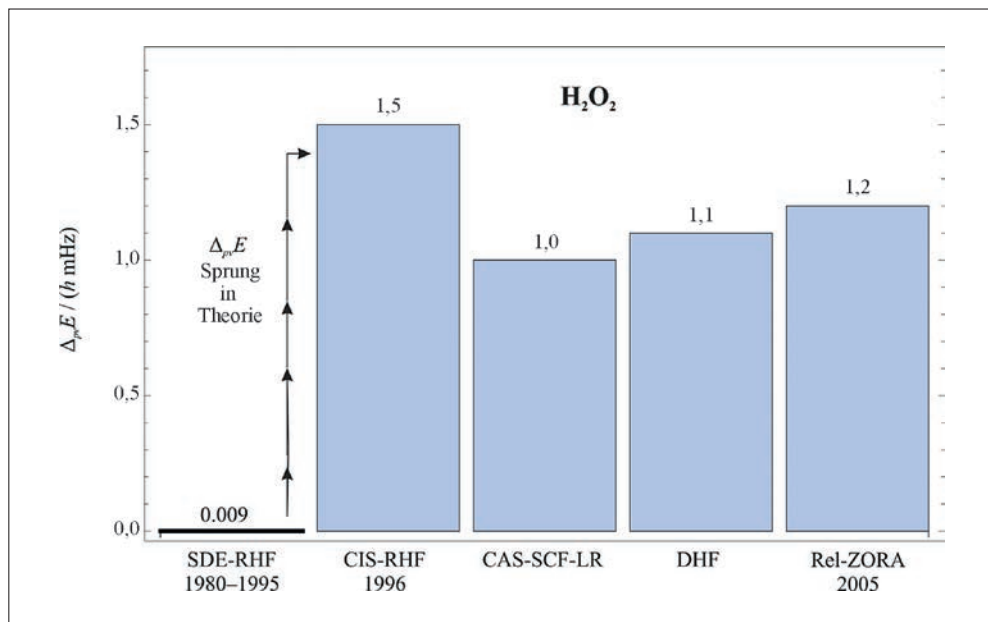


Abb. 17 Graphischer Überblick über die quantitative Entwicklung der Theorie der molekularen Paritätsverletzung mit dem „großen Sprung“ 1995/1996 (nach QUACK 2011a).

dass die Theorie der molekularen Paritätsverletzung heute als gut entwickelt gilt und es übereinstimmende Werte aus einer Reihe von unterschiedlichen Verfahren und verschiedenen Arbeitsgruppen gibt. In diesem Sinn kann dieser Entwicklungsschritt im Gesamtprojekt als vorläufig abgeschlossen gelten, eine experimentelle Bestätigung steht aber noch aus.

Während wir für eine genaue Beschreibung der Theorie auf QUACK (2011b) und die dort zitierte Literatur verweisen,²⁹ wollen wir hier stichwortartig einen sehr kurzen Überblick über einige Aspekte der Theorie geben.

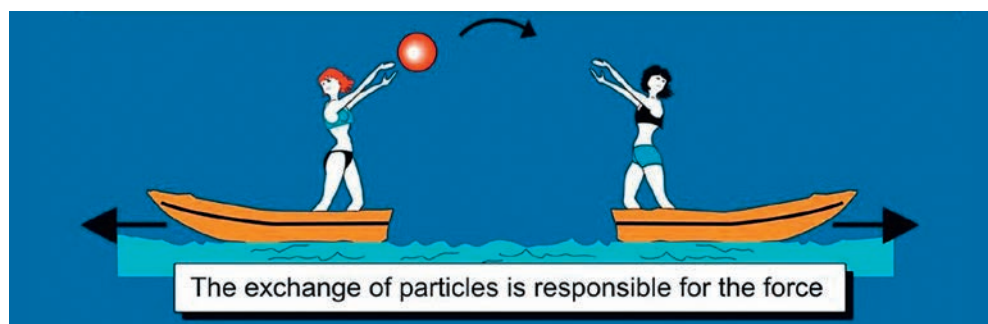
Der Ursprung der molekularen Paritätsverletzung liegt in der schwachen Wechselwirkung als einer der vier Grundkräfte der Physik, die in Tabelle 2 nach einem Bild von der Webseite des CERN dargestellt sind.³⁰ Die Kräfte, die zwischen den Elementarteilchen wirken, werden durch sogenannte „Feldteilchen“ vermittelt. So wird zum Beispiel die Abstoßung von zwei Elektronen nach dem Coulombgesetz in der heutigen Theorie durch das masselose Photon als Feldteilchen der elektromagnetischen Kraft vermittelt. Normale quantenchemische Rechnungen von Atomen und Molekülen enthalten nur diese elektromagnetische Kraft, die eine strikte „Paritätssymmetrie“ und Paritätserhaltung zeigt. Die starke Kernkraft, die für den Zusammenhalt der Bausteine des Atomkerns sorgt, ist auch strikt paritätserhaltend. Sie braucht in quantenchemischen Rechnungen nicht explizit berücksichtigt zu werden, da die Atomkerne mit ihren Eigenschaften als Quasi-Elementarteilchen der Chemie behandelt werden, wobei die Effekte der starken Kernkraft als Parameter der Atomkerneigenschaften (Masse, Drehimpuls usw.) abgebildet werden.

29 Siehe auch BERGER 2004, QUACK und STOHNER 2005, QUACK et al. 2008, QUACK 2014b.

30 Siehe auch FRITZSCH 2016, JENNI 2016, GABRIELSE 2016.

Tab. 2 Kräfte im Standardmodell der Teilchenphysik und wichtige Effekte, die auf ihnen beruhen. Die Zusammenstellung mit dem Bild der Impulsübertragung durch die geworfenen Bälle als Feldteilchen ist in der Originalsprache von der CERN-Webseite übernommen mit der Ausnahme, dass wir hier neu den wichtigen Einfluss der schwachen Kernkraft auf die Struktur und Dynamik chiraler Moleküle hinzugefügt haben (QUACK 2006, CERN).

| The Forces in Nature | | | |
|------------------------|--|---|--|
| Type | Intensity of Forces (Decreasing Order) | Particle Binding (Field Quantum) | Important in |
| Strong Nuclear Force | ~ 1 | Gluons (no mass) | Atomic Nucleus |
| Electro-Magnetic Force | $\sim 10^{-3}$ | Photons (no mass) | Atoms and Molecules |
| Weak Nuclear Force | $\sim 10^{-5}$ | Bosons Z, W ⁺ , W ⁻ , (heavy) | Radioactive β -Decay, Chiral Molecules |
| Gravitation | $\sim 10^{-38}$ | Gravitons (?) | Sun and Planets etc. |



Die „schwache Kernkraft“ (Wechselwirkung) ist in der Kernphysik für den radioaktiven β -Zerfall wichtig und ist nicht paritätserhaltend, wie man seit 1957 weiß. Sie wird durch das W^\pm - und das Z^0 -Boson vermittelt. Das Z^0 -Boson hat eine große Masse ($m_0c^2 = 91 \text{ GeV}$ oder ca. $m_0 = 107 \text{ Da}$) und sehr kurze Lebensdauer ($0,26 \text{ ys} = 0,26 \cdot 10^{-24}\text{s}$). Die Kraft ist sehr gering und von sehr kurzer Reichweite. Normalerweise kann sie in der Chemie vernachlässigt werden. Da sie jedoch paritätsverletzend ist, führt sie zu einer geringfügigen Asymmetrie zwischen enantiomeren Strukturen. Die normale potentielle Energiefunktion V_{em} in einem chiralen Molekül ergibt sich aus der elektromagnetischen Wechselwirkung und ist etwa im Rahmen der Born-Oppenheimer-Näherung eine $S = 3N-6$ -dimensionale Hyperfläche mit den allgemeinen Koordinaten $q_1, q_2, q_3, \dots, q_s$ für ein Molekül mit N Atomen und strikt symmetrisch bezüglich der Spiegelung

$$V_{emR}(q_1, q_2, \dots, q_s) - V_{emS}(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_s) = 0, \quad [16]$$

wobei (symbolisch vereinfacht geschrieben) gilt:

$$V_{emS}(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3 \dots \bar{q}_s) = \hat{E}^* V_{emR}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_s). \quad [17]$$

\hat{E}^* ist der Operator der Spiegelung der Koordinaten am Ursprung (man schreibt hierfür auch oft \hat{P}) und die Koordinaten $(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3 \dots \bar{q}_s)$ entsprechen dann der gespiegelten Struktur zu $(q_1, q_2, q_3, \dots, q_s)$ (für eine chirale Struktur, also der enantiomeren Struktur), die wir mit den Indices R und S vermerken.

In der „elektroschwachen Quantenchemie“ (BAKASOV et al. 1996) berechnet man ein zusätzliches effektives Potential E_{pv} , das nicht inversionssymmetrisch und daher nicht paritätserhaltend ist.

$$E^* E_{pvR}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_S) = E_{pvS}(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \dots, \bar{q}_S) = -E_{pvR}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_S) \quad [18]$$

Die paritätsverletzende Energiedifferenz $\Delta_{pv}E$ zwischen den beiden enantiomeren Strukturen ist also gegeben durch

$$\Delta_{pv}E_{el}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_S) = E_{pvR}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_S) - E_{pvS}(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \dots, \bar{q}_S) \quad [19]$$

Diese Energiedifferenzen sind im Betrag sehr klein, etwa von der Größenordnung 100 aeV bis 1 feV oder etwa 10^{-11} bis 10^{-10} Jmol⁻¹ in molaren Energieeinheiten. Wir haben in Gleichung [19] den Index „el“ hinzugefügt, um deutlich zu machen, dass es sich um einen Effekt handelt, der zur gewöhnlichen *elektronischen* Potentialfunktionshyperfläche hinzukommt. Will man die Energiedifferenz in einem speziellen Quantenzustand $\varphi_{evr}^{(k)}$ (elektronisch, Schwingung, Rotation, auch Kernspin usw.) in einem Molekül berechnen, so ergibt sich die betreffende Energiedifferenz zwischen den entsprechenden enantiomeren Quantenzuständen aus den Erwartungswerten von $\Delta_{pv}E_{el}$

$$\Delta_{pv}E^{(k)} = \left\langle \varphi_{evr}^{(k)} \left| E_{pvR}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_S) \right| \varphi_{evr}^{(k)} \right\rangle - \left\langle \varphi_{evr}^{(k)} \left| E_{pvS}(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \dots, \bar{q}_S) \right| \varphi_{evr}^{(k)} \right\rangle, \quad [20]$$

wobei die gestrichene Funktion $\varphi_{evr}^{(k)}$ dem Enantiomeren der ungestrichenen Funktion $\varphi_{evr}^{(k)}$ entspricht. Oft kann man diese Erwartungswerte in erster Näherung für den Grundzustand ($k = 0$) durch die betreffenden Werte $\Delta_{pv}E_{el}$ bei der Gleichgewichtsgeometrie approximieren, wobei das keine sehr gute Näherung ist und natürlich auch die Quantenzustandsabhängigkeit völlig vernachlässigt wird.

Die Berechnung der Potentiale E_{pv} ist sehr ausführlich in BAKASOV et al. (1998) und QUACK (2011b) diskutiert. Wir geben hier einige einfache Näherungsgleichungen aus der Störungstheorie der Effekte an, aus denen die wesentlichen Aspekte relativ transparent werden, die tatsächlichen Berechnungen erfolgen in der Regel mit anderen Techniken.

Für das paritätsverletzende Potential gilt näherungsweise:³¹

$$E_{pv} = 2 \operatorname{Re} \sum_n \frac{\langle \psi_0 | \hat{H}_{pv}^{e-nucl} | \psi_n \rangle \langle \psi_n | \hat{H}_{SO} | \psi_0 \rangle}{E_0 - E_n}. \quad [21]$$

Hierbei steht Re für den Realteil eines prinzipiell komplexen Wertes, ψ_0 ist die Wellenfunktion des elektronischen Singulettgrundzustandes, und die Summation geht über die angeregten elektronischen Triplettzustände ψ_n . \hat{H}_{SO} ist der gewöhnliche Breit-Pauli-Spin-Bahn-Operator („quasi-relativistisch“ in dieser Näherung). \hat{H}_{pv}^{e-nucl} ist der paritätsverletzende Hamiltonoperator, der durch die Wechselwirkung der n Elektronen im Molekül mit den N Atomkernen zustande kommt.

31 Für vollständigere Gleichungen siehe BAKASOV et al. 1998, BERGER und QUACK 2000b.

$$\hat{H}_{\text{pv}}^{e\text{-nucl}} = \frac{\pi G_F}{m_e h c \sqrt{2}} \sum_{i=1}^n \sum_{A=1}^N Q_W(A) \{ \hat{p}_i \cdot \hat{s}_i, \delta^3(\vec{r} - \vec{r}_A) \}_+ \quad [22]$$

mit den üblichen Symbolen für Naturkonstanten h , c , die Masse m_e , den Impuls \hat{p}_i und den Spin \hat{s}_i des Elektrons i und dem Antikommutatorsymbol $\{ \}_+$. Die Summen gehen über alle Elektronen $i = 1, 2, \dots, n$ und Atome $A = 1, 2, \dots, N$. Der Effekt der schwachen Wechselwirkung erscheint in der Fermikonstante (FERMI 1934b) G_F

$$G_F = 2,22 \cdot 10^{-14} E_h a_0^3 = 1,43856 \cdot 10^{-62} \text{ Jm}^3 \quad [23]$$

sowie der „schwachen Ladung“ $Q_W(A)$ des Atomkerns A

$$Q_W(A) = Z_A (1 - 4 \sin^2 \theta_W) - N_A \quad [24]$$

und dem Weinberg-Parameter (mit Weinberg-Winkel θ_W)

$$1 - 4 \sin^2 \theta_W = 0,0724. \quad [25]$$

Die Gleichungen sind hier in SI-Einheiten angegeben, und man erkennt die Geringfügigkeit des Effektes an der geringen Größe von G_F . Z_A ist die Kernladungszahl und N_A die Zahl der Neutronen im Atomkern A . Die dreidimensionale Deltafunktion $\delta^3(\vec{r} - \vec{r}_A)$ zeigt, dass es sich effektiv um eine „Kontaktwechselwirkung“ zwischen Elektronen und Atomkernen handelt, wie sie ähnlich (aber nicht gleich) auch aus der Theorie der Hyperfeinstruktur in Molekülspektren bekannt ist. Im vorliegenden Fall rührt das von der kurzen Reichweite der schwachen Wechselwirkung her. Gleichung [21] ist eine nichtrelativistische (oder „quasi-relativistische“) Näherungsformel, in der eine Reihe von weiteren Gliedern und Effekten im Gesamtoperator vernachlässigt sind, die aber alle kleinere Beiträge liefern, wenn sie auch nicht vernachlässigbar sind. Die Näherung ist gut für Atomkerne mit Kernladungszahlen bis ca. maximal $Z_A = 20$ bis 40. Für schwerere Atomkerne muss man auf voll relativistische Gleichungen zurückgreifen (BAKASOV et al. 1998, LAERDAHL und SCHWERDTFEGER 1999, BERGER 2004). Die Gleichung dient hier nur der Veranschaulichung des dominierenden Beitrages zur paritätsverletzenden Energie. Gleichung [22] zeigt auch, dass E_{pv} sich aus Beiträgen der einzelnen Atomkerne A im Molekül darstellen lässt,³² wobei nach Gleichung [24] wiederum die Neutronen im Atomkern den größten Beitrag liefern:

$$E_{\text{pv}}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_S) = \sum_{A=1}^N E_{\text{pv}}^A(q_1, q_2, q_3, \dots, q_S). \quad [26]$$

Da die Neutronenzahl für verschiedene Isotope verschieden ist, erhält man einen neuartigen Isotopeneffekt (BERGER et al. 2005). Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Operatoren und mit der Annahme, dass für mittlere Werte der Kernladungszahl Z_A die

32 Siehe z. B. BAKASOV et al. 1996, 1998 für eine solche Aufschlüsselung.

Neutronenzahl ungefähr proportional zu Z_A ist, kann man nach einem ursprünglich von ZELDOVICH stammenden und in QUACK (2011b) um einen geometrieabhängigen Faktor f_{geo} erweiterten Vorschlag eine sehr grobe Skalierungsformel angeben:

$$\frac{\Delta_{\text{pv}} E}{h} = f_{\text{geo}} (10^4) \left(\frac{Z_{\text{eff}}}{100} \right)^5 \text{ Hz} . \quad [27]$$

Hierbei ist Z_{eff} ein gewichtetes Mittel über die Kernladungszahl der Atomkerne Z_A mit den höchsten Werten von Z im Molekül, die die Beiträge zu E_{pv} bei weitem dominieren. Solche Formeln eignen sich aber nur für Abschätzungen von ungefähren Trends. Insbesondere ist der geometrieabhängige Faktor f_{geo} sehr wichtig und kann sehr kleine Werte bei der Gleichgewichtsgeometrie der Moleküle annehmen. Das paritätsverletzende Potential ist eine vieldimensionale Hyperfläche, die auch für chirale Geometrien den Wert Null annehmen kann (BAKASOV et al. 1998, 2004).

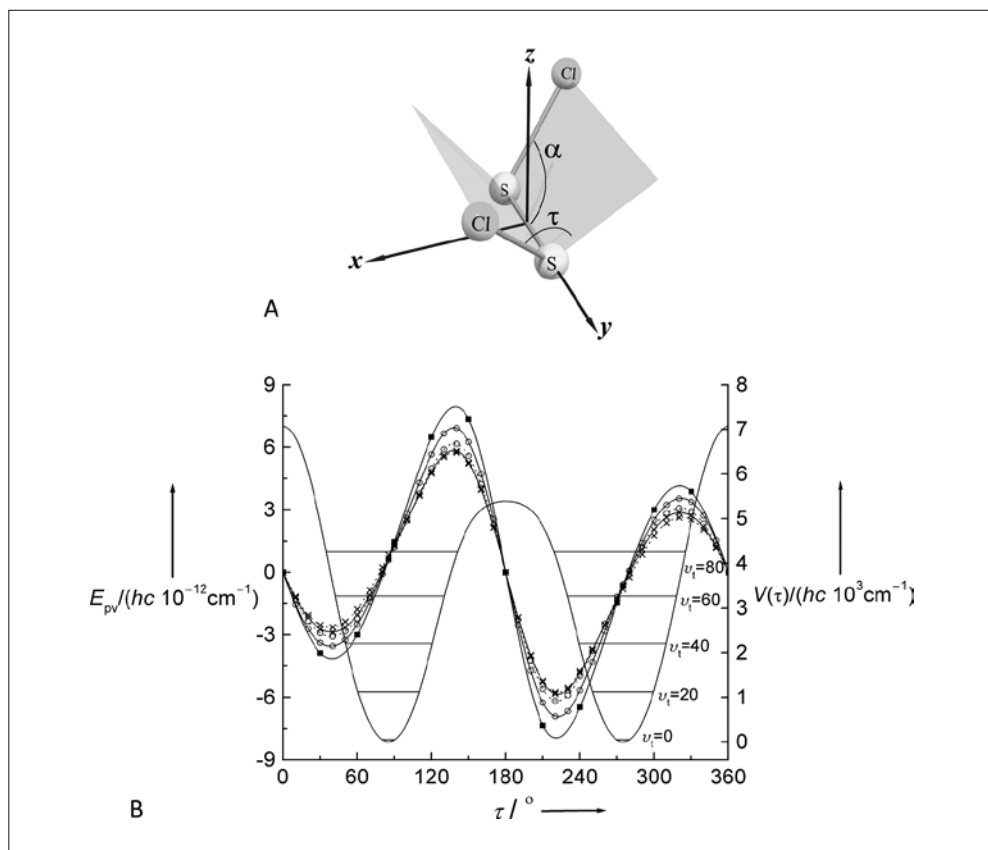
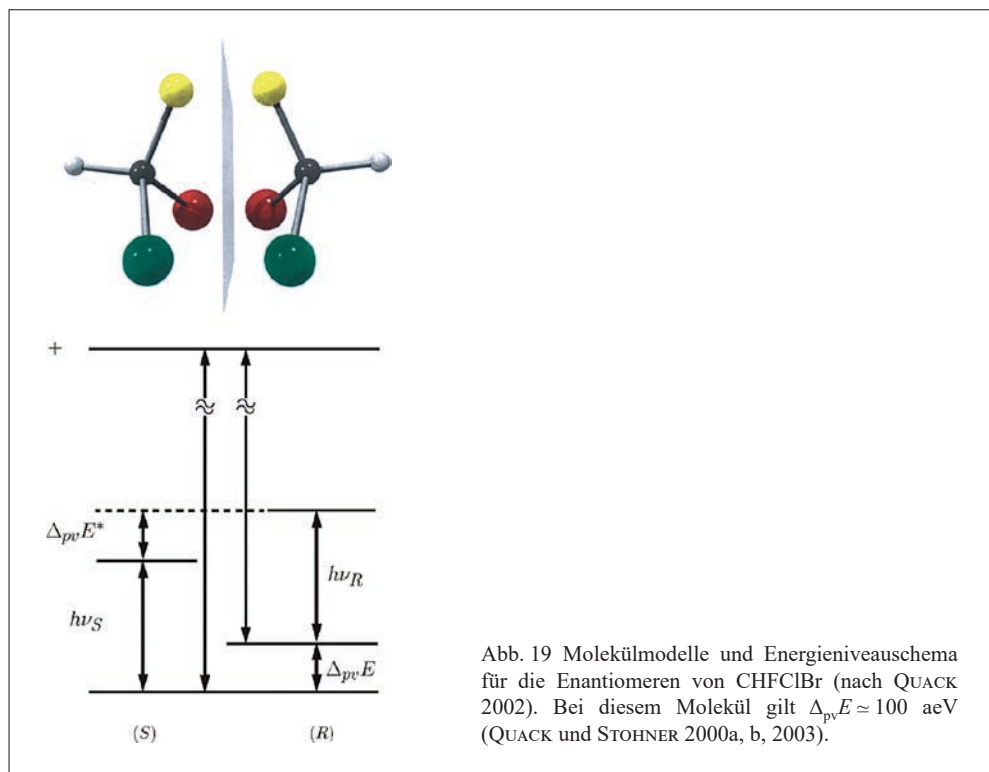


Abb. 18 Symmetrisches paritätserhaltendes Born-Oppenheimer-Potential (B) für das Dichlordisulfan (ClSSCl, [A]) als Funktion des Torsionswinkels (rechte Skala) und antisymmetrisches (bezüglich 180°-Punkt) paritätsverletzendes Potential (nach BERGER et al. 2001). Die mit verschiedenen Symbolen belegten, etwas verschiedenen Potentiale entsprechen verschiedenen Näherungsverfahren.

Abbildung 18 zeigt für das Beispiel Dichlordisulfan (CISSCI) das gewöhnliche Born-Oppenheimer-Potential als Funktion des Torsionswinkels τ , das symmetrisch bezüglich der Spiegelung ist (im „eindimensionalen“ Bild symmetrisch bezüglich dem Punkt $\tau = 180^\circ$) und großen Energiewerten entspricht (rechte Skala mit der Einheit 10^3 cm^{-1} für $V(\tau)/h_e$), während das paritätsverletzende Potential antisymmetrisch bezüglich dem 180° -Punkt ist mit der sehr kleinen Skaleneinheit 10^{-12} cm^{-1} für E_{pv}/hc (linke Skala). Aus Symmetriegründen ist E_{pv} gleich Null bei 180° , einer planaren achiralen Geometrie. E_{pv} ist aber auch Null in der Nähe der chiralen Geometrien nahe bei 90° und 270° . Da die Gleichgewichtsgeometrie in der Nähe dieser Winkel liegt, ist die paritätsverletzende Energiedifferenz im Grundzustand $\Delta_{pv}E$ oder bei der Gleichgewichtsgeometrie $\Delta_{pv}E_{el}(\tau_e)$ relativ klein (10^{-12} cm^{-1}) im Vergleich zum Maximum von $\Delta_{pv}E(\tau)_{\max} > 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$. Solche Effekte sind nur durch quantitative Berechnungen genau zu erfassen, aber sehr wichtig bei der Planung von Experimenten.

Schließlich hängt es noch vom Tunneleffekt ab, ob die sehr kleine antisymmetrische Störung des effektiven Potentials wichtig ist. Wenn die Tunnelaufspaltung im Grundzustand ΔE_{\pm} wie in Abbildung 11A sehr groß ist gegenüber der antisymmetrischen Störung mit $\Delta_{pv}E_{el}$, dann spielt die Symmetrieverletzung praktisch keine Rolle. Das ist der Fall beim H_2O_2 (mit $\Delta_{pv}E_{el} < 10^{-13} \text{ cm}^{-1}$ und $\Delta E_{\pm} > 10 \text{ cm}^{-1}$). Beim CISSCI liegt der umgekehrte Fall vor, da $\Delta E_{\pm} < 10^{-70} \text{ cm}^{-1}$ abgeschätzt wird (BERGER et al. 2001). Hier, und immer wenn

$$\Delta_{pv}E \gg \Delta E_{\pm} \quad [28]$$



gilt, ist das dann effektiv der in Abbildung 11B gezeigte Fall, mit lokalisierten Eigenzuständen bei tiefen Energien, die keine Spiegelbildsymmetrie zeigen. Das trifft in der Tat auf alle Moleküle mit stabilen, langlebigen Enantiomeren zu, die man „in Flaschen abfüllen“ kann. Abbildung 19 zeigt das Bild des Prototypmoleküls CHFCIBr als chirales Methanderivat.

Dieses Beispiel führt uns zur zweiten Aufgabe im Gesamtprojekt, der Entwicklung von Methoden zur Analyse hochaufgelöster Spektren von chiralen Molekülen im Infrarot- und sichtbaren (VIS) Bereich sowie auch im Ultraviolettbereich. Vor 1990 waren solche Analysen noch für kein einziges stabiles chirales Molekül geglückt.

Bevor wir hierauf im Detail eingehen, wollen wir aber noch auf ein prinzipielles Ergebnis der Theorie der Paritätsverletzung in chiralen Molekülen hinweisen. Wenn ein Energieniveauschema, wie in Abbildung 19 für CHFCIBr gezeigt, gilt, dann sind die beiden Enantiomeren nicht mehr genau spiegelbildähnlich, man kann also nicht mehr von Spiegelbildisomeren sprechen, sondern allenfalls von „approximativen Spiegelbildisomeren“. Die Rotationspektren und die Geometrieparameter im Grundzustand wie in der Gleichgewichtsgeometrie sind etwas verschieden (QUACK und STÖHNER 2000a, b). Alle Spektrallinien sind leicht verschieden, und auch die thermodynamischen Eigenschaften sind verschieden (QUACK und STÖHNER 2001), sogar die Verbrennungswärmen. Strenggenommen verhalten sich die beiden Enantiomere wie andere gewöhnliche Isomere (etwa cis- und trans-Isomere) ohne irgendwelche Symmetriebeziehungen. Da die Effekte der Asymmetrie jedoch sehr klein sind, ist es immer noch hilfreich von den Enantiomeren als ungefähren „Spiegelbildisomeren“ zu sprechen.

5.2 Entwicklung spektroskopischer Methoden zur Analyse von rotations-schwingungsaufgelösten Spektren chiraler Moleküle und experimentelle Prinzipien zum Nachweis der Paritätsverletzung in chiralen Molekülen

Es gibt eine Vielzahl von Vorschlägen unterschiedlicher Art zur Messung von paritätsverletzenden Effekten in chiralen Molekülen.³³ Soweit bekannt, werden aktuell nur zwei spektroskopische Prinzipien aktiv verfolgt. Das erste Prinzip geht auf einen Vorschlag von LETOKHOV (1975) zurück.³⁴ Es beruht auf einer Messung der Frequenzdifferenz $\nu_R - \nu_S$ von Spektrallinien im Infraroten oder in einem anderen Spektralbereich. Wie aus dem Schema in Abbildung 19 ersichtlich ist, entspricht eine solche Messung der Ermittlung einer Differenz von zwei paritätsverletzenden Energiedifferenzen ($\Delta_{p\nu}E$ und $\Delta_{p\nu}E^*$)

$$h\nu_R - h\nu_S = \Delta_{p\nu}E^* - \Delta_{p\nu}E . \quad [29]$$

Das zweite Prinzip wurde von QUACK (1986) vorgeschlagen und verwendet einen der speziellen Zwischenzustände von wohldefinierter Parität, wie sie in manchen angeregten Schwingungstunnelzuständen oder in angeregten elektronischen Zuständen vorkommen können. Wie aus dem Schema in Abbildung 19 ersichtlich ist, kann man hier aus der Differenz der beiden mit \approx markierten Übergänge zum Niveau positiver Parität (+ im Bild) direkt einen Wert für $\Delta_{p\nu}E$ separat ermitteln. In einer besonders interessanten Variante dieses Prinzips wird das Ergebnis über eine zeitliche Entwicklung der Parität erhalten (siehe unten).

33 Für einen Überblick siehe QUACK 2002, 2011b, 2014b.

34 Siehe auch KOMPANETS et al. 1976, ARIMONDO et al. 1977.

Für beide Messprinzipien muss die Bedingung [28] erfüllt werden, und für eine angemessene Planung und Auswertung müssen zunächst in einem ersten Schritt Spektren mit hoher Auflösung gemessen und analysiert werden. Die ersten Analysen dieser Art überhaupt in Infrarotspektren chiraler Moleküle gelangen in unserer Gruppe in Zürich für das Prototypmolekül CHFCIBr (BEIL et al. 1994, BAUDER et al. 1997) und das ringförmige Molekül Fluoroxiran CH_2CHFO (HOLLENSTEIN et al. 1997). Im Laufe der Jahre sind eine Reihe weiterer Analysen erfolgreich durchgeführt worden,³⁵ und ein Beispiel aus neuester Zeit ist das schon relativ komplexe Molekül Dithiin (ALBERT et al. 2016a, b).

Für das schon von KOMPANETS et al. (1976) ohne Analyse und erfolglos untersuchte Molekül CHFCIBr haben wir zwischen 1994 und 1997 Analysen und Tests an Spektren in Molekülstrahlen durchgeführt, wobei die Analysen mit Zuordnung der Quantenzustände erfolgreich waren, aber die Auflösung im Rahmen der besten erreichbaren Dopplerlinienbreiten Δv_D im Molekülstrahl bei tiefen Temperaturen mit

$$\frac{\Delta v_D}{v} \approx 7 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{T/\text{K}}{m/\text{Da}}} \quad [30]$$

bei weitem nicht genügt, um Paritätsverletzung nachzuweisen, wohl aber, um Linienkoinzidenzen mit CO_2 -Laserlinien für ultrahochoflösende Experimente zu identifizieren und vorzuschlagen (BAUDER et al. 1997). Aufbauend auf diesen Ergebnissen hat dann die Gruppe in Paris um BORDÉ und CHARDONNET Messungen an diesem Molekül mit $(\Delta v/v)$ ca. 4×10^{-13} durchgeführt (DAUSSY et al. 1999), immer noch weit entfernt vom vorhergesagten, um mehrere Größenordnung kleineren Effekt ($\approx 10^{-16}$) für dieses Molekül (STOHNER et al. 1999, QUACK und STOHNER 2000a, b, LAERDAHL et al. 2000a, QUACK und STOHNER 2003). Auch neuere Anstrengungen in Paris³⁶ und in Hamburg (SCHNELL und KÜPPER 2011) haben noch nicht zum Erfolg geführt.

Damit wenden wir uns dem in Zürich seit Mitte der 1990er Jahre schrittweise aufgebauten Experiment nach dem Prinzip von QUACK (1986) mehr im Detail zu (Abb. 20). Hier wird mit Hilfe des schon in Abbildung 19 diskutierten Zwischenzustandes wohldefinierter (hier positiver +) Parität in einem zweiten Schritt durch stimulierte Emission ein zeitabhängiger Superpositionszustand wohldefinierter Parität (-) erzeugt, der sich dann langsam in einen Zustand positiver Parität umwandelt („Evolution“ in Abb. 20). Die zeitliche Besetzung des Zustandes positiver Parität folgt im Evolutionsschritt der Gleichung

$$p_+(t) = \sin^2(\pi t \Delta_{pv} E / h) = 1 - p_- \approx \pi^2 t^2 \Delta_{pv} E^2 / h^2 \quad (\text{kleine } t). \quad [31]$$

Die Periode dieses Prozesses liegt für typische Werte von $\Delta_{pv} E$ im Bereich von Sekunden. Da man aber sehr kleine Werte von p_+ ($< 10^{-6}$) im Detektionsschritt mit Mehrphotonenionisation durch den Nachweis weniger Ionen messen kann, genügen Messzeiten im Millisekundenbereich um ein messbares Signal zu erhalten.

35 Siehe QUACK 2011b, ALBERT und QUACK 2014.

36 Siehe den Überblick in TOKUNAGA et al. 2013.

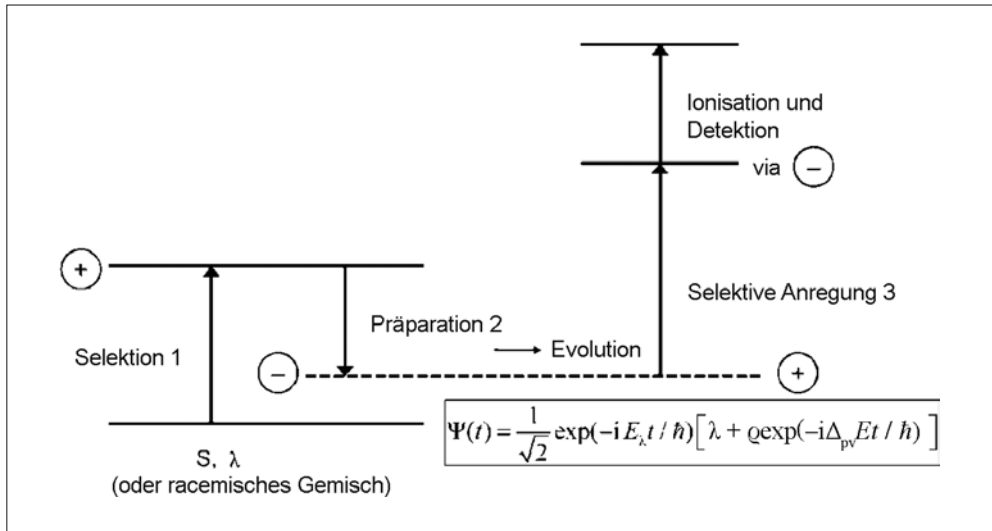


Abb. 20 Schema für das zeitabhängige Experiment zur Messung der paritätsverletzenden Energiedifferenz $\Delta_{pv}E$ nach QUACK (1986; siehe auch QUACK 2011a, 2014b) mit den Schritten der Selektion, Präparation, Evolution und empfindlicher Detektion.

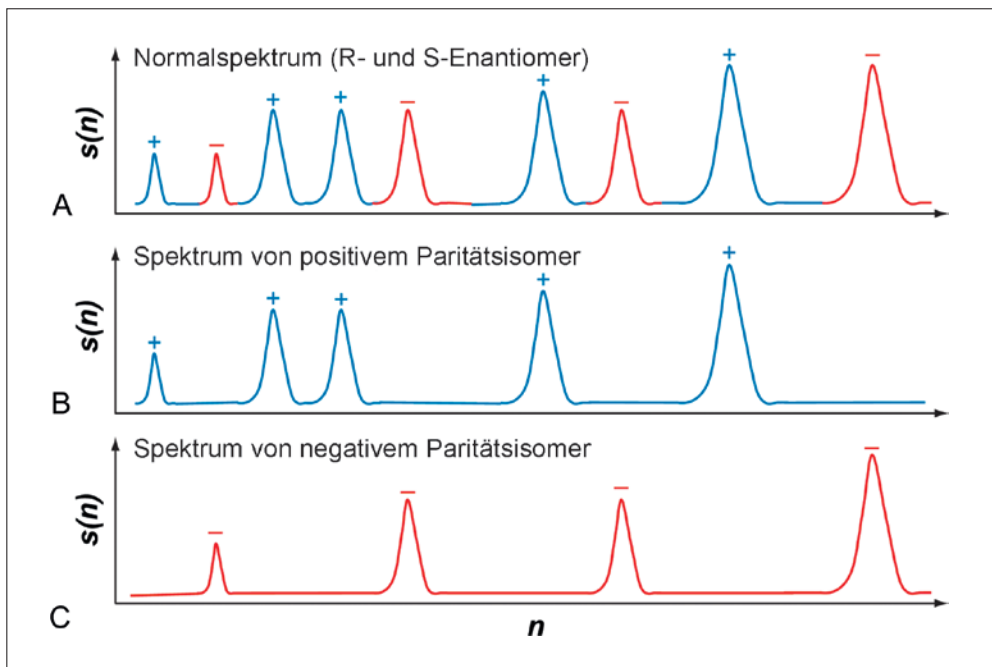


Abb. 21 Schematische Darstellung eines Spektrums, das Linien positiver und negativer Parität zuordnet. (A): Spektrum eines Enantiomeren oder Racemats, (B) und (C): Spektren der Paritätsisomeren (nach QUACK et al. 2008, siehe Diskussion im Text).

Die Zustände wohldefinierter Parität haben als Superpositionen von R- und S-Enantiomeren besondere Eigenschaften, die klassisch mechanisch unmöglich wären. Sie sind bistruktural, haben also gleichzeitig R- und S-Charakter. Ein anfangs nach dem Selektions- und Präparationsschritt erzeugter Zustand wohldefinierter Parität (das „Paritätsisomere“, mit Symbol – im Kreis in Abb. 20) hat ein Linienspektrum, in dem alle Linien fehlen, die der positiven Parität im normalen Spektrum zugeordnet werden (unterstes Spektrum in Abb. 21B).

Das Spektrum wandelt sich allmählich in das mittlere Spektrum in Abbildung 21 um, das nach einer halben Periode nur noch Linien hat, die der positiven Parität zugeordnet werden. Der empfindliche Nachweis erfolgt mit einem Laser hoher Auflösung an einer Position einer anfänglich „verbotenen“ („positiven“) Linie.

Die Zeitabhängigkeit der Parität durch eine Symmetrieverletzung erlaubt nach diesem Verfahren, diesen sehr kleinen Effekt unabhängig von Unsicherheiten in den sehr viel größeren paritätserhaltenden Anteilen des molekularen Hamiltonoperators zu bestimmen. Das ist ein Sonderfall eines allgemeinen Prinzips, nach dem Primärprozesse auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen als sequentielle Symmetriebrechung verstanden werden können.³⁷

Solche Experimente sind bisher an dem einfachen achiralen Ammoniakmolekül NH_3 durchgeführt worden, wo man keine Werte für $\Delta_{p\nu}E$ bestimmen kann, aber die Effizienz und Empfindlichkeit der drei Schritte genau nach diesem Schema mit einem sehr einfachen und gut verstandenen Spektrum austesten kann.

Abbildung 22 zeigt zur Veranschaulichung den experimentellen Aufbau eines solchen Molekülstrahlexperimentes (DIETIKER et al. 2015). Man erkennt die beiden dicht nebeneinander liegenden Laserstrahlen im linken Anfangsteil des Molekülstrahls und den Detektionslaserstrahl im rechten Teil des Strahlexperimentes. Für solche Experimente werden Dauerstrich-Laser hoher Auflösung (MHz), Intensität und Stabilität (durch Kopplung an

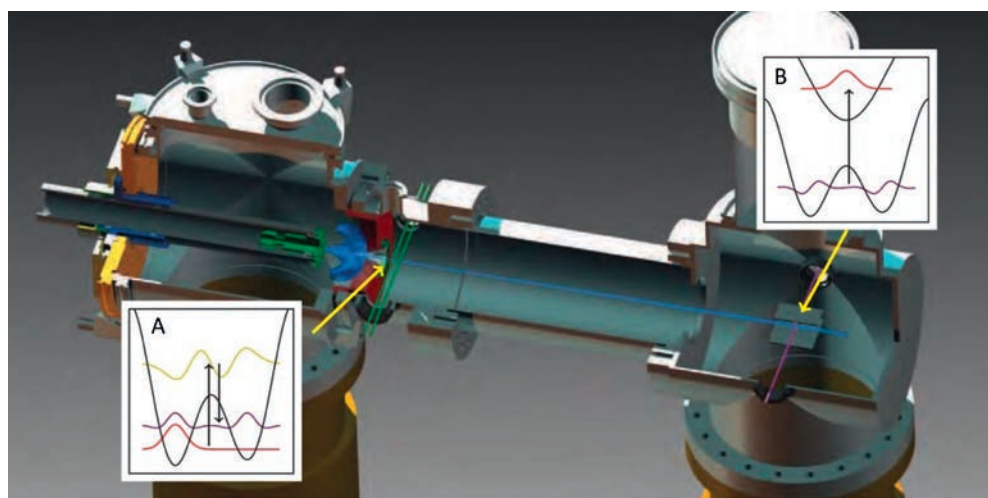


Abb. 22 Experimenteller Aufbau des Molekülstrahlexperimentes zur Messung von $\Delta_{p\nu}E$ (nach DIETIKER et al. 2015). Der Einschub (A) symbolisiert die Schritte der Präparation und der Einschub (B) den Detektionsschritt (siehe Abb. 20).

37 Siehe QUACK 2011b, 1977.

einen Frequenzkamm) benötigt. Die Flugstrecke ist etwa 80 cm mit einer Flugzeit für den Evolutionsschritt von ca. 1,3 ms, und es wurde im realen Experiment eine Empfindlichkeit abgeschätzt (entsprechend $p \approx 10^{-6}$), die eine Messung von $\Delta_{pv}E \approx (hc) 10^{-12} \text{ cm}^{-1}$ erlaubt. Damit wird ein Bereich erschlossen, der schon durch Moleküle mit Atommassen bis etwa 40 erreicht wird.

Für die Umsetzung eines solchen Experimentes an einem chiralen Molekül gibt es eine Reihe von Anforderungen. Abbildung 23 zeigt ein Potential- und Energieniveauschema, wie es für ein geeignetes Molekül aussehen muss. Ein Zwischenzustand wohl definierter Parität kann entweder in einem angeregten Elektronenzustand, der achiral (planar) ist (oberes Potential), oder im elektronischen Grundzustand bei Schwingungsanregungen nahe oder oberhalb der Barriere für die Stereomutation (unteres Potential), wo die Energiezustände große Werte der Tunnelaufspaltung $\Delta E_{\pm} \gg \Delta E_{pv}$ zeigen. Für ein solches Beispiel

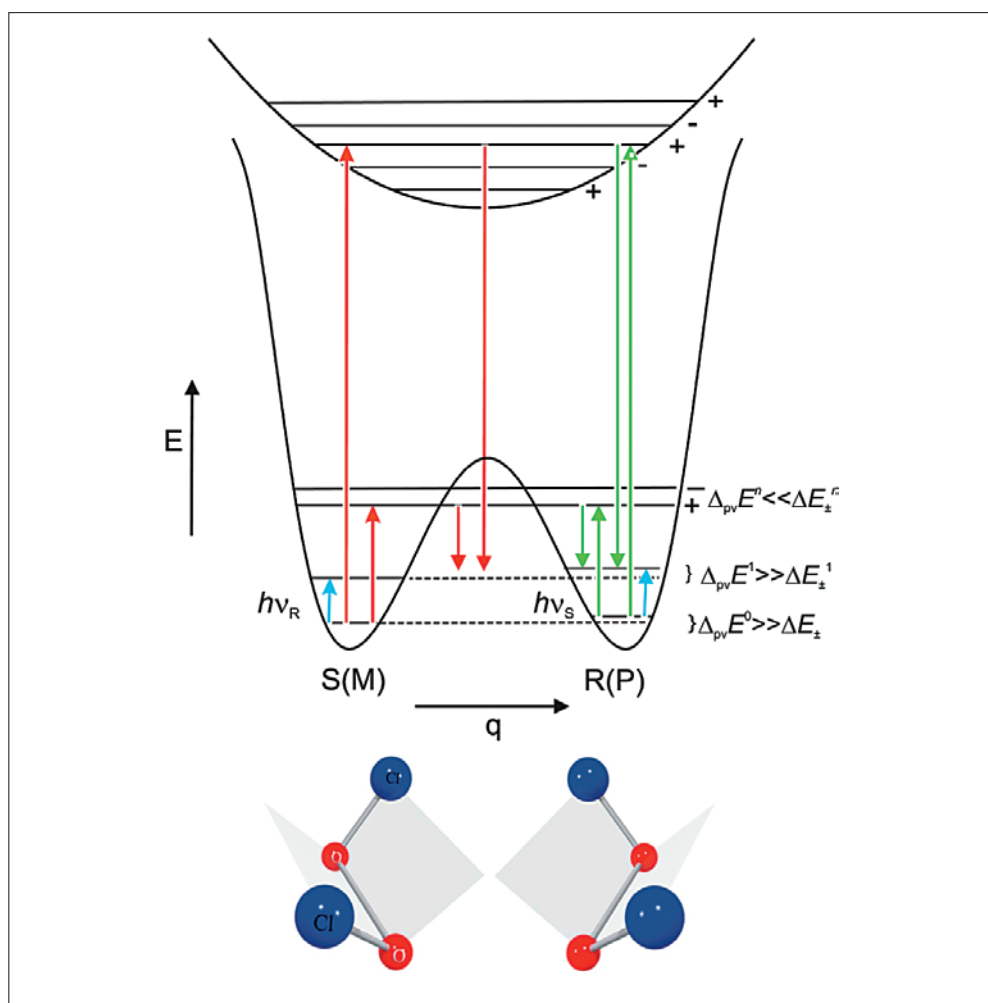


Abb. 23 Potentiale und Energieniveaus von CIOOCl oder ähnlichen Molekülen (QUACK und WILLEKE 2006), schematisch

(ClOOCl) wurde eine vollständige theoretische Simulation durchgeführt und so die prinzipielle Funktion des Experiments an einem chiralen Molekül unter realistischen Bedingungen demonstriert (PRENTNER et al. 2015).³⁸ Allerdings gibt es in dem hierfür benötigten Frequenzbereich im tieferen Infrarot zurzeit keine geeigneten Laser. Das aktuelle Experiment am NH_3 wurde mit Lasern durchgeführt, die im Bereich oberhalb ca. 2400 cm^{-1} effizient sind. In neuester Zeit haben wir in theoretischen und spektroskopischen Untersuchungen einige wenige, chirale Moleküle identifiziert, die alle Bedingungen für das Experiment erfüllen. Dabei handelt es sich um 1,2-Dithiin ($\text{C}_2\text{H}_4\text{S}_2$) (ALBERT et al. 2016a, b), Trisulfan (HSSSH) (FÁBRI et al. 2015a) und 1,3-Difluorallen (GOTTSELIG und QUACK 2005), 1,3-Dichlorallen (CHClCCHCl) und 1-Chlor,3-Fluor-Allen (CHClCCHF) (HORNÝ und QUACK 2015a,b). Bei den Allenen würde der Prozess über einen angeregten Elektronenzustand realisiert (GOTTSELIG und QUACK 2005), allerdings haben diese Moleküle relativ kleine Werte von $\Delta_{\text{pv}}E$, so dass diese Experimente im schwierigen Bereich zu sehen sind. 1,2-Dithiin ist ein chirales Ringmolekül nicht-planarer Struktur mit C_2 -Symmetrie, das einen besonders hohen Wert von $\Delta_{\text{pv}}E$ besitzt, $\Delta_{\text{pv}}E = (hc) 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$, bei Schwefel als schwerstem Atom ungewöhnlich hoch (vgl. CISSCI), und durch seine starre Gerüststruktur trotz der relativ großen Anzahl von Atomen ein analysierbares Infrarotspektrum hat, so dass uns erste Analysen schon gelungen sind (ALBERT et al. 2016a, b). Die Barriere für Stereomutation ist mit ca. 2500 cm^{-1} in einem Bereich, der Tunnelzustände wohldefinierter Parität mit den bei uns vorhandenen Lasersystemen zugänglich macht.

Abbildung 24 zeigt die Enantiomere dieses interessanten Moleküls 1,2-Dithiin. Trisulfan (HSSSH) hat etwas kleinere Werte von $\Delta_{\text{pv}}E \approx 1,2 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-1}$, die aber noch im messbaren Bereich liegen, bei einer kleineren Atomzahl als 1,2-Dithiin, aber einer durch die zwei SH-Rotoren komplexen Tunneldynamik (FÁBRI et al. 2015a).

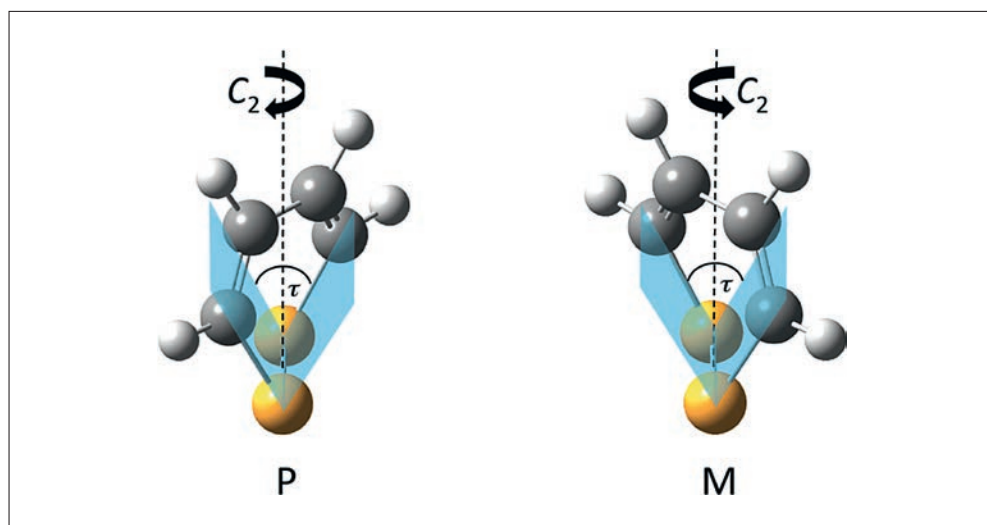


Abb. 24 Die Enantiomere von 1,2-Dithiin (nach ALBERT et al. 2016a, b)

38 Siehe auch QUACK und WILLEKE 2006 sowie HORNÝ und QUACK 2015b.

Hiermit sind die Voraussetzungen gegeben, dass nach spektroskopischer Identifizierung von Niveaus wohldefinierter Parität im Infrarotspektrum dieser Moleküle in einem nächsten Schritt ein Experiment, wie an NH_3 demonstriert (DIETIKER et al. 2015), in relativ naher Zukunft an einem dieser chiralen Moleküle ausgeführt werden kann.

Der Weg für eine Messung der paritätsverletzenden Energiedifferenz $\Delta_{\text{pv}}E$ zwischen den Enantiomeren chiraler Moleküle, die auf der sehr geringen Abweichung von einer exakten Spiegelsymmetrie des Raumes beruht, ist jetzt geebnet, wenn auch noch nicht bis zum Ende gegangen.

6. Résumé und Ausblick

Wir haben in unserem Vortrag einen Überblick gegeben über die Konsequenzen der Spiegelsymmetrie des Raumes (und der Abweichungen hiervon) für die molekulare Chiralität im Bild der „klassischen“ quasimakroskopischen Modellvorstellungen der Chemie und Biochemie sowie im Bild der Quantenmechanik unter Einbezug des Tunneleffektes. Wir haben schließlich auch den Einfluss der aus der Kern- und Teilchenphysik bekannten Paritätsverletzung erläutert. Das wollen wir in einigen Sätzen zusammenfassen.

- Die klassischen Modellvorstellungen zu den „Spiegelbildmolekülen“ erlauben ein Verständnis der gewöhnlichen stereoselektiven Reaktivität chiraler Moleküle nach dem Schlüssel-Schloss- oder Hand-Handschuh-Prinzip auch bei perfekter Spiegelsymmetrie.
- Der Ursprung der biologischen Homochiralität bleibt bis heute unverstanden, wegen verschiedener, widersprüchlicher Erklärungen (*De-facto*- oder *De-lege*-Symmetriebrechung). Dagegen ist die Vererbung der Homochiralität wegen der Stabilität chiraler Moleküle offensichtlich.
- Konsistente Homochiralität ist ein rein chemisches Indiz des Lebens und könnte prinzipiell etwa durch spektroskopische Beobachtung an Planeten oder Exoplaneten zum Nachweis außerirdischen Lebens verwendet werden.
- Die quantenmechanische Beschreibung der molekularen Chiralität führt zu klassisch-mechanisch unerwarteten Phänomenen wie Tunneleffekt, delokalisierten Strukturen und hypothetischen „Paritätsisomeren“ mit Bistrukturalität.
- Die Asymmetrie der elektroschwachen Wechselwirkung (der „schwachen Kernkraft“) führt zu einem kleinen Energieunterschied ($\Delta_{\text{pv}}E$) zwischen den Enantiomeren chiraler Moleküle, die deshalb streng genommen nicht mehr als Spiegelbildisomere bezeichnet werden können. Dieser Energieunterschied kann theoretisch quantitativ berechnet und vorhergesagt werden zu ca. 100 aeV (entsprechend ca. 10 pJ/mol), oder auch größer, je nach Molekül. Diese kleine Asymmetrie dominiert die Dynamik bei gewöhnlichen, stabilen chiralen Molekülen bei weitem (verglichen mit dem Tunneleffekt): Die Paritätsverletzung ist entscheidend für das heutige Verständnis der molekularen Chiralität.
- Bis heute gibt es keinen experimentellen Nachweis des Energieunterschiedes zwischen den Enantiomeren. Er kann in laufenden Experimenten (vielleicht bald ...) durch die Zeitentwicklung der Parität, die sich als neuer intramolekularer Primärprozess aus der Symmetrieverletzung ergibt, prinzipiell quantitativ bestimmt werden.
- Die Spiegelbildasymmetrie durch Paritätsverletzung ist eine mögliche, aber keine bewiesene Ursache der Evolution der biologischen Homochiralität.

Hieraus ergeben sich auch einige Fragen für die Zukunft. Zum einen ist der Ausgang des Experimentes zur molekularen Paritätsverletzung noch offen, er könnte die heutige Theorie bestätigen oder widerlegen. Man könnte Fehler in den heute gebräuchlichen theoretischen Rechnungen aufdecken. Solche Fehler könnten trivialer Natur sein und dann leicht korrigiert werden. Prinzipiell könnten mögliche Abweichungen aber auch einen tieferehenden neuen Test für das heutige Standardmodell der Teilchenphysik ergeben in einem Bereich „leichter Atome“ (mit Massen unter 50 Da), der bisher noch nicht durch andere Tests erschlossen wurde (für „schwere Atome“ wie Cs gibt es Tests aus der Atomspektroskopie). Grundsätzlich sind bei jedem neuen Test in einem neuen Bereich Überraschungen möglich.

Weitergehende Untersuchungen könnten auch neue Einblicke in die Frage der Evolution der biologischen Homochiralität geben. Hier bietet sich ein interessanter Vergleich mit dem „Schneckenbild“ (Abb. 9B) an. Oberflächlich betrachtet, sehen die beiden Schneckenformen wie Spiegelbilder zueinander aus, aber wir wissen, dass diese makroskopische Spiegelbildsymmetrie täuschend ist, da die Schnecken in ihrem molekularen mikroskopischen Aufbau nicht Spiegelbilder zueinander sind (beide enthalten dieselben Formen von L-Aminosäuren in ihren Proteinen, nicht spiegelbildsymmetrisch ausgetauscht). Weitere Untersuchungen können dann zeigen, ob die Prävalenz einer Form auf der mikroskopischen Asymmetrie beruht. Analog wissen wir heute aus der Theorie, dass die Spiegelbildsymmetrie von Enantiomeren in unserer quasimakroskopischen Modellvorstellung täuschend ist. Auf der „mikroskopischen“ (man könnte auch sagen „femtoskopischen“, „attoskopischen“ oder gar „yoctoskopischen“) Ebene der Elementarteilchen und Feldteilchen, aus denen die Enantiomere aufgebaut sind, besteht die Spiegelbildsymmetrie nicht, was letztlich eine Konsequenz der Evolution des Universums ist.

Tabelle 3 fasst die merkwürdigen Asymmetrien, die wir in unserer heutigen Welt beobachten, zusammen. Man kann diese Asymmetrien als Quasi-Fossilien der Evolution des Universums und des Lebens bezeichnen, die eine Nachricht enthalten, die wir noch nicht entschlüsselt haben (das Überwiegen der Materie über Antimaterie im Universum ist bis heute im Rahmen des Standardmodells auch noch nicht quantitativ verstanden, so dass die Deutung dieser Beobachtung ebenfalls noch offen bleibt).³⁹

Tab. 3 Asymmetrien in der von uns beobachteten Welt (QUACK 2011c)

| Beobachtungen: Wir leben in einer Welt | | Symmetrie |
|--|---|------------|
| 1. | Aus Materie (hauptsächlich), nicht Antimaterie | C, CP, CPT |
| 2. | Mit Biopolymeren (Proteine, DNA, RNA) aus L-Aminosäuren und D-Zuckern (nicht D-Aminosäuren und L-Zuckern) in gewöhnlichen Lebewesen | P |
| 3. | Wo die Zeit ‚vorwärts‘ läuft, nicht rückwärts | T |

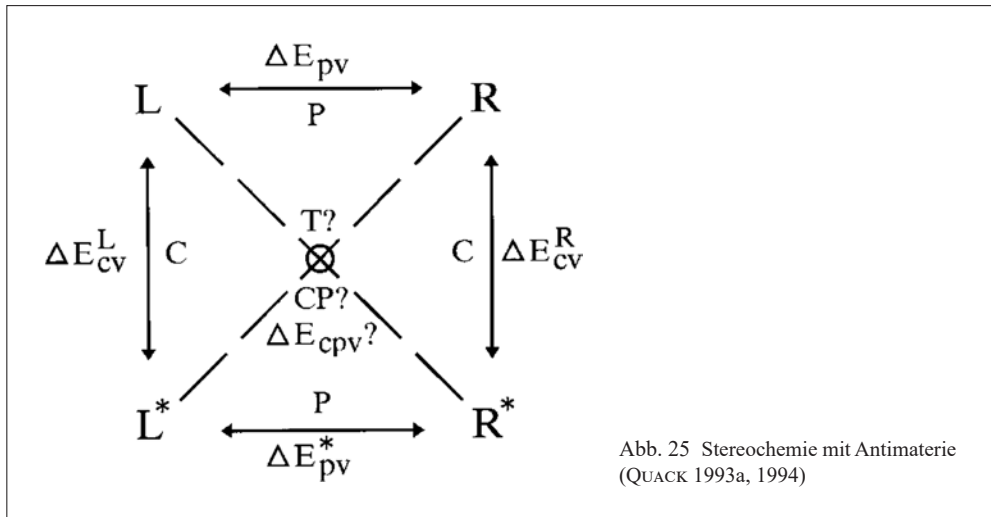
In einem früheren Vortrag (QUACK 1999) haben wir auf eine noch grundlegendere, hypothetische Asymmetrie hingewiesen. Bis heute gilt die kombinierte Symmetrie CPT der drei Spiegelungen (Raumspiegelung P, Ladungskonjugation C als „Spiegelung“ durch Austausch von Teilchen durch Antiteilchen und „Spiegelung der Zeit“ T „vorwärts“ oder

³⁹ Siehe DINE und KUSENKO 2004, QUACK 2012, HASINGER 2016.

„rückwärts“, durch Umkehrung der Impulse) als exakte Symmetrie der Physik. Im Vortrag von GABRIELSE (2016) wurden aktuelle Tests mit der Präzision ca. 10^{-10} für Teilchen und Antiteilchen vorgestellt.

Eine mögliche Asymmetrie könnte nach einem Vorschlag von QUACK (1994) mit extremer Empfindlichkeit von bis zu ca. $\Delta m/m = 10^{-30}$ mit dem prinzipiell gleichen Experiment, wie wir es für die Paritätsverletzung vorgestellt haben, nachgewiesen werden.⁴⁰

Abbildung 25 erläutert das Experiment. Es läuft auf die Überprüfung hinaus, ob die Spektren z. B. eines L-Enantiomeren aus Materie mit den Spektren des R-Enantiomeren aus Antimaterie übereinstimmen (Abb. 25 verwendet die „physikalische“ Notation L/R für Links/Rechts). Eine Abweichung würde Verletzung der CPT-Symmetrie beweisen (QUACK 1993a, 1994, 2003). Das Experiment verbindet Hochenergiephysik, hochauflösende Spektroskopie



und Stereochemie. Eine noch weitergehende Spekulation zu diesem Schema deutet die scheinbare Abwesenheit von rechts-helikalen Neutrinos im Sinne einer möglichen Erklärung dunkler Materie. Die heute bekannten Neutrinos sind ausschließlich links-helikal, die Antineutrinos rechts-helikal, die fehlenden Enantiomeren könnten (rein spekulativ!) eine große Masse haben und real existieren, obwohl sie bisher nicht gefunden wurden.⁴¹

Dank

Zahlreiche Mitarbeiter haben zu unseren experimentellen und theoretischen Untersuchungen beigetragen. Sie sind im Literaturverzeichnis erwähnt, und eine vollständige Zusammenstellung findet sich in ERNST et al. (2013). Unsere Arbeiten werden finanziell von der ETH Zürich, dem Schweizerischen Nationalfonds und dem *European Research Council* unterstützt (ERC Advanced Grant No. 290925). Frau Ruth SCHÜPBACH bin ich sehr zu Dank verpflichtet für die Übertragung des Manuskriptes in eine gute Form.

⁴⁰ Siehe auch QUACK 2003.

⁴¹ Siehe auch QUACK 2011a, b, QUACK 2014b.

Literatur

- ALBERT, S., ARN, F., BOLOTOVA, I., CHEN, Z., FÁBRI, C., GRASSI, G., LERCH, P., QUACK, M., SEYFANG, G., WOKAUN, A., and ZINDEL, D.: Synchrotron-based highest resolution Terahertz spectroscopy of the ν_{24} band system of 1,2-dithiine ($C_4H_4S_2$): A candidate for measuring the parity violating energy difference between enantiomers of chiral molecules. *J. Phys. Chem. Lett.* **7**, 3847–3853 (2016a)
- ALBERT, S., BOLOTOVA, I., CHEN, Z., FÁBRI, C., HORNÝ, L., QUACK, M., SEYFANG, G., and ZINDEL, D.: High resolution GHz and THz (FTIR) spectroscopy and theory of parity violation and tunneling for 1,2-dithiine ($C_4H_4S_2$) as a candidate for measuring the parity violating energy difference between enantiomers of chiral molecules. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 21976–21993 (2016b)
- ALBERT, S., und QUACK, M.: Höchstauflösende FTIR-Spektroskopie. *Trendbericht Physikalische Chemie 2013. Nachrichten aus der Chemie* **62**, 313–318 (2014)
- ARAGO, D. F. J.: Mémoire sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage à travers certains corps diaphanes et sur quelques autres phénomènes d'optique. *Mem. de l'Institut* **12** (Part 1), 93–134 (1811)
- ARIMONDO, E., GLORIEUX, P., and OKA, T.: Observation of inverted infrared Lamb dips in separated optical isomers. *Opt. Commun.* **23**, 369–372 (1977)
- BAKASOV, A., BERGER, R., HA, T. K., and QUACK, M.: Ab initio calculation of parity-violating potential energy hypersurfaces of chiral molecules. *Int. J. Quantum Chem.* **99**, 393–407 (2004)
- BAKASOV, A., HA, T. K., and QUACK, M.: Ab initio calculation of molecular energies including parity violating interactions. In: CHELA-FLORES, J., and RAULIN, F. (Eds.): *Chemical Evolution, Physics of the Origin and Evolution of Life. Proc. of the 4th Trieste Conference* (1995); pp. 287–296. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 1996
- BAKASOV, A., HA, T. K., and QUACK, M.: Ab initio calculation of molecular energies including parity violating interactions. *J. Chem. Phys.* **109**, 7263–7285 (1998)
- BAKASOV, A., and QUACK, M.: Representation of parity violating potentials in molecular main chiral axes. *Chem. Phys. Lett.* **303**, 547–557 (1999)
- BARRON, L. D.: *Molecular Light Scattering and Optical Activity*. 2nd Ed. Cambridge: University Press 2004
- BAST, R., KOERS, A., GOMES, A. S. P., ILIAS, M., VISSCHER, L., SCHWERTFEGER, P., and SAUE, T.: Analysis of parity violation in chiral molecules. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13**, 864–876 (2011)
- BAUDER, A., BEIL, A., LUCKHAUS, D., MÜLLER, F., and QUACK, M.: Combined high resolution infrared and microwave study of bromochlorofluoromethane. *J. Chem. Phys.* **106**, 7558–7570 (1997)
- BEIL, A., LUCKHAUS, D., MARQUARDT, R., and QUACK, M.: Intramolecular energy-transfer and vibrational redistribution in chiral molecules – experiment and theory. *Faraday Discuss.* **99**, 49–76 (1994)
- BENNETT, S. C., and WIEMAN, C. E.: Measurement of the $6S \rightarrow 7S$ transition polarizability in atomic cesium and an improved test of the standard model. *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2484–2487 (1999)
- BERGER, R.: Parity-violation effects in molecules. In: SCHWERTFEGER, P. (Ed.): *Relativistic Electronic Structure Theory. Part 2 (Applications)*, Chapt. 4, pp. 188–288. Amsterdam: Elsevier 2004
- BERGER, R., GOTTSELIG, M., QUACK, M., and WILLEKE, M.: Parity violation dominates the dynamics of chirality in dichlorodisulfane. *Angew. Chem. Int. Ed.* **40**, 4195–4198 (2001), *Angew. Chem.* **113**, 4342–4345 (2001)
- BERGER, R., LAUBENDER, G., QUACK, M., SIEBEN, A., STOHNER, J., and WILLEKE, M.: Isotopic chirality and molecular parity violation. *Angew. Chem. Int. Ed.* **44**, 3623–3626 (2005), *Angew. Chem.* **117**, 3689–3693 (2005)
- BERGER, R., and QUACK, M.: Electroweak quantum chemistry of alanine: Parity violation in gas and condensed phases. *ChemPhysChem.* **1**, 57–60 (2000a)
- BERGER, R., and QUACK, M.: Multiconfiguration linear response approach to the calculation of parity violating potentials in polyatomic molecules. *J. Chem. Phys.* **112**, 3148–3158 (2000b) (cf. BERGER, R., and QUACK, M.: *Proc. 37th IUPAC Congress. Vol. 2*, p. 518, Berlin, 1999)
- BERGER, R., QUACK, M., and TSCHUMPER, G. S.: Electroweak quantum chemistry for possible precursor molecules in the evolution of biomolecular homochirality. *Helv. Chim. Acta* **83**, 1919–1950 (2000)
- BERGER, R., and VAN WÜLLEN, C.: Density functional calculations of molecular parity-violating effects within the zeroth-order regular approximation. *J. Chem. Phys.* **122**, 134316 (2005)
- BIJVOET, J. M., PEERDEMAN, A. F., and VAN BOMMEL, A. J.: Determination of the absolute configuration of optically active compounds by means of X-rays. *Nature* **168**, 271–272 (1951), *Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap B54*, 16 (1951)

- BIOT, J.-B.: Mem. de l'Institut 13 (Part 1), 218 (1812)
- BIOT, J.-B.: Ann. Chim. 9, 382 (1818a)
- BIOT, J.-B.: Ann. Chim. 120, 63 (1818b)
- BIRNBACHER, D.: Symmetriebrüche in der Moral. In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 29–44 (2016)
- BLACKMOND, D. G.: "Chiral amnesia" as a driving force for solid-phase homochirality. Chemistry – A European J. 13, 3290–3295 (2007)
- BLACKMOND, D. G., McMILLAN, C. R., RAMDEEHUL, S., SCHORM, A., and BROWN, J. M.: Origins of asymmetric amplification in autocatalytic alkylzinc additions. J. Amer. Chem. Soc. 123, 10103–10104 (2001)
- BOLLI, M., MICURA, R., and ESCHENMOSE, A.: Pyranosyl-RNA: Chiroselective self-assembly of base sequences by ligative oligomerization of tetranucleotide-2',3'-cyclophosphates (with a commentary concerning the origin of biomolecular homochirality). Chem. Biol. 4, 309–320 (1997)
- BONFILS, X., DELFOSSE, X., UDRY, S., FORVEILLE, T., MAYOR, M., PERRIER, C., BOUCHY, F., GILLON, M., LOVIS, C., PEPE, F., QUELOZ, D., SANTOS, N. C., SEGRANSAN, D., and BERTAUX, J. L.: The HARPS search for southern extra-solar planets XXXI. The M-dwarf sample. Astron. Astrophys. 549, A109 (2013)
- BONNER, W.: Origins of chiral homogeneity in nature. In: ELIEL, E. L., and WILEN, S. H. (Eds.): Topics in Stereochemistry. Vol. 18, pp. 1–96. New York: Wiley 1988
- BONNER, W. A.: Chirality and life. Orig. Life Evol. Biosph. 25, 175–190 (1995)
- BOUCHIAT, M. A., and BOUCHIAT, C.: Parity violation induced by weak neutral currents in atomic physics 1. J. Physique 35, 899–927 (1974)
- BOUCHIAT, M. A., and BOUCHIAT, C.: Parity violation induced by weak neutral currents in atomic physics 2. J. Physique 36, 493–509 (1975)
- BOURGOIS, C. (Ed.): A. Werner, Louis Pasteur, Jacobus Henricus van't Hoff, Recherches sur la dissymétrie moléculaire (1860–1883). Dole: Collection Epistème 1986
- BREDEKAMP, H.: Ohne Abweichung kein Leben – Die bildende Kunst und die Symmetrie. In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 187–209 (2016)
- BRESLOW, R., and CHENG, Z.-L.: On the origin of terrestrial homochirality for nucleosides and amino acids. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106, 9144–9146 (2009)
- BRESLOW, R., and LEVINE, M. S.: Amplification of enantiomeric concentrations under credible prebiotic conditions. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103, 12979–12980 (2006)
- BRUCKNER-TUDERMAN, L.: Symmetrie und Asymmetrie von Hautveränderungen: medizinisch relevant? [Abstract]. In: HACKER, J. (Hrsg.): Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412 [Vorabdruck], 25 (2015)
- BRUNNER, H.: Rechts oder links in der Natur und anderswo. Weinheim: Wiley-VCH 1999
- BÜSCHGES, A.: Neuronale Kontrolle der Fortbewegung – Erzeugung adaptiver Bewegungsmuster auf Basis struktureller Symmetrien. In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 211–229 (2016)
- CAHN, R. S., INGOLD, C., and PRELOG, V.: Specification of molecular chirality. Angew. Chem.-Int. Edit. 5, 385–415 (1966), Angew. Chem. 78, 413–447 (1966)
- CALVIN, M.: Chemical Evolution. Oxford: Oxford University Press 1969
- CERN: <http://doc.cern.ch/archive/electronic/cern/others/PHO/photo-di/9809005.jpeg>.
- CHELA-FLORES, J.: Comments on a novel-approach to the role of chirality in the origin of life. Chirality 3, 389–392 (1991)
- CONTI, R., BUCKSBAUM, P., CHU, S., COMMINS, E., and HUNTER, L.: Preliminary observation of parity nonconservation in atomic Thallium. Phys. Rev. Lett. 42, 343–346 (1979)
- DAUSSY, C., MARREL, T., AMY-KLEIN, A., NGUYEN, C. T., BORDÉ, C. J., and CHARDONNET, C.: Limit on the parity nonconserving energy difference between the enantiomers of a chiral molecule by laser spectroscopy. Phys. Rev. Lett. 83, 1554–1557 (1999)
- DIETIKER, P., MILOGLYADOV, E., QUACK, M., SCHNEIDER, A., and SEYFANG, G.: Infrared laser induced population transfer and parity selection in $^{14}\text{NH}_3$: A proof of principle experiment towards detecting parity violation in chiral molecules. J. Chem. Phys. 143, 244305 (2015)
- DINE, M., and KUSENKO, A.: Origin of the matter-antimatter asymmetry. Rev. Mod. Phys. 76, 1–30 (2004)
- DIRAC, P. A. M.: Quantum mechanics of many-electron systems. Proc. Roy. Soc. London Series A 123, 714–733 (1929)

- DUNITZ, J. D.: *X-Ray Analysis and the Structure of Organic Molecules*. Ithaca N. Y.: Cornell University Press 1979
- EIGEN, M.: Self-organization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften* 58, 465–523 (1971)
- EIGEN, M.: *Das Urigen*. Nova Acta Leopoldina NF 52, 3–37 (1982)
- EIGEN, M.: *Stufen zum Leben*. München: Piper 1987
- EIGEN, M., and WINKLER, R.: *Das Spiel*. München: Piper 1975
- EINSTEIN, A.: *Grundzüge der Relativitätstheorie*. Wiesbaden: Vieweg 1922
- ERNST, R. R., CARRINGTON, T. Jr., SEYFANG, G., and MERKT, F.: Editorial. In: Special Issue of Molecular Physics dedicated to Martin Quack on the occasion of his 65th birthday. *Mol. Phys.* 111, 1939–1963 (2013)
- FÁBRI, C., HORNÝ, L., and QUACK, M.: Tunneling and parity violation in trisulfane (HSSSH): An almost ideal molecule for detecting parity violation in chiral molecules. *ChemPhysChem*. 16, 3584–3589 (2015a)
- FÁBRI, C., MARQUARDT, R., and QUACK, M.: Full-dimensional quantum dynamics and spectroscopy of ammonia isotopomers. In: Proceedings XVIIth International Workshop on Quantum Atomic and Molecular Tunneling in Solids and other Phases, May 31 – June 3, 2015, Beatenberg/Interlaken, Switzerland; p. L42 (2015b, and to be published)
- FEHRENSSEN, B., LUCKHAUS, D., and QUACK, M.: Stereomutation dynamics in hydrogen peroxide. *Chem. Phys.* 338, 90–105 (2007)
- FERMI, E.: Possible production of elements of atomic number higher than 92. *Nature* 133, 898–899 (1934a)
- FERMI, E.: Versuch einer Theorie der Beta-Strahlen. *Z. Phys.* 88, 161–177 (1934b)
- FISCHER, E.: Einfluss der Configuration auf die Wirkung der Enzyme. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 27, 2985–2993 (1894)
- FRANK, F. C.: On spontaneous asymmetric synthesis. *Biochim. Biophys. Acta* 11, 459–463 (1953)
- FRANK, P., BONNER, W., and ZARE, R. N.: On the one hand but not on the other: The challenge of the origin and survival of homochirality in prebiotic chemistry. In: KEINAN, E., and SCHECHTER, I. (Eds.): *Chemistry for the 21st Century*. Chapt. 11, pp. 175–208. Weinheim: Wiley-VCH, 2001
- FRIEDMAN, J. I., and TELEGDY, V. L.: Nuclear emulsion evidence for parity nonconservation in the decay chain $\pi^+ - \mu^+ - e^+$. *Phys. Rev.* 105, 1681–1682 (1957)
- FRITZSCH, H.: Symmetrien in der Physik. In: QUACK, M., and HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 75–90 (2016)
- FUSS, W.: Does life originate from a single molecule? *Chirality* 21, 299–304 (2009)
- GABRIELSE, G.: Probing nature's fundamental symmetries. One slow particle at a time. In: QUACK, M., and HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 91–98 (2016)
- GARWIN, R. L., LEDERMAN, L. M., and WEINRICH, M.: Observations of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays – magnetic moment of the free muon. *Phys. Rev.* 105, 1415–1417 (1957)
- GIRARD, C., and KAGAN, H. B.: Nonlinear effects in asymmetric synthesis and stereoselective reactions: Ten years of investigation. *Angew. Chem. Int. Ed.* 37, 2922–2959 (1998), *Angew. Chem.* 110, 3088–3127 (1998)
- GLASHOW, S. L.: Partial-symmetries of weak interactions. *Nuclear Phys.* 22, 579–588 (1961)
- GOTTSSELIG, M., and QUACK, M.: Steps towards molecular parity violation in axially chiral molecules. I. Theory for allene and 1,3-difluoroallene. *J. Chem. Phys.* 123, 84305–1–84305–11 (2005)
- HARRIS, R. A., and STODOLSKY, L.: Quantum beats in optical-activity and weak interactions. *Phys. Lett. B* 78, 313–317 (1978)
- HASINGER, G.: Ist der Himmel symmetrisch? In: QUACK, M., and HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 167–186 (2016)
- HEGSTRÖM, R. A., REIN, D. W., and SANDARS, P. G. H.: Calculation of the parity non-conserving energy difference between mirror-image molecules. *J. Chem. Phys.* 73, 2329–2341 (1980)
- HENNUM, A. C., HELGAKER, T., and KLOPPER, W.: Parity-violating interaction in H₂O₂ calculated from density-functional theory. *Chem. Phys. Lett.* 354, 274–282 (2002)
- HOLLENSTEIN, H., LUCKHAUS, D., POCHERT, J., QUACK, M., and SEYFANG, G.: Synthesis, structure, high-resolution spectroscopy, and laser chemistry of fluorooxirane and ²H₂-fluorooxirane. *Angew. Chem. Int. Edit.* 36, 140–143 (1997), *Angew. Chem.* 109, 136–140 (1997)
- HON, G., and GOLDSTEIN, B. R.: The double-face of symmetry: A conceptual history. In: QUACK, M., and HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 45–73 (2016)

- HORNÝ, L., and QUACK, M.: Computation of molecular parity violation in view of spectroscopic experiments. In: Proceedings XVIIth International Workshop on Quantum Atomic and Molecular Tunneling in Solids and other Phases, May 31 – June 3, 2015, Beatenberg/Interlaken, Switzerland, 2015a, p. L24 (and to be published)
- HORNÝ, L., and QUACK, M.: Computation of molecular parity violation using the coupled-cluster linear response approach. *Mol. Phys.* *113*, 1768–1779 (2015b)
- HUND, F.: Zur Deutung der Molekelspektren II. *Z. Phys.* *42*, 93–120 (1927a)
- HUND, F.: Zur Deutung der Molekelspektren III. Bemerkungen über das Schwingungs- und Rotationsspektrum bei Molekeln mit mehr als zwei Kernen. *Z. Phys.* *43*, 805–826 (1927b)
- HUND, F.: Die Begreifbarkeit der Natur. *Naturwissenschaften* *44*, 460–463 (1957)
- JANOSCHEK, R.: Theories on the origin of biomolecular homochirality. In: JANOSCHEK, R. (Ed.): *Chirality – From Weak Bosons to the α -Helix*. Chapt. 2, pp. 18–33. Berlin: Springer 1991
- JENNI, P.: The long journey to the Higgs boson and beyond at the Large Hadron Collider (LHC). In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. *412*, 99–117 (2016)
- KABLITZ, A.: Symmetrie als strukturelles Prinzip des Denkens in der Moderne. In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. *412*, 241–260 (2016)
- KANT, I.: Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können. Riga: Hartknoch 1783
- KAVASMANECK, P. R., and BONNER, W. A.: Adsorption of amino-acid derivatives by D-quartz and L-quartz. *J. Amer. Chem. Soc.* *99*, 44–50 (1977)
- KAWASAKI, T., MATSUMURA, Y., TSUTSUMI, T., SUZUKI, K., ITO, M., and SOAI, K.: Asymmetric autocatalysis triggered by carbon isotope ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) chirality. *Science* *324*, 492–495 (2009)
- KELVIN, W. T.: Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light. Founded on Mr. A. S. HATHAWAY'S Stenographic Report of Twenty Lectures Delivered in Johns Hopkins University, Baltimore, in October 1884: Followed by Twelve Appendices on Allied Subjects. London: C. J. Clay 1904
- KIKUCHI, O., and KIYONAGA, H.: Parity-violating energy shift of helical N-alkanes. *J. Mol. Struct.-Theochem.* *118*, 271–274 (1994)
- KIKUCHI, O., and WANG, H.: Parity-violating energy shift of glycine, alanine, and serine in the zwitterionic forms. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* *63*, 2751–2754 (1990)
- KIKUCHI, O., WANG, H., NAKANO, T., and MORIHASHI, K.: Expansion of Hartree-Fock atomic orbitals by a small number of Gaussian functions. *J. Mol. Struct.-Theochem* *205*, 301–315 (1990)
- KLEINDIENST, P., and WAGNIÈRE, G. H.: Interferometric detection of magnetochiral birefringence. *Chem. Phys. Lett.* *288*, 89–97 (1998)
- KOMPANETS, O. N., KUKUDZHANOV, A. R., LETOKHOV, V. S., and GERVITS, L. L.: Narrow resonances of saturated absorption of asymmetrical molecule CHFCIBr and possibility of weak current detection in molecular physics. *Opt. Commun.* *19*, 414–416 (1976)
- KONDEPUDI, D. K., and NELSON, G. W.: Chiral-symmetry-breaking states and their sensitivity in nonequilibrium chemical-systems. *Physica A* *125*, 465–496 (1984)
- KONDEPUDI, D. K., and NELSON, G. W.: Weak neutral currents and the origin of biomolecular chirality. *Nature* *314*, 438–441 (1985)
- KUHN, H., and WASER, J.: Self organization of matter and the early evolution of life. In: HOPPE, W., LOHMANN, W., MARKL, H., and ZIEGLER, H. (Eds.): *Biophysics*. Berlin: Springer 1983
- LAERDAHL, J. K., and SCHWERDTFEGGER, P.: Fully relativistic ab initio calculations of the energies of chiral molecules including parity-violating weak interactions. *Phys. Rev. A*, *60*, 4439–4453 (1999)
- LAERDAHL, J. K., SCHWERDTFEGGER, P., and QUINEX, H. M.: Theoretical analysis of parity-violating energy differences between the enantiomers of chiral molecules. *Phys. Rev. Lett.* *84*, 3811–3814 (2000a)
- LAERDAHL, J. K., WESENDRUP, R., and SCHWERDTFEGGER, P.: D- or L-alanine: That is the question. *ChemPhys-Chem.* *1*, 60–62 (2000b)
- LAZZERETTI, P., and ZANASI, R.: On the calculation of parity-violating energies in hydrogen peroxide and hydrogen disulphide molecules within the random-phase approximation. *Chem. Phys. Lett.* *279*, 349–354 (1997)
- LEE, T. D., and YANG, C. N.: Question of parity conservation in weak interactions. *Phys. Rev.* *104*, 254–258 (1956)
- LEHN, J.-M.: Toward self-organization and complex matter. *Science* *295*, 2400–2403 (2002)
- LETOKHOV, V. S.: Difference of energy-levels of left and right molecules due to weak interactions. *Phys. Lett. A*, *53*, 275–276 (1975)

- LUISE, P. L.: The Emergence of Life. Cambridge (UK): Cambridge University Press 2006
- MACDERMOTT, A. J., and TRANTER, G. E.: The search for large parity-violating energy differences between enantiomers. *Chem. Phys. Lett.* *163*, 1–4 (1989a)
- MACDERMOTT, A. J., and TRANTER, G. E.: Electroweak bioenantioselection. *Croat. Chem. Acta* *62*, 165–187 (1989b)
- MASON, S. F.: Origins of biomolecular handedness. *Nature* *311*, 19–23 (1984)
- MASON, S. F.: Prebiotic sources of biomolecular handedness. *Chirality* *3*, 223–226 (1991a)
- MASON, S. F.: Chemical Evolution: Origins of the Elements, Molecules and Living Systems. Oxford: Clarendon Press 1991b
- MASON, S. F., and TRANTER, G. E.: The parity-violating energy difference between enantiomeric molecules. *Chem. Phys. Lett.* *94*, 34–37 (1983)
- MASON, S. F., and TRANTER, G. E.: The parity-violating energy difference between enantiomeric molecules. *Mol. Phys.* *53*, 1091–1111 (1984)
- MAUKSCH, M., TSOGOEVA, S. B., MARTYNOVA, I. M., and WEI, S.: Evidence of asymmetric autocatalysis in organocatalytic reactions. *Angew. Chem. Int. Ed.* *46*, 393–396 (2007), *Angew. Chem.* *119*, 397–400 (2007)
- MCBRIDE, J. M.: Prelog Lecture ETH Zurich. (1992)
- MEIERHENRICH, U.: Aminoacids and the Asymmetry of Life. Berlin: Springer 2008
- MERKEL, A.: Rede der Bundeskanzlerin. In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst. *Nova Acta Leopoldina NF Nr.* *412*, 21–28 (2016)
- MILTON, R. C. D., MILTON, S. C. F., and KENT, S. B. H.: Total chemical synthesis of a D-enzyme: The enantiomers of HIV-1 protease show demonstration of reciprocal chiral substrate specificity. *Science* *256*, 1445–1448 (1992)
- MISLOW, K.: Absolute asymmetric synthesis: A commentary. *Collect. Czech. Chem. Commun.* *68*, 849–864 (2003)
- MONOD, J.: Le Hasard et la Nécessité – Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne. Paris: Editions du Seuil 1970
- NICOLIS, G., and PRIGOGINE, I.: Symmetry-breaking and pattern selection in far-from-equilibrium systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *78*, 659–663 (1981)
- PASTEUR, L. C. R.: Mémoire sur la relation qui peut exister entre la forme cristalline et la composition chimique, et sur la cause de la polarisation rotatoire. *C. R. Hebd. Séances Acad. Sci.* *26*, 535–538 (1848)
- PFEIFER, P.: Molecular structure derived from first principles quantum mechanics. In: HINZE, J. (Ed.): Energy, Storage and Redistribution in Molecules. New York: Plenum Press 1980 (1983)
- PIZZARELLO, S.: Chemical evolution and meteorites: An update. *Orig. Life Evol. Biosph.* *34*, 25–34 (2004)
- PIZZARELLO, S.: The chemistry of life's origin: A carbonaceous meteorite perspective. *Acc. Chem. Res.* *39*, 231–237 (2006)
- POINCARÉ, H.: La Science et l'Hypothèse. Paris: Ernest Flammarion Editeur 1917 (Engl. Translation: Science and Hypothesis. New York: Dover 1952)
- PRELOG, V.: Chirality in Chemistry. In: Les prix Nobel en 1975. Nobel Lectures 1975. Stockholm: Norstedt & Söner 1976
- PRELOG, V.: My 132 Semesters of Chemistry Studies. Washington, DC: American Chemical Society 1991
- PRENTNER, R., QUACK, M., STOHNER, J., and WILLEKE, M.: Wavepacket dynamics of the axially chiral molecule Cl-O-O-Cl under coherent radiative excitation and including electroweak parity violation. *J. Phys. Chem. A*, *119*, 12805–12822 (2015)
- QUACK, M.: Detailed symmetry selection rules for reactive collisions. *Mol. Phys.* *34*, 477–504 (1977)
- QUACK, M.: On the measurement of the parity violating energy difference between enantiomers. *Chem. Phys. Lett.* *132*, 147–153 (1986)
- QUACK, M.: Structure and dynamics of chiral molecules. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* *28*, 571–586 (1989), *Angew. Chem.* *101*, 588–604 (1989)
- QUACK, M.: The role of quantum intramolecular dynamics in unimolecular reactions. *Philos. Trans. Roy. Soc. London, A* *332*, 203–220 (1990)
- QUACK, M.: Molecular quantum dynamics from high-resolution spectroscopy and laser chemistry. *J. Mol. Struct.* *292*, 171–195 (1993a)
- QUACK, M.: Die Symmetrie von Zeit und Raum und ihre Verletzung in molekularen Prozessen. In: Jahrbuch 1990–1992 der Akademie der Wissenschaften zu Berlin. S. 467–507. Berlin: W. de Gruyter Verlag 1993b
- QUACK, M.: On the measurement of CP-violating energy differences in matter-antimatter enantiomers. *Chem. Phys. Lett.* *231*, 421–428 (1994)

- QUACK, M.: Molecular femtosecond quantum dynamics between less than yoctoseconds and more than days: Experiment and theory. In: MANZ, J., and WÖSTE, L. (Eds.): *Femtosecond Chemistry. Proc. Berlin Conf. Femtosecond Chemistry, Berlin (March 1993)*, Chapt. 27, pp. 781–818. Weinheim: Verlag Chemie 1995a
- QUACK, M.: The symmetries of time and space and their violation in chiral molecules and molecular processes. In: COSTA, G., CALUCCI, G., and GIORGI, M. (Eds.): *Conceptual Tools for Understanding Nature. Proc. 2nd Int. Symp. of Science and Epistemology Seminar, Trieste April 1993*, pp. 172–208. Singapore: World Scientific Publ. 1995b
- QUACK, M.: Intramolekulare Dynamik: Irreversibilität, Zeitumkehrsymmetrie und eine absolute Moleküluhr. In: KÖHLER, W. (Ed.): *Altern und Lebenszeit. Nova Acta Leopoldina NF Bd. 81, Nr. 314*, 137–173 (1999)
- QUACK, M.: Molecules in motion. *Chimia* 55, 753–758 (2001)
- QUACK, M.: How important is parity violation for molecular and biomolecular chirality? *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 41, 4618–4630 (2002), *Angew. Chem.* 114, 4812–4825 (2002)
- QUACK, M.: Molecular spectra, reaction dynamics, symmetries and life. *Chimia* 57, 147–160 (2003)
- QUACK, M.: Time and time reversal symmetry in quantum chemical kinetics. In: BRÄNDAS, E. J., and KRYACHKO, E. S. (Eds.): *Fundamental World of Quantum Chemistry. A Tribute to the Memory of Per-Olov Löwdin. Vol. 3*, pp. 423–474. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2004
- QUACK, M.: Electroweak quantum chemistry and the dynamics of parity violation in chiral molecules. In: NAIDOO, K. J., BRADY, J., FIELD, M. J., GAO, J., and HANN, M. (Eds.): *Modelling Molecular Structure and Reactivity in Biological Systems. Proc. 7th WATOC Congress, Cape Town January 2005*, pp. 3–38. Cambridge: Royal Society of Chemistry 2006
- QUACK, M.: Frontiers in spectroscopy. *Faraday Discuss.* 150, 533–565 (2011a)
- QUACK, M.: Fundamental symmetries and symmetry violations from high resolution spectroscopy. In: QUACK, M., and MERKT, F. (Eds.): *Handbook of High Resolution Spectroscopy. Vol. 1*, Chapt. 18, pp. 659–722. Chichester (New York, USA): John Wiley & Sons, Ltd. 2011b
- QUACK, M.: Die Asymmetrie des Lebens und die Symmetrieverletzungen der Physik: Molekulare Paritätsverletzung und Chiralität. In: AL-SHAMERY, K. (Ed.): *Moleküle aus dem All? Kap. 12*, S. 277–310. Weinheim: Wiley-VCH 2011c
- QUACK, M.: Molecular parity violation and chirality: The asymmetry of life and the symmetry violations of physics. In: NISHIKAWA, K., MARUANI, J., BRÄNDAS, E., DELGADO-BARRIO, G., and PRECUCU, P. (Eds.): *Quantum Systems in Chemistry and Physics: Progress in Methods and Applications. Proc. of QSCP XVI, Kanazawa 11 to 17 September 2011*, Chapt. 3, pp. 47–76. Dordrecht: Springer Science 2012
- QUACK, M.: The concept of law and models in chemistry. *Eur. Rev.* 22, S50–S86 (2014a)
- QUACK, M.: On biomolecular homochirality as a quasi-fossil of the evolution of life. *Adv. Chem. Phys.* 157, 249–290 (2014b)
- QUACK, M.: Wie kommt das Neue in die Naturwissenschaft? (Schriftliche Fassung des Vortrages vom 15. Juni 2015). Debatte 15: „Zuviel Mainstream oder: Wie kommt das Neue in die Wissenschaft?“. *Präsident der BBAW* (Hrsg.): *Streitgespräche in den Wissenschaftlichen Sitzungen der Versammlung der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften*, 5. Juni 2015 und 27. Nov. 2015. Heft 15, 29–58 (Hrsg. 2015a)
- QUACK, M.: Die Spiegelsymmetrie des Raumes und die Chiralität in Chemie, Physik, und in der biologischen Evolution. [Abstract]. In: HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412*, [Vorabdruck] 19, (2015b)
- QUACK, M., and STOHNER, J.: Influence of parity violating weak nuclear potentials on vibrational and rotational frequencies in chiral molecules. *Phys. Rev. Lett.* 84, 3807–3810 (2000a)
- QUACK, M., and STOHNER, J.: How do parity violating weak nuclear interactions influence rovibrational frequencies in chiral molecules? *Z. Phys. Chemie* 214, 675–703 (2000b)
- QUACK, M., and STOHNER, J.: Molecular chirality and the fundamental symmetries of physics: Influence of parity violation on rovibrational frequencies and thermodynamic properties. *Chirality* 13, 745–753 (2001) (Erratum: *Chirality* 15, 375, 376 [2003])
- QUACK, M., and STOHNER, J.: Combined multidimensional anharmonic and parity violating effects in CD-BrCIF. *J. Chem. Phys.* 119, 11228–11240 (2003)
- QUACK, M., and STOHNER, J.: Parity violation in chiral molecules. *Chimia* 59, 530–538 (2005) (Erratum for printer's errors. *Chimia* 59, 712 [2005])
- QUACK, M., STOHNER, J., and WILLEKE, M.: High-resolution spectroscopic studies and theory of parity violation in chiral molecules. *Annu. Rev. Phys. Chem.* 59, 741–769 (2008)
- QUACK, M., and WILLEKE, M.: Stereomutation tunneling switching dynamics and parity violation in chlorineperoxide Cl-O-O-Cl. *J. Phys. Chem. A* 110, 3338–3348 (2006)

- REIN, D. W.: Some remarks on parity violating effects of intramolecular interactions. *J. Mol. Evol.* *4*, 15–22 (1974)
- REIN, D. W., HEGSTRÖM, R. A., and SANDARS, P. G. H.: Parity non-conserving energy difference between mirror-image molecules. *Phys. Lett. A* *71*, 499–502 (1979)
- SALAM, A.: Weak and electromagnetic interactions. In: SVARTHOLM, N. (Ed.): *Elementary Particle Theory: Relativistic Groups and Analyticity*. Proc. of the 8th Nobel Symposium held May 19–25, 1968 at Aspenäs-gården, Lerum, in the county of Älvsborg, Sweden; pp. 367–377. Stockholm: Almqvist & Wiksell 1968
- SALAM, A.: The role of chirality in the origin of life. *J. Mol. Evol.* *33*, 105–113 (1991)
- SALAM, A.: Chirality, phase-transitions and their induction in amino-acids. *Phys. Lett. B* *288*, 153–160 (1992)
- SALAM, A.: Biological macromolecules and the phase transitions they bring about. In: COSTA, G., CALUCCI, G., and GIORGI, M. (Eds.): *Conceptual Tools for Understanding Nature*. Proc. 2nd Intl. Symp. of Science and Epistemology Seminar, Trieste 1993; pp. 209–220. Singapore: World Scientific Publ. 1995
- SCHMUTZER, E.: *Symmetrien und Erhaltungssätze der Physik*. Berlin: Akademie-Verlag 1972
- SCHNELL, M., and KÜPPER, J.: Tailored molecular samples for precision spectroscopy experiments. *Faraday Discuss.* *150*, 33–49 (2011)
- SCHOPE, J. W.: *Cradle of Life*. Princeton N. J.: Princeton University Press 1999
- SCHOPPER, H.: Circular polarization of gamma-rays – Further proof for parity failure in beta-decay. *Phil. Mag.* *2*, 710–713 (1957a)
- SCHOPPER, H.: Die elastische Streuung von Gamma-Strahlen bei kleinen Streuwinkeln. *Z. Phys.* *147*, 253–260 (1957b)
- SCHWERDTFEGER, P., SAUE, T., VAN STRALEN, J. N. P., and VISSCHER, L.: Relativistic second-order many-body and density-functional theory for the parity-violation contribution to the C-F stretching mode in CHFClBr. *Phys. Rev. A* *71*, 012103 (2005)
- SCHWILLE, P.: Biologische Selbstorganisation im Reagenzglas – ein Weg zur künstlichen Zelle? In: HACKER, J., und HECKER, M. (Hrsg.): *Was ist Leben?* Nova Acta Leopoldina NF Bd. *116*, Nr. 394, 119–130 (2012)
- SCHWILLE, P.: Symmetriebrechung und Musterbildung in minimalen biologischen Systemen. [Abstract]. In: HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. *412*, [Vorabdruck], 23 (2015)
- SHABAEV, V. M., PACHUCKI, K., TUPITSYN, I. I., and YEROKHIN, V. A.: QED corrections to the parity-nonconserving $6s-7s$ amplitude in ^{133}Cs . *Phys. Rev. Lett.* *94*, 213002 (2005)
- SHECHTMAN, D.: Quasi-periodic materials – A paradigm shift in crystallography [Abstract]. In: HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. *412*, [Vorabdruck], 40 (2015)
- SIEGEL, J. S.: Homochiral imperative of molecular evolution. *Chirality* *10*, 24–27 (1998)
- SOAI, K., OSANAI, S., KADOWAKI, K., YONEKUBO, S., SHIBATA, T., and SATO, I.: d- and l-quartz-promoted highly enantioselective synthesis of a chiral organic compound. *J. Amer. Chem. Soc.* *121*, 11235–11236 (1999)
- SOAI, K., SHIBATA, T., MORIOKA, H., and CHOJI, K.: Asymmetric autocatalysis and amplification of enantiomeric excess of a chiral molecule. *Nature* *378*, 767, 768 (1995)
- STOHNER, J., BEIL, A., HOLLENSTEIN, H., MONTI, O. L. A., and QUACK, M.: On the influence of parity violating weak nuclear potentials on vibrational and rotational frequencies in chiral molecules. In: 37th IUPAC Congress, *Frontiers in Chemistry: Molecular Basis of the Life Sciences*, 27th GDCh General Meeting Berlin, Germany, August 14–19, 1999; p. 525. Gesellschaft Deutscher Chemiker 1999
- SZABO-NAGY, A., and KESZTHELYI, L.: Demonstration of the parity-violating energy difference between enantiomers. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *96*, 4252–4255 (1999)
- 'T HOOFT, G.: Nobel lecture: A confrontation with infinity. *Rev. Mod. Phys.* *72*, 333–339 (2000)
- TOKUNAGA, S. K., STOEFFLER, C., AUGUSTE, F., SHELKOVNIKOV, A., DAUSSY, C., AMY-KLEIN, A., CHARDONNET, C., and DARQUIÉ, B.: Probing weak force-induced parity violation by high-resolution mid-infrared molecular spectroscopy. *Mol. Phys.* *111*, 2363–2373 (2013)
- TSIGUTKIN, K., DOUNAS-FRAZER, D., FAMILY, A., STALNAKER, J. E., YASHCHUK, V. V., and BUDKER, D.: Observation of a large atomic parity violation effect in ytterbium. *Phys. Rev. Lett.* *103*, 071601 (2009)
- VAN'T HOFF, J. H.: *La chimie dans l'espace*. Rotterdam: Bazendijk 1887 (Nachdruck mit Kommentar in BOURGOIS, C. (Ed.): *Sur la dissymétrie moléculaire*; pp. 109–222. Paris: Coll. Epistème Paris 1986)
- VAN'T HOFF, J. H.: *Vorlesungen über theoretische und physikalische Chemie: Die chemische Statik*. Heft 2. Braunschweig: Vieweg 1899
- VAN'T HOFF, J. H.: *Die Lagerung der Atome im Raum*. 3. Aufl. Braunschweig: Vieweg 1908
- VELTMAN, M. J. G.: Nobel lecture: From weak interactions to gravitation. *Rev. Mod. Phys.* *72*, 341–349 (2000)
- VESTER, F., ULBRICHT, T. L. V., und KRAUCH, H.: Optische Aktivität und die Paritätsverletzung im Beta-Zerfall. *Naturwissenschaften* *46*, 68 (1959)

- VIEDMA, C.: Chiral symmetry breaking and complete chiral purity by thermodynamic-kinetic feedback near equilibrium: Implications for the origin of biochirality. *Astrobiology* 7, 312–319 (2007)
- VOET, D., und VOET, J. G.: *Biochemie*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft 1992
- WEINBERG, S.: A model of leptons. *Phys. Rev. Lett.* 19, 1264–1266 (1967)
- WERNER, S.: Krebsentstehung als überschießende Wundheilung: Verlust einer wichtigen Balance. In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 231–239 (2016)
- WIENHARD, A.: Geometrie durch Symmetrie. In: QUACK, M., und HACKER, J. (Hrsg.): *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*. Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, 261–275 (2016)
- WU, C. S., AMBLER, E., HAYWARD, R. W., HOPPES, D. D., and HUDSON, R. P.: Experimental test of parity conservation in beta decay. *Phys. Rev.* 105, 1413–1415 (1957)
- YAMAGATA, Y.: A hypothesis for the asymmetric appearance of biomolecules on earth. *J. Theor. Biol.* 11, 495–498 (1966)
- ZELDOVICH, Y. B.: Parity nonconservation in the 1st order in the weak-interaction constant in electron scattering and other effects. *Soviet Physics JETP-USSR* 9, 682–683 (1959)
- ZELDOVICH, B. Y., SAAKYAN, D. B., and SOBELMAN, II: Energy difference between right-hand and left-hand molecules, due to parity nonconservation in weak interactions of electrons with nuclei. *JETP Lett.* 25, 94–97 (1977)
- ZEPIK, H., SHAVIT, E., TANG, M., JENSEN, T. R., KJAER, K., BOLBACH, G., LEISEROWITZ, L., WEISSBUCH, I., and LAHAV, M.: Chiral amplification of oligopeptides in two-dimensional crystalline self-assemblies on water. *Science* 295, 1266–1269 (2002)

Prof. Dr. Martin QUACK
ETH Zürich
Laboratorium für Physikalische Chemie
CH-8093 Zürich
Schweiz
Tel.: +41 44 6324421
Fax: +41 44 6321021
E-Mail: martin@quack.ch

Ist der Himmel symmetrisch?

Günther HASINGER ML (Honolulu, HI, USA)



Zusammenfassung

Das Universum entstand vor 13,8 Milliarden Jahren aus seiner chaotischen Inflation von Quantenfluktuationen. Dabei spielten eine spontane Symmetriebrechung die wesentliche Rolle sowie der Higgs-Mechanismus, der vor kurzem am *Large Hadron Collider* des CERN entdeckt wurde. Die Tatsache, dass es überhaupt Materie gibt, und Menschen, die darüber nachdenken, ist wiederum einer Symmetriebrechung zu verdanken, bei der in der Frühzeit des Universums aus jeweils einer Milliarde Materie- und Antimaterieteilchen eines jener Teilchen übrig blieb, aus denen unsere normale Welt geformt ist. Gibt es eigentlich Symmetrie im Kosmos? Anhand der Entstehung und Entwicklung von großräumigen Strukturen und des kosmischen Netzwerkes, in dem Galaxien-Superhaufen, Galaxienhaufen und einzelne Galaxien wie an kosmischen Perlenschüren aufgehängt sind, die wiederum riesige Leerräume umspannen, beschäftigt sich der Vortrag mit dieser Frage. Besonders interessante Symmetriebetrachtungen kann man bei den Schwarzen Löchern anstellen, wo relativistische Effekte extreme Anisotropien erzeugen. Dies wird besonders deutlich bei den relativistischen Materiestrahlen, die gut gefütterte Schwarze Löcher aussenden, sowie bei der Röntgen-Spektroskopie von Eisenlinien in der unmittelbaren Umgebung von Schwarzen Löchern. Für besondere Furore hat vor kurzem die Entdeckung von Gravitationswellen gesorgt, die von der Vereinigung zweier Schwarzer Löcher herrühren. Auch dabei kann es zu extremen Asymmetrien kommen.

Abstract

The universe was created 13.8 billion years ago from a chaotic inflation of quantum fluctuations. Here, a spontaneous symmetry breaking played the essential role, as well as the Higgs mechanism, which was recently discovered at the CERN Large Hadron Collider. The fact that there is any matter, and people who are able to think about topics like this, we in turn, also owe a symmetry breaking, in which out of a billion of particle/anti-particle pairs always one particle remained, of the kind that forms our normal world. Is there symmetry in the cosmos? Following the formation and evolution of the large-scale structure and the Cosmic Web, in which super-clusters and clusters of galaxies are lined up like cosmic strings of pearls, which surround huge empty voids, the presentation follows this question. Particularly interesting symmetry studies can be made studying black holes, where relativistic effects create extreme anisotropies. This is apparent in the relativistic particle beams emitted by well-fed black holes, as well as in the X-ray spectroscopy of iron lines in the direct vicinity of black holes. Recently the discovery of gravitational waves from the merging event of two black holes has caused excitement. Asymmetries can play an important role in this context.

1. Einleitung

In der Vorbereitung dieses Vortrages, der bei der Jahresversammlung der Leopoldina 2015 im Rahmen des Symposiums „Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst“ gehalten wurde, bin ich bei der Recherche nach Symmetriebrüchen auf das Orchesterstück *Broken Symmetry* von Colin MATTHEWS gestoßen, das 1994 bei der Deutschen Grammophon vom *London Sinfonietta Orchestra* unter der Leitung von Oliver KNUSSEN aufgenommen wurde. Das kraftvolle, vom Schlagwerk getragene große Orchesterstück erinnerte mich tatsächlich manchmal an die chaotische Komplexität und wilde Romantik, die man in manchen Himmelaufnahmen des Hubble-*Space*-Teleskops sieht. Das motiviert die Antwort auf die Frage im Titel des Vortrages: Nein, der Himmel ist nicht symmetrisch.

Was ist aber denn nun ein Symmetriebruch in der Physik? Es ist der Übergang von einer symmetrischen, einfachen Konfiguration in eine asymmetrische, komplexere Situation. Ein einfaches geometrisches Beispiel ist ein festlich gedeckter, voll besetzter runder Tisch. Die Hochzeitsgesellschaft nimmt Platz, und schon stellt sich die Frage: „Wem gehört eigentlich der Butterteller links (oder rechts) von mir?“ Sobald ein einziger Gast zu dem Butterteller zu seiner Linken oder Rechten greift, müssen alle anderen Gäste am Tisch die gleiche Wahl treffen (auch wenn sie nach KNIGGE vielleicht die falsche Wahl war). Eine ursprünglich symmetrische Situation wurde gebrochen.

2. Symmetriebrüche im frühen Universum

In der fundamentalen Physik gibt es eine ganze Reihe von spontanen Symmetriebrüchen, die im Zuge der Abkühlung des Universums zur Entstehung seiner Komplexität beitragen. Im frühen Universum waren alle physikalischen Grundkräfte, also die starke Kraft, die schwache Kraft, die elektromagnetische Kraft und die Gravitationskraft in einer einzigen Urkraft vereinigt. Mit der stetigen Abkühlung nach dem Urknall haben sich sukzessive die verschiedenen Grundkräfte von dieser Urkraft abgespalten, zunächst die Gravitation, dann die starke Wechselwirkung. Das ging jeweils mit einem spontanen Symmetriebruch einher.

Der Symmetriebruch, der in den letzten Jahren Berühmtheit erlangt hat, ist der Higgs-Mechanismus, der nach der Entdeckung des Higgs-Teilchens am *Large Hadron Collider* des CERN im Jahr 2013 mit dem Physik-Nobelpreis für Peter HIGGS und François ENGLERT belohnt wurde. Der Higgs-Mechanismus beschreibt den Symmetriebruch, in dem die elektroschwache Wechselwirkung sich in die beiden letzten Naturkräfte, die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung aufspaltet. Das Higgs-Feld ist demnach ein sogenanntes skalares Feld, welches das gesamte Universum gleichmäßig durchzieht. Sein Potential kann mit einem Mexikanischen Sombrero verglichen werden (siehe Abb. 1). Im elektroschwachen Zustand liegt das Higgs-Feld auf einem hohen, metastabilen symmetrischen lokalen Maximum. Das Higgs-Teilchen ist in diesem Zustand masselos. Wenn sich das Universum abkühlt, kann sich das Higgs-Feld nicht auf dem hohen Energiezustand halten und rollt spontan den Berg in einen stabilen, niedrigeren Energiezustand hinunter. Damit ist die Rotationssymmetrie gebrochen, und das Higgs-Teilchen gewinnt seine Masse, ebenso wie alle anderen Elementarteilchen, die mit dem Higgs-Feld wechselwirken. (Dies ist übrigens nur ein kleiner Teil der Masse, die wir bei den Dingen unseres

Alltags messen. Der weitaus größte Teil steckt in der Energie, mit der die „Quarks“, die Bausteine des Protons, in diesem herumsausen und von den „Gluonen“ zusammengehalten werden. Ich habe das in anderem Zusammenhang als „eingefangene Urknallenergie“ bezeichnet.)¹

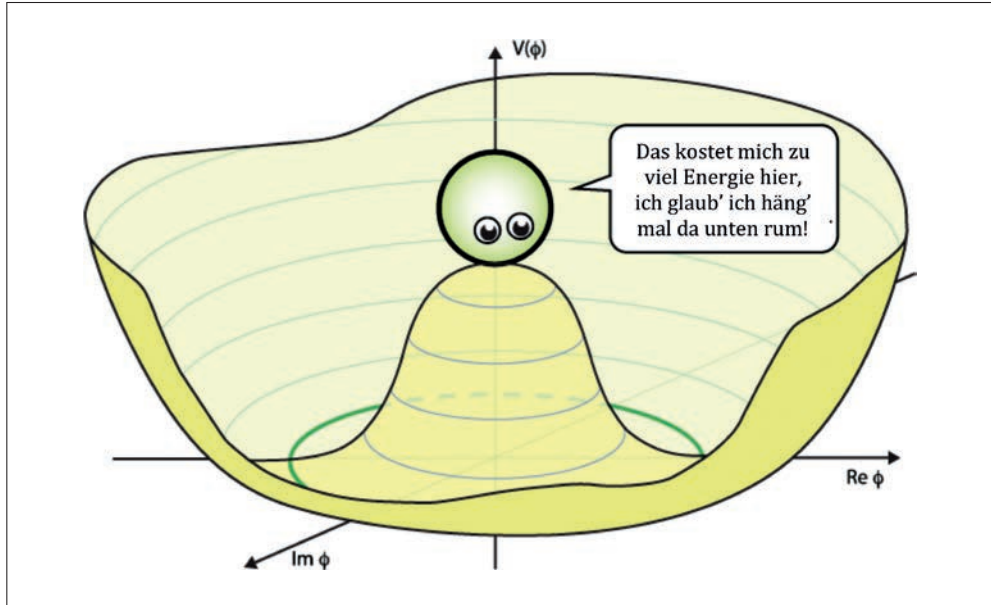


Abb. 1 Darstellung des Higgs-Potentials (Quelle: Flip Tanedo, Quantum Diaries <http://www.quantumdiaries.org/2011/11/21/why-do-we-expect-a-higgs-boson-part-i-electroweak-symmetry-breaking/>)

Ein fast noch wichtigerer Symmetriebruch fand bei der Aufspaltung der Großen Vereinheitlichten Kraft (*Grand Unified Theory*: GUT) in die starke und die elektroschwache Wechselwirkung statt. In der Hitze des frühen Universums entstanden sämtliche Elementarteilchen in exakt gleicher Anzahl, also insbesondere auch die Materie- und die Antimaterieteilchen. Wenn sich ein Elementarteilchen und sein Antiteilchen nahe kommen, vernichten sie sich gegenseitig und zerstrahlen zu Licht. In dem kurz nach dem Urknall stattgefundenen „Vernichtungsgemetzle“ sind deshalb fast alle entstandenen Teilchen wieder verschwunden, aber eben nicht alle. Aus dem gemessenen Verhältnis der Anzahl von Lichtteilchen (Photonen) zu Materieteilchen im heutigen Universum können wir daraus schließen, dass von jeder Milliarde Quarks und Antiquarks, Elektronen und Positronen, die im Urknall entstanden sind, jeweils ein einziges Quark und ein Elektron übrig geblieben sind. Irgend- ein bisher noch nicht verstandener Effekt muss im frühen Universum für diese Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie verantwortlich sein.

Dieser Überschuss ist für unsere heutige, normale baryonische Materie verantwortlich. Wie das Ganze funktioniert, wissen wir heute noch nicht genau. Die in den letzten Jahren gemachte Entdeckung allerdings, dass die Neutrinos eine endliche Masse besitzen und sich

¹ HASINGER 2007, S. 74.

damit die verschiedenen Neutrino-Familien ineinander umwandeln können, deutet darauf hin, dass die „Baryogenese“, also die Entstehung des Ungleichgewichts zwischen Materie und Antimaterie im Universum, über die elektroschwache Wechselwirkung erfolgt sein könnte. Das würde möglicherweise auch erklären, warum exakt der gleiche Überschuss bei den Quarks und bei den Elektronen existiert, so dass unser Universum elektrisch neutral geblieben ist.

Vor kurzem haben Physiker eine neue Theorie entwickelt, nach der möglicherweise das Higgs-Boson auch für die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie verantwortlich sein könnte (KUSENKO et al. 2015). Dabei spielt eine hypothetische, bisher noch nicht entdeckte Sorte von Neutrinos eine Rolle, das sogenannte Majorana-Teilchen. Dies soll ein sehr massereiches Neutrino sein, das sein eigenes Antiteilchen wäre: Majorana-Neutrino und Anti-Majorana-Neutrino wären identisch. Durch die Heisenbergsche Unschärfe wäre es möglich, über das Majorana-Teilchen Materie in Antimaterie zu verwandeln, was sonst absolut verboten ist. Auf diese Weise könnte im frühen Universum der kleine Überschuss von Materie entstanden sein, aus der wir alle beschaffen sind.

Der elektroschwache Phasenübergang und das Higgs-Teilchen konnten am *Large Hadron Collider* des CERN in Genf, dem größten Beschleuniger der Welt, erzeugt werden. Dafür sind Energien oberhalb von 100 GeV (Gigaelektronenvolt) notwendig (siehe Abb. 2). Demgegenüber geschieht die Symmetriebrechung am Ende der GUT-Phase, bei der sich die starke Wechselwirkung von der GUT-Kraft abspaltet, bei einer Energie von etwa 10^{15} GeV, also etwa 13 Größenordnungen über den Energien, die sich mit den größten terrestrischen Teilchenbeschleunigern erreichen lassen. Einzig und allein der Urknall selbst kann derart gigantische Energien erreicht haben.

Um diese Effekte zu studieren, benötigt man den gesamten Kosmos! Man geht deshalb davon aus, dass in den ersten Sekundenbruchteilen die Dichte und Temperatur so hoch waren, dass sich alle Elementarteilchen, wie z. B. Photonen, Neutrinos, Elektronen, Quarks usw., zusammen mit ihren Antiteilchen ständig ineinander umgewandelt haben. Dadurch stellte sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen allen Teilchensorten ein: In jedem Raumelement müssen dabei anfangs alle Teilchensorten in ungefähr gleicher Anzahl existiert haben. Zu dieser Zeit herrschte die vereinigte GUT-Kraft, die durch ein hypothetisches Kräften teilchen übertragen wird, das X-Boson, das eine sehr hohe Masse und damit eine extrem kurze Lebensdauer haben muss. Das Äquivalent zum Higgs-Feld ist dabei das sogenannte Inflaton-Feld, das für die Inflation im frühen Universum verantwortlich ist. Nach einem Zeitraum von etwa 10^{-34} s hatte sich das Universum auf eine Temperatur von 10^{28} K abgekühlt, die X-Bosonen sind zerfallen, und aus dem Wärmebad konnten keine neuen GUT-Kraftteilchen mehr erzeugt werden. Damit spaltete sich in einer ähnlichen *Symmetriebrechung*, wie wir sie oben beim Higgs-Mechanismus diskutiert haben, die starke Wechselwirkung von der GUT-Kraft ab. Dabei wird eine große Menge Energie frei. Das Universum wird noch mehrere derartige Umstrukturierungen bei Abkühlungen erleben.

Ein schönes Beispiel dafür ist das Gefrieren von Wasser in einem See. Wenn es kälter wird, verwandelt sich das ursprünglich völlig gestaltlose Wasser in regelmäßig geformte Eiskristalle und komplexere Gebilde. Dabei kommt es auch zu Unterkühlungen, also zu niedrigeren Temperaturen als dem eigentlichen Gefrierpunkt, und danach zu einem abrupten Phasenübergang, bei dem Energie frei wird. Eine ähnliche Unterkühlung hat das Universum in der Inflationsphase durchgemacht.

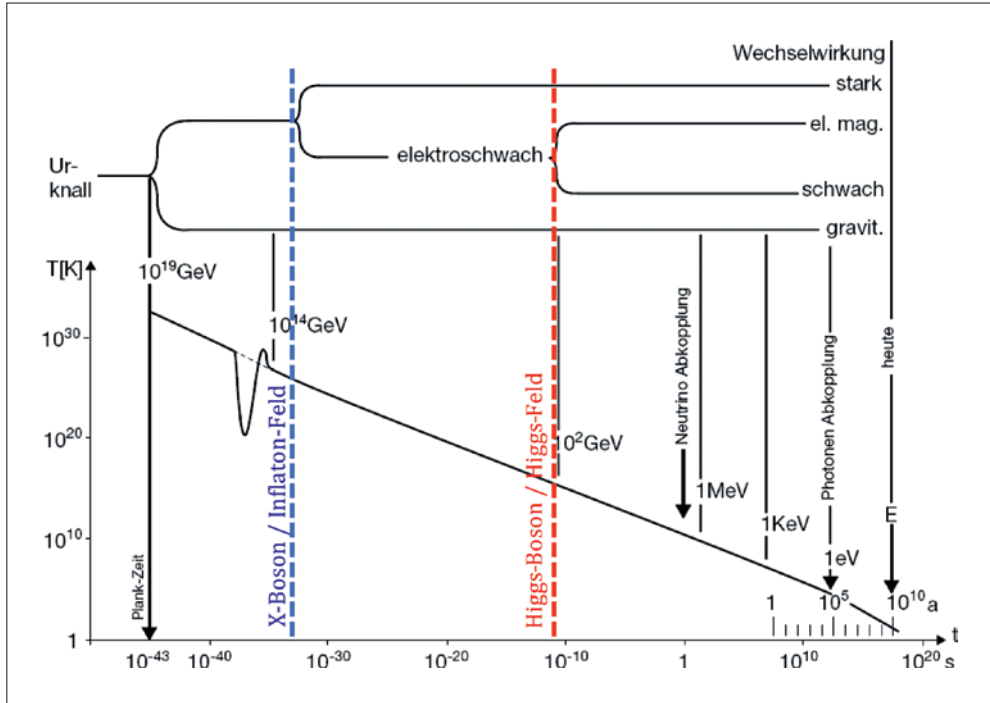


Abb. 2 Die gesamte Geschichte des Universums auf einen Blick. Auf einer extrem gestauchten, logarithmischen Zeitskala ist die Temperatur des Universums dargestellt. Der obere Teil der Grafik zeigt auf der dazu äquivalenten Energieskala zu den entsprechenden Zeitpunkten die Phasenübergänge bei der Aufspaltung der Naturkräfte aus einer einzigen Urkraft.

Die chaotische Inflation am Anfang des Universums ist ein Phasenübergang ähnlich zum Higgs-Mechanismus. Das Inflaton-Feld „rollt“ von einem symmetrischen „falschen Vakuum“ in einen niedrigeren Zustand mit gebrochener Symmetrie. Die dabei umgewandelte Energie führt zur Inflation und zur Aufheizung des Urknalls. Die genaue Form des Inflaton-Potentials und damit der Mechanismus der Inflation waren einige Zeit kontrovers. Die ursprüngliche Inflationstheorie von Alan GUTH (GUTH und TYE 1980, GUTH 1999) nahm ein Potential für das Inflaton-Feld an, in dem der „Mexikanische Hut“ (siehe Abb. 1) in der Mitte eine Delle hat. Darin befindet sich das „falsche Vakuum“ in einem überstabilen Zustand, aus dem es sich nur durch einen „Quanten-Tunneleffekt“ befreien kann. Danach würde es aber sehr schnell in den tieferen Teil der Hutkrempe „purzeln“ und dabei so viel Energie aufnehmen, dass die Inflation praktisch ein leeres Universum hinterlassen hätte. Die „neue Inflation“ von Andrej LINDE (1983) nimmt ein falsches Vakuum an, das wie in Abbildung 1 auf der Mitte des Mexikanischen Hutes liegt. Das Potential hat aber dabei eine ganz flache Steigung, so dass das „falsche Vakuum“ sanft zu Tale rollt und dabei gerade so viel Energie freisetzt, dass die Inflation rechtzeitig zu Ende geht, und die Teilchen des Urknalls aufgeheizt werden.

An dieser Stelle müssen wir uns kurz mit einer bizarren Eigenschaft des Vakuums beschäftigen: den Quantenfluktuationen. Ein Vakuum, so wie wir es in der klassischen

Physik gelernt haben, kann es in Wirklichkeit gar nicht geben. In der Quantenmechanik kann man nämlich ein Vakuum als ein Teilchen mit der Energie Null auffassen. Wenn Sie dessen Energie in einem beliebigen Zeitintervall beliebig oft messen würden, käme nie exakt Null heraus, weil wegen der Heisenbergschen Unschärferelation alle physikalischen Größen, also auch die Null, immer mit einer natürlichen Unschärfe verbunden sind. Im Vakuum muss es demnach Fluktuationen geben. Wir können uns eine derartige Fluktuation beispielsweise als ein Paar virtueller Teilchen vorstellen, etwa zwei Lichtquanten oder ein Materieteilchen und das entsprechende Antiteilchen, die sich für eine sehr kurze Zeit aus dem Nichts Energie leihen, einen winzigen Augenblick miteinander existieren und ebenso schnell wieder verschwinden, wobei sie dem Vakuum die geliehene Energie zurückgeben. Das Vakuum muss natürlich in dieser kurzen Zeit eine entsprechende negative Energie haben. So lange dieses Zeitintervall nur kurz genug und die Energie klein genug ist, dass sie beide zusammen die Heisenbergsche Unschärferelation erfüllen, ist alles in Ordnung.

Die Inflation im frühen Universum hat innerhalb kürzester Zeit (etwa 10^{-32} s, siehe Abb. 2) ein winzig kleines Stück Vakuum dramatisch aufgebläht. Das gesamte heute sichtbare Universum hatte kurz nach der Inflation etwa die Größe eines Fußballs. Dabei wurden die Quantenfluktuationen des vor der Inflation existierenden Vakuums auseinandergezerrt. Die jeweils zwei virtuellen Teilchen einer Fluktuation wurden durch die Inflation so weit getrennt, dass sie sich nicht mehr gegenseitig finden und vernichten konnten. Aus den virtuellen Teilchen des Vakuums wurden auf diese Weise die realen Teilchen erzeugt. Man kann sagen, dass die Inflation die Teilchen unseres heutigen Universums aus dem Vakuum herausgerissen hat. Dieser Prozess hat damit die kurz vor dem GUT-Phasenübergang existierenden Quantenfluktuationen des Vakuums eingefroren und räumlich so stark vergrößert, dass daraus die primordialen Fluktuationen des heißen Feuerballs wurden, aus denen sich im Laufe der Entwicklung die großräumigen Strukturen, Filamente, Galaxienhaufen und Galaxien und letztendlich Sterne und Planeten gebildet haben.

3. Dunkle Energie und Dunkle Materie

Eine Vorhersage der Inflationstheorie war, dass die gesamte Energiedichte im Universum in der Nähe der kritischen Energiedichte sein muss, was exakt einem flachen Universum entspricht. Anschaulich kann man das so verstehen, dass durch die Inflation sämtliche vor der Inflation vorhandenen Strukturen des Raumes absolut glatt gezogen wurden. Diese Vorhersage wurde in den letzten zwei Jahrzehnten durch intensive kosmologische Untersuchungen auf wunderbare Weise bestätigt. Messungen der Geometrie des Raumes mit Hilfe von Supernova-Explosionen, die mit dem Physik-Nobelpreis 2011 belohnt wurden, sowie Messungen von akustischen Schwingungen im heißen Feuerball des Urknalls haben gezeigt, dass das Universum durch eine bisher noch unverstandene Dunkle Energie dominiert wird, welche die Expansion des Kosmos weiterhin beschleunigt. Der Urknall findet sozusagen immer noch statt. Messungen von Galaxienhaufen im sichtbaren Licht und im Röntgenlicht zeigen, dass die Materie im Kosmos durch eine bisher noch nicht entdeckte Art von Dunkler Materie dominiert wird (siehe Abb. 3). Die normale Materie, aus der unsere Welt besteht, macht nur etwa 5 % der kosmischen Energiedichte aus. Das meiste davon wabert in Gaswolken, die noch direkt aus dem Urknall stammen, durch den Kosmos, nur ein kleiner Bruchteil davon (0,5 %) wurde bisher in Sterne verwandelt und formt die

Galaxien, die wie an Perlenschnüren in einem „kosmischen Netzwerk“ angeordnet sind. Alle Elemente, die schwerer als Wasserstoff, Helium und Lithium sind, müssen erst durch Kernfusion in den Bäuchen von Sternen „gebacken werden“ oder entstehen durch Supernova-Explosionen am Ende eines Sternenlebens. Die für uns lebensnotwendigen schweren Elemente machen nur den winzigen Bruchteil von 0,03% der kosmischen Energiedichte aus. Damit ist ihre Gesamtmasse vergleichbar zu der aller Schwarzen Löcher, die ungefähr 0,01% beitragen und von denen wir im weiteren Verlauf noch hören werden.

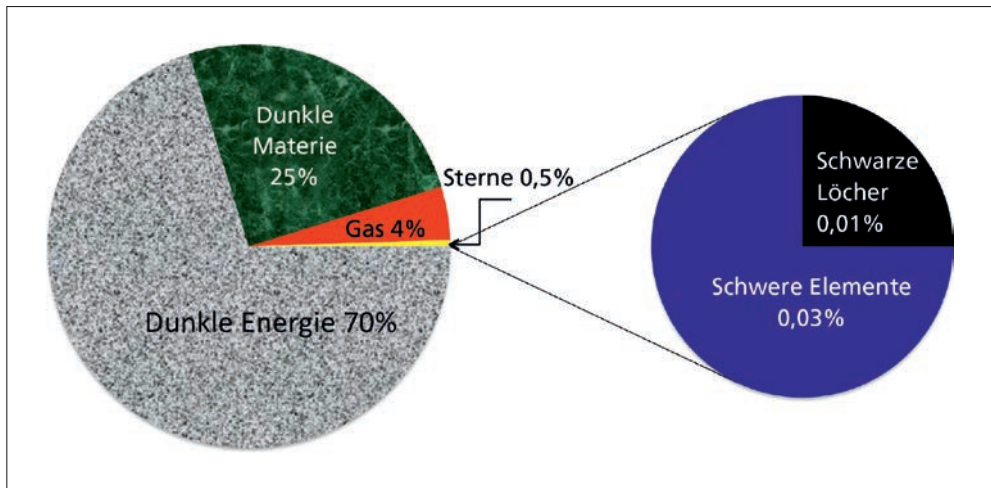


Abb. 3 Beiträge verschiedener Formen von Materie und Energie zur gesamten Energiedichte des Universums

Über die Natur der Dunklen Energie haben wir noch keinen blassen Schimmer. Es deutet aber vieles darauf hin, dass es sich dabei um eine Eigenschaft des Raumes handelt, möglicherweise ein skalares Feld, ähnlich wie das Higgs-Feld. Damit hätte sich Albert EINSTEINS „größte Eselei“, die von ihm postulierte „kosmologische Konstante“, bewahrt. Für die Dunkle Materie gibt es dagegen zumindest theoretische Vorhersagen. Ein im Zusammenhang mit der Betrachtung von Symmetrien besonders interessanter Ansatz ist die Theorie der „Supersymmetrie“ (SUSY). Das Standardmodell der Elementarteilchen unterscheidet zwischen den Materieteilchen, den „Fermionen“, und „Bosonen“, welche die fundamentalen Kräfte übertragen. Nach der Theorie der Supersymmetrie verfügt jedes der heute bekannten Elementarteilchen über einen supersymmetrischen Partner, der mit einem kleinen „s“ vor dem Namen bezeichnet wird, etwa das *sElektron* oder die *sQuarks*. Falls das Elementarteilchen ein „Fermion“ darstellt, ist sein supersymmetrischer Partner ein „Boson“ und umgekehrt. Die meisten dieser Teilchen haben vermutlich nur eine extrem kurze Lebensdauer. Die Theorie sagt jedoch voraus, dass das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil sein sollte und damit durchaus einen sehr guten Kandidaten für die Dunkle Materie darstellt. Nachdem keines dieser SUSY-Teilchen bisher entdeckt wurde, geht man davon aus, dass deren Massen weit oberhalb der Energien liegen, die man mit der bisherigen Generation von Beschleunigern erreichen kann. Es bestanden deshalb große Hoffnungen, dass der vom CERN in Genf betriebene europäische Superbeschleuniger *Large Hadron Collider* (LHC) einen ganzen Zoo supersymmetrischer Teilchen ent-

decken könnte. Diese Hoffnungen wurden in der ersten Experimentierphase bei der halben Maximalenergie des LHC leider enttäuscht. Ich gebe aber die Hoffnung noch nicht auf, dass der LHC in seiner höchsten Energiestufe die Teilchen der Dunklen Materie entdecken könnte. In der nahen Zukunft wird sich eine ganze Armada von neuen Experimenten im Weltraum und auf der Erde auf die Untersuchung der Dunklen Materie, der Dunklen Energie und der Neutrinos stürzen, so dass wir hoffentlich bald mehr verstehen werden.

4. Symmetrien und Asymmetrien in der Astrophysik

Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall hat sich das Universum so weit abgekühlt, so dass aus der heißen Ursuppe die ersten Wasserstoffatome und etwas später Heliumatome entstehen konnten. Zu dieser Zeit war das Universum etwa 1100-mal kleiner als heute und hatte eine Temperatur von etwa 3000 K, in etwa vergleichbar mit der Sonnenoberfläche (5000 K), oder der Flamme eines Bunsen-Brenners. Bei dieser Temperatur durchläuft das Universum erneut einen Phasenübergang, wieder eine Art „Einfrierungsprozess“, der sein Aussehen dramatisch verändert. Der Zustand, in dem die Atomkerne und die Elektronen voneinander getrennt sind, wird als Plasma bezeichnet. Die freien Elektronen behindern die Ausbreitung der Lichtquanten, so dass dieses Plasma, ähnlich wie die Sonnenoberfläche, undurchsichtig ist. Sobald die Temperatur unter 3000 Kelvin abfällt, können sich Protonen und Elektronen zu Wasserstoffatomen und wenig später Heliumkerne mit Elektronen zu Heliumatomen zusammenschließen. Der Streuquerschnitt der Atome ist wesentlich kleiner als der eines Elektrons. Schlagartig wird damit die Bahn frei für die Photonen. Diese können sich seither ungehindert durch den Weltraum bewegen – der Nebel klart auf, und das Universum wird durchsichtig.

Seitdem das Universum durchsichtig geworden ist, hat es sich etwa um den Faktor 1100 weiter ausgedehnt. Die Wellenlänge der Strahlung des heißen Feuerballs, die damals im sichtbaren Licht ausgesandt wurde, hat sich mit der Ausdehnung des Kosmos ebenfalls um den gleichen Faktor vergrößert und kann deshalb heute im Mikrowellenbereich beobachtet werden. Die ursprüngliche Temperatur von 3000 K hat sich dabei auf gerade mal 2,725 Grad über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt. Derartig kalte Temperaturen kann man nur mit ganz besonders gut gekühlten Mikrowellenempfängern im Weltraum messen. Abbildung 4 zeigt das vom NASA-Satellit WMAP aufgenommene Baby-Bild des Universums. Im Gegensatz zur Oberfläche der Sonne, die wir von außen betrachten, sehen wir allerdings die Mikrowellenhintergrundstrahlung, das „Echo“ des Urknalls, von innen, also aus allen Himmelsrichtungen in gleichmäßiger Intensität.

Tatsächlich sind die in Abbildung 4 erkennbaren Fluktuationen der Mikrowellenhintergrundstrahlung dramatisch vergrößert dargestellt. In Wirklichkeit ist, wie von der Inflationstheorie erwartet, die Intensität der Strahlung aus allen Richtungen bis auf 1/100 000 gleich. Die Fluktuationen sind jedoch real und entsprechen wiederum nach der Inflationstheorie den ursprünglichen Quantenfluktuationen des vor-inflationären Vakuums. Für die genauen Messungen der Temperatur und der Fluktuationen der Hintergrundstrahlung wurde der Physik-Nobelpreis im Jahre 2006 verliehen.

Der Planck-Satellit der Europäischen Raumfahrtagentur ESA hat in den letzten Jahren eine noch wesentlich genauere und höher aufgelöste Karte des Mikrowellenhintergrundes erstellt. Dabei wurde eine Anomalie in der Mikrowellenstrahlung gefunden, in der eine

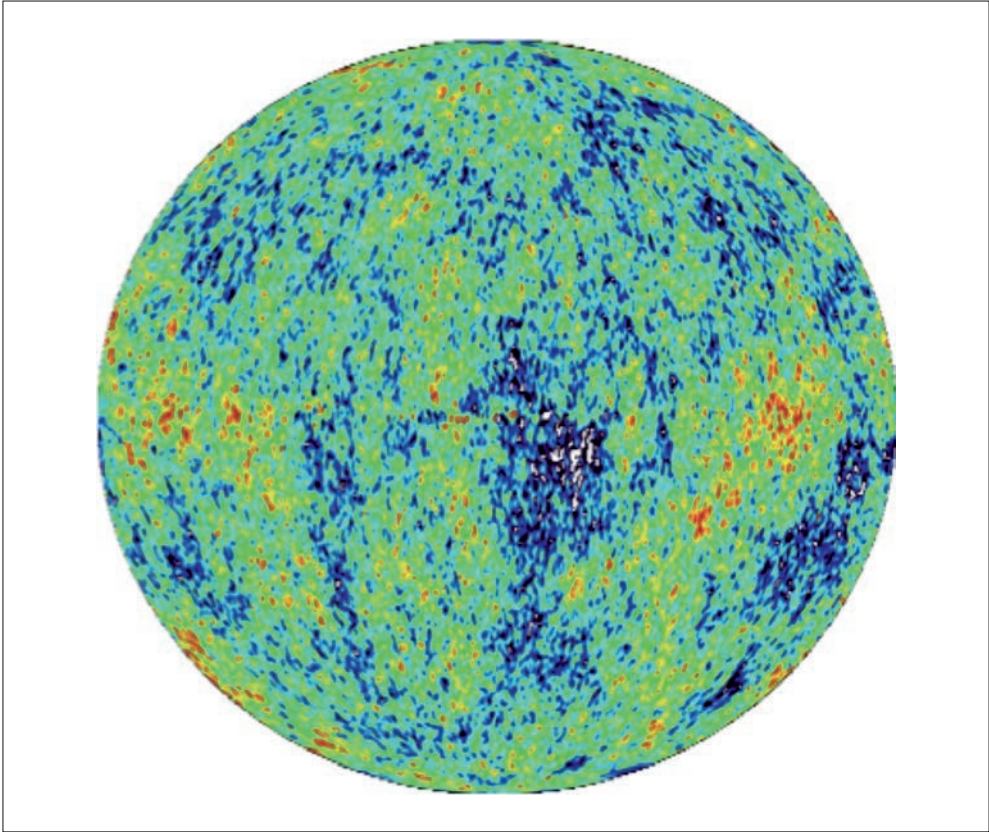


Abb. 4 Die von der NASA-Satellitenmission „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe“ (WMAP) gemessene Himmelskarte der Mikrowellenhintergrundstrahlung. Der Unterschied zwischen den dunkelblauen und roten Gebieten der Himmelskarte beträgt etwa $1/100\,000$ der mittleren Temperatur von $2,725\text{ K}$.

deutlich niedrigere Temperatur gemessen wurde (siehe Abb. 5). Mein Kollege Istvan SZAPUDI von der Universität Hawaii konnte diesen „Cold Spot“ mit einem großen Loch in der Verteilung der Galaxien am Himmel identifizieren – einem sogenannten „Super-Void“, das etwa 30° am Himmel ausmacht und eine Milliarde Lichtjahre groß ist. Es handelt sich dabei um die größte bisher im Kosmos beobachtete Struktur, die von der unsymmetrischen Verteilung der Galaxien in ihrem „kosmischen Netzwerk“ von Filamenten und Leerräumen herrührt.

Kosmologische Simulationen der Dunklen Materie und der normalen Materie wurden in den letzten Jahrzehnten mit der rasanten Entwicklung der Supercomputer immer umfangreicher und detaillierter. Dabei kann die Entwicklung der großräumigen Struktur der Materie im Verlauf der kosmischen Evolution plastisch mitverfolgt werden. Bereits in der Bibel steht: „Denn wer hat, dem wird gegeben, und er wird im Überfluss haben; wer aber nicht hat, dem wird auch noch weggenommen, was er hat.“² Das trifft auch

2 Matthäus-Evangelium, Kapitel 25, Vers 29.

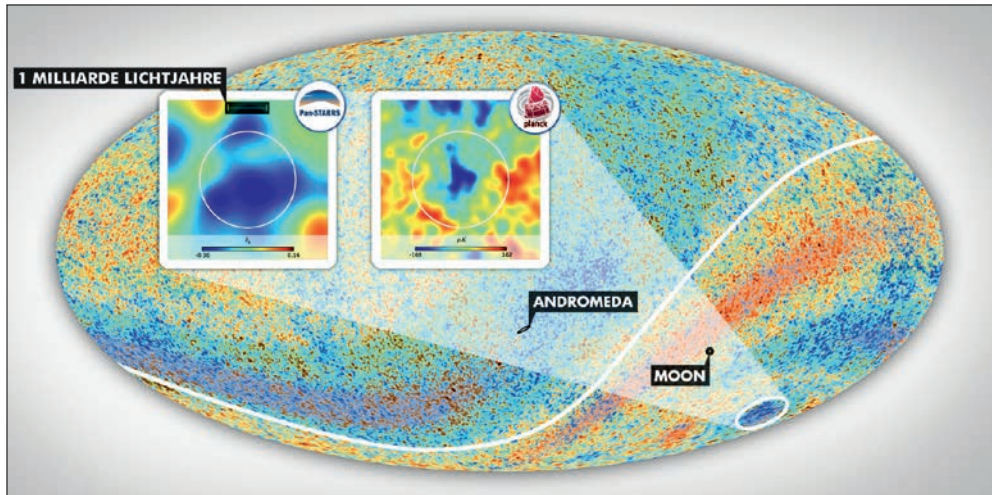


Abb. 5 Die Karte im Hintergrund zeigt die vom ESA-Satellit *Planck* aufgenommene Verteilung der Mikrowellenhintergrundstrahlung am Himmel. Die Milchstraßenebene ist durch eine weiße Linie gekennzeichnet und macht sich auch in der Temperaturverteilung bemerkbar. Der von *Planck* entdeckte „Cold Spot“ befindet sich im Sternbild Eridanus in der südlichen Hemisphäre und ist durch einen weißen Kreis gekennzeichnet. Das linke kleine eingesetzte Bild zeigt ein Loch in der Galaxienverteilung in der Umgebung dieser Anomalie, die Istvan SZAPUDIS Team aus den Daten des Pan-STARRS-Teleskops und des Satelliten WISE ermittelt hat. Der Winkeldurchmesser dieses riesigen leeren Raumgebietes ist etwa 30° am Himmel und entspricht einer Größe von etwa einer Milliarde Lichtjahren. Graphik von Gergő KRÁNICZ; Hintergrund: *ESA Planck Collaboration*.

auf die Gravitationskraft zu, die ähnlich kapitalistisch agiert. Bereits weit vor der Entkopplung von Strahlung und Materie im heißen Feuerball des Urknalls ziehen die aus den Vakuumfluktuationen stammenden winzig kleinen Überschüsse der Dunklen Materie langsam die gesamte Materie in ihrer Umgebung an. Zum Zeitpunkt der Entkopplung der normalen Materie von der Strahlung 380 000 Jahre nach dem Urknall hat die Dunkle Materie bereits die ersten Filamente und großen Leerräume des kosmischen Netzwerks geformt. Da die Dunkle Materie die normale Materie bei weitem überwiegt, wird letztere beim Gravitationskollaps der Dunklen Materie einfach mitgerissen. Wie von Geisterhand entstehen aus der zunächst fast gleichmäßig verteilten Materie innerhalb relativ kurzer Zeit die ersten Kondensationskeime größerer Strukturen, fast wie die Schaumkronen sich brechender Wellen. Danach bilden sich Filamente aus, an denen die Galaxien wie an Perlenschnüren aufgereiht sind, sowie große Leerräume fast ohne Galaxien. Am Kreuzungspunkt von Filamenten entstehen dichte Gebiete mit Tausenden von Galaxien – die Galaxienhaufen und Superhaufen.

Eine der detailliertesten kosmologischen Simulationen der jüngeren Vergangenheit ist *CLUES (Constrained Local UniversE Simulations)*,³ die von einer internationalen Gruppe von Wissenschaftlern unter der Leitung des Leibniz-Instituts für Astrophysik in Potsdam durchgeführt wurde. Das besondere an dieser Computersimulation ist, dass sie den Beobachtungen der Galaxien in unserer lokalen Umgebung angepasst ist, so dass ihre Ergeb-

3 <https://www.clues-project.org/cms/>.

nisse für einen direkten Vergleich mit unserer kosmischen Nachbarschaft herangezogen werden können. Alle die großräumigen Strukturen unserer Umgebung finden sich in der Simulation wieder, wie z.B. der Virgo-Haufen, der Coma-Galaxienhaufen, der Super-Haufen im Sternbild Perseus-Pisces usw. (siehe Abb. 6).

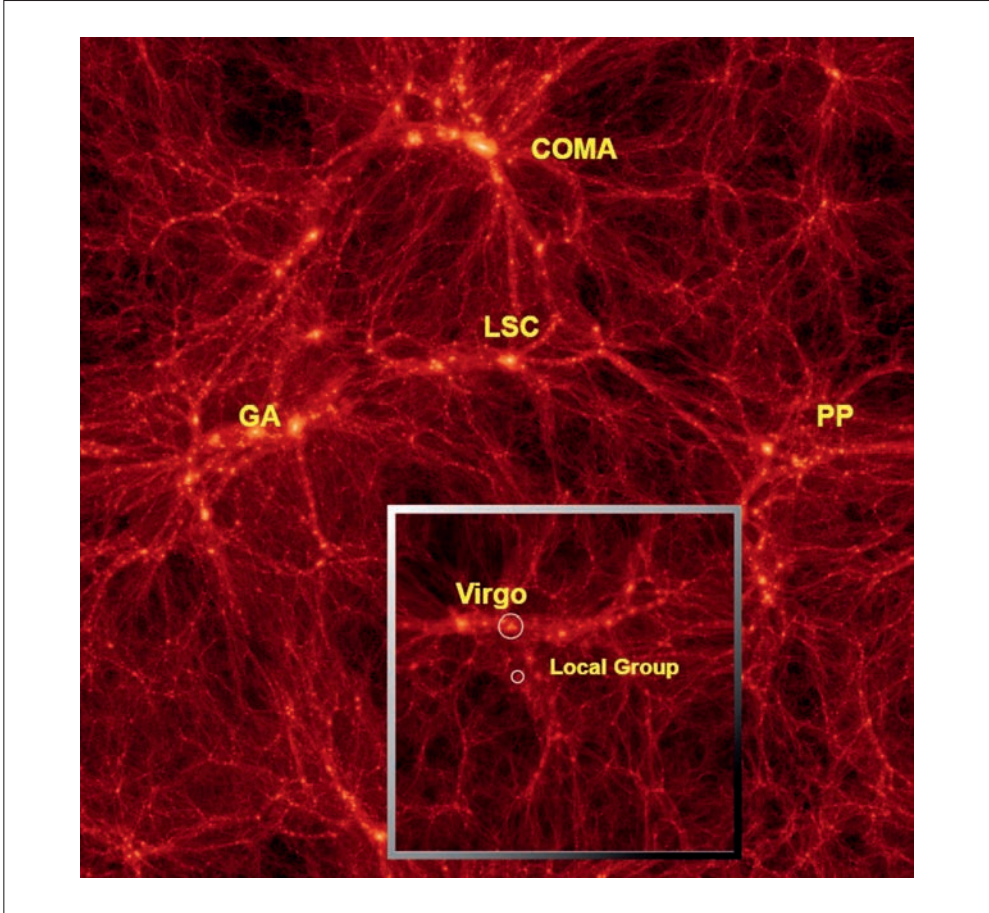


Abb. 6 Die Verteilung der Dunklen Materie in unserem lokalen Universum, wie sie aus zwei kosmologischen Simulationen im Rahmen des Projektes CLUES (*Constrained Local UniversE Simulations*) abgeleitet wurden. Das große Bild zeigt eine Simulation mit einer Kantenlänge von 520 Millionen Lichtjahren, das kleine eingesetzte Bild hat eine Kantenlänge von 200 Millionen Lichtjahren. Unsere Galaxie und der Andromeda-Nebel sind Teil der „Lokalen Gruppe“ (*Local Group*). Grafik: GOTTLÖBER et al., Leibniz-Institut für Astrophysik, Potsdam.

Meinem Kollegen R. Brent TULLY am Astronomischen Institut in Hawaii ist es gelungen, durch eine Zusammensetzung modernster astronomischer Bilder, insbesondere vom Hubble-Weltraumteleskop unter Verwendung von Methoden zur genauen Abstandsbestimmung von Galaxien, einen realistischen Flug durch unser lokales Universum bis hin zum Virgo-Haufen, dem uns am nächsten gelegenen Galaxienhaufen, zu animieren. Der

Film, den man sich im Internet ansehen kann,⁴ beginnt mit einem Blick an den sternensäten Nachthimmel. Im Hintergrund sehen wir das leuchtende Band der Milchstraße mit ihren dunklen Wolken aus Gas und Staub den Himmel überspannen. Das prächtige Wintersternbild des Himmelsjägers Orion mit seinen drei Gürtelsternen und dem daran hängenden Schwert ist rechts vom Zentrum des Bildes sichtbar. Sobald der Film lebendig wird, realisieren wir, dass die Sternbilder nur Projektionen am Himmelszelt sind. Wir fliegen in Richtung des Schwertes von Orion, das sich bald als der farbenprächtige große Nebel im Orion herausstellt, eine Art Kreißsaal, in dem ständig junge Sterne entstehen. Den Orion-Nebel werden wir uns später noch einmal genauer anschauen. In etwa 1500 Lichtjahren Abstand von der Erde fliegen wir vorbei an dem berühmten Pferdekopf-Nebel und kurz darauf durch den Rosetten-Nebel, wo leuchtkräftige junge Sterne eine Hülle aus heißem Gas erleuchten. Wie die Schneeflocken in einem Wintersturm stieben die Sterne unserer Milchstraße an uns vorbei. Bald fliegen wir am Crab-Nebel vorbei, der Explosionswolke einer Supernova aus dem Jahr 1054. Wenn man genau hinschaut, sieht man in ihrem Zentrum den Crab-Pulsar aufblitzen, einen Neutronenstern, der sich 30-mal in der Sekunde um seine Achse dreht.

Kurz danach sehen wir am Horizont das Galaktische Zentrum auftauchen und verlassen die Ebene der Milchstraße. Eine wunderschöne, riesige Spiralgalaxie aus 100 Milliarden Sternen liegt nun vor uns. Wenn wir genau hinschauen, stellen wir fest, dass die Milchstraße rotiert, und zwar innen schneller als außen. Schon schweben die beiden Magellanschen Wolken an uns vorbei, die manchen von uns schon am Südhimmel beeindruckt haben, sowie andere Zwerggalaxien, die unsere Milchstraße begleiten. Dann kommen die beiden anderen großen Galaxien unserer lokalen Gruppe ins Bild, der Andromeda-Nebel im Hintergrund und die Spiralgalaxie Messier 33 im Vordergrund. Wir fliegen durch einen Nebel in einem Spiralarm von M33, durch ein Loch, das vermutlich durch eine Sternexplosion gerissen wurde und mit heißem Gas gefüllt ist. Inzwischen haben wir uns etwa 2 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt. Im Hintergrund sind inzwischen viele andere schwache Lichtflecken aufgetaucht, alles Galaxien unserer Nachbarschaft. Wir sehen, dass sie nicht gleichmäßig am Himmel verteilt sind, sondern in einem kosmischen Netz von Filamenten und Leerräumen aufgereiht sind. Kurz taucht ein auffälliger Klumpen von Galaxien am linken Bildrand auf: das ist der Virgo-Haufen, das Ziel unserer Reise. Wir fliegen allerdings nicht direkt dorthin, sondern besuchen einige andere berühmte Exemplare von Galaxien im Vorbeiflug: Wir sehen das enge Galaxienpaar mit M81 und der stark gestörten Galaxie M82, wir fliegen an der majestätischen Spiralgalaxie M100 vorbei und begegnen dann der wunderschönen Whirlpool-Galaxie M51 und ihrem Begleiter im Sternbild der Jagdhunde. Jetzt sind wir etwa 50 Millionen Lichtjahre von zu Hause entfernt. Und so wie vorher die Sterne wie Schneeflocken an uns vorbei stoben, fliegen wir jetzt an Hunderten von Galaxien vorbei in das Zentrum des Virgo-Haufens. Dort sitzt, wie eine Spinne im kosmischen Netz, die gigantische elliptische Galaxie Messier 87, das Zentrum des Haufens. Diese Galaxie enthält etwa 1000-mal mehr Sterne als unsere Milchstraße und muss wohl im Laufe ihres Lebens bereits eine ganze Menge anderer Galaxien verschluckt haben. Das auffälligste an M87 ist ein nadelfeiner Materiestrahl, in dem Teilchen fast mit Lichtgeschwindigkeit über viele Millionen Lichtjahre in den Raum hinaus geschleudert werden. Dieser Strahl wird durch ein supermassereiches Schwarzes Loch im Zentrum von M87 gefüttert – doch davon später.

4 <http://www.ifa.hawaii.edu/~tully/outreach/movie.html>.

In den letzten Jahren ging Brent TULLY noch deutlich weiter und hat die Positionen und Geschwindigkeiten von etlichen Tausend Galaxien weit über den Virgo-Haufen hinaus vermessen. Zusammen mit einem internationalen Astronometeam identifizierte er die Konturen eines riesigen Superhaufens von Galaxien, der auch unsere eigene Milchstraße enthält. Er nannte diesen Superhaufen „Laniakea“, was in der hawaiianischen Sprache „immenser Himmel“ bedeutet. Der Name ehrt die polynesischen Seefahrer, welche die Kenntnis des Himmels verwendeten, um in der unendlichen Weite des Pazifischen Ozeans zu navigieren.

Wie wir schon gesehen haben, sind Galaxien nicht zufällig im Universum verteilt. Stattdessen bilden sie Gruppen, wie unsere eigene lokale Gruppe, die Dutzende von Galaxien enthalten, und massereiche Galaxienhaufen, mit Hunderten von Galaxien, die alle in einem kosmischen Netzwerk aus Filamenten miteinander verbunden sind, auf denen Galaxien wie Perlen aufgereiht sind. Wo sich diese Filamente kreuzen, finden wir riesige Strukturen, die sogenannten „Superhaufen“. Diese Strukturen sind miteinander verbunden, haben aber keine wohldefinierten Grenzen. TULLY und seine Kollegen konnten die Auswirkungen dieser Superhaufen auf die Bewegungen der Galaxien bestimmen und so den Raumbereich definieren, den die einzelnen Superhaufen dominieren (siehe Abb. 7).



Abb. 7 Der Laniakea-Supercluster und sein Entdecker Brent TULLY. Die Farben repräsentieren die beobachtete Raumdichte der Galaxien: rot entspricht einer hohen Dichte, während blau den großen Leerräumen entspricht. Einzelne Galaxien sind als weiße Punkte gekennzeichnet. Geschwindigkeitsstromlinien von Galaxien innerhalb der Region, die gravitativ von Laniakea dominiert ist, sind in weiß dargestellt. Die orange Konturlinie stellt die äußeren Grenzen dieser Struktur mit einem Durchmesser von etwa 500 Millionen Lichtjahren dar und beinhaltet eine Masse von 10^{17} Sonnen: 100 Millionen Milliarden Sonnen in 100 000 Galaxien. Credit: SDvision interaktive Visualisierungssoftware von Daniel POMERADE am CEA/Saclay, France.

Die Milchstraße befindet sich am Rande eines solchen Superhaufens, Laniakea, der einen Durchmesser von 500 Millionen Lichtjahren hat und die Masse von 10^{17} (hundert Quadrillionen) Sonnen in etwa 100 000 Galaxien beinhaltet. Diese Studie klärt auch die Rolle des Großen Attraktors (GA in Abb. 6), ein Problem, das die Astronomen seit 30 Jahren beschäftigt hat. Innerhalb des Volumens von Laniakea sind die Eigenbewegungen der Galaxien nach innen gerichtet, wie Wasserströme, die ins Tal fließen. Die Region des Großen Attraktors ist ein großes Gravitationstal mit flachem Boden und einer Anziehungskraft, die sich über ganz Laniakea erstreckt. Mit dieser Entdeckung haben Brent TULLY und Kollegen unserer kosmischen Heimat eine weitere Adresszeile hinzugefügt. Wir leben auf dem Planeten Erde, der die Sonne umkreist, die in der Milchstraße ist, welche sich wiederum in dem Superhaufen Laniakea befindet. Die Abbildungen 6 und 7 bestätigen, dass unser lokaler Kosmos bei weitem nicht regelmäßig und schon gar nicht symmetrisch ist.

5. Jets von aktiven Schwarzen Löchern

Wir kommen jetzt zurück zu der Galaxie M87, die wie eine Spinne im kosmischen Netz im Zentrum des Virgo-Haufens liegt und den Materiestrahl, den das Schwarze Loch im Zentrum dieser Galaxie „aussendet“. Sowohl das Schwarze Loch als auch der Jet strahlen Licht in einem breiten Intervall des elektromagnetischen Spektrums vom Radio- bis in den Gammabereich ab (siehe Abb. 8A). Warum strahlt ein Schwarzes Loch überhaupt – sollte es nicht alles Licht verschlucken? Wir sehen in Wirklichkeit nicht das Schwarze Loch selbst, sondern die Materie in seiner unmittelbaren Umgebung, die von diesem Mahlstrom verschluckt wird. Dabei erreicht sie Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit und heizt sich durch Reibungsverluste und andere, noch nicht ganz verstandene hochenergetische Prozesse in der sogenannten „Akkretionsscheibe“ so stark auf, dass sie etwa im Röntgenlicht sehr hell zu strahlen beginnt (siehe Abb. 8B). Wir sehen gleichsam den „letzten Hilfeschrei“ der Materie, kurz bevor sie in das Schwarze Loch hineinfällt.

Oft wird neben starker elektromagnetischer Strahlung auch Materie aus der Umgebung des Schwarzen Loches emittiert. In scharf gebündelten Teilchenstrahlen, sogenannten „Jets“, wird sie auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt. Der Mechanismus, mit dem diese Jets erzeugt werden, ist bis heute nicht ganz verstanden. Sehr wahrscheinlich sind jedoch die durch den Dynamoeffekt in der Scheibe entstehenden Magnetfelder dafür verantwortlich. Die Magnetfeldlinien werden durch die differentielle Rotation der Scheibe so stark aufgewickelt, dass sie – ähnlich wie die auf einer Gabel aufgerollten Spaghetti – eine Art magnetischen Turm bilden, in dem die Materie des Gasstroms stark beschleunigt und gebündelt wird.

Im Zusammenhang mit dem Thema unserer Tagung ist dabei die ausgeprägte Asymmetrie vieler Jets von Interesse. Die schematische Darstellung in Abbildung 8B legt ja nahe, dass das Phänomen der Jets eigentlich symmetrisch sein sollte. M87 hat aber einen einseitigen Jet, und auch allgemein kommen einseitige Radio-Jets deutlich häufiger vor als symmetrische. Abbildung 9 vergleicht zwei Beispiele von Radio-Quasaren, sehr leuchtkräftigen aktiven Schwarzen Löchern. Die Abbildung 9A zeigt eines der seltenen Beispiele eines relativ symmetrischen Jets. Interessant sind dabei die an beiden Enden des Jets liegenden Radio-Blasen. Dies sind die Gebiete, in denen die auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigten Teilchen mit dem umgebenden intergalaktischen Medium wechsel-

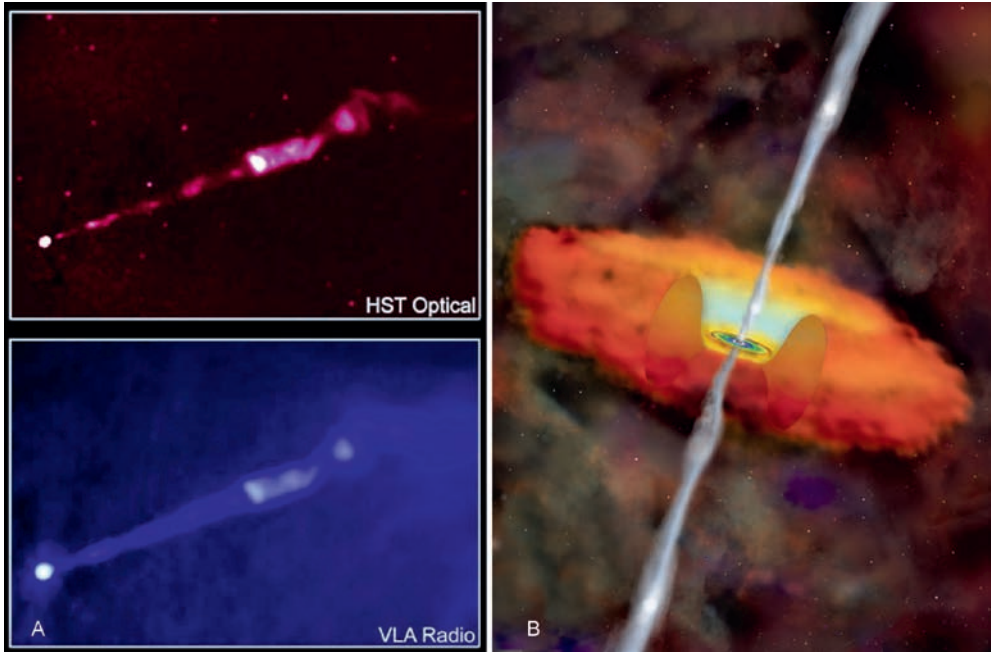


Abb. 8 (A) M87 ist die zentrale Galaxie im Virgo-Galaxienhaufen. In ihrem Zentrum sitzt ein aktives Schwarzes Loch, das in allen Wellenlängen sehr hell strahlt und ebenfalls in einem dünnen Strahl Teilchen auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt. (B): Schematische Darstellung eines gut gefütterten (aktiven) Schwarzen Loches. Im unmittelbaren Zentrum um das Schwarze Loch befindet sich die Akkretionsscheibe, in der auch der Materiestrahl entsteht. Die Scheibe ist umgeben von einem Torus aus Gas- und Staubwolken, der hier aufgeschnitten ist.

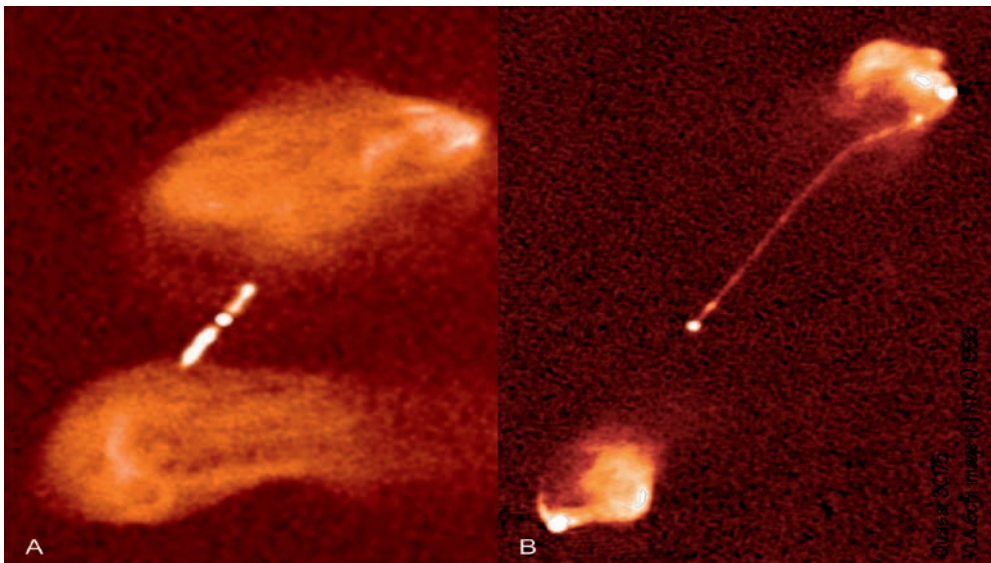


Abb. 9 (A) Der Quasar 3C288 mit symmetrischem Jet. (B): 3C175 mit einseitigem Jet

wirken und dabei abgebremst werden. Abbildung 9B zeigt ein Beispiel eines einseitigen Radio-Jets. Wie bei dem Bild links gibt es jedoch zwei Radio-Blasen, was drauf hinweist, dass auf beiden Seiten Teilchen beschleunigt und abgebremst werden.

Des Rätsels Lösung liegt in EINSTEINS Spezieller Relativitätstheorie, die erklärt, dass die Strahlungscharakteristik einer isotropen Lichtquelle, die sich mit relativistischer Geschwindigkeit relativ zu einem Beobachter bewegt, stark in Vorwärtsrichtung gebündelt wird. Ein Teilchen, das sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit auf uns zu bewegt, strahlt deshalb um ein Vielfaches heller, als ein Teilchen, das sich mit der gleichen Geschwindigkeit von uns entfernt. Ein Teilchenstrahl, der in Richtung des Beobachters beschleunigt wird, erscheint deshalb einseitig. Wenn wir dagegen senkrecht von der Seite auf den Jet blicken, erscheinen uns beide Seiten gleich hell. Die Frage der Symmetrie oder Asymmetrie ist in diesem Fall also einfach eine Frage des Standpunkts. Nachdem eine exakt senkrechte Blicklinie nur relativ selten vorkommt, erscheinen die meisten relativistischen Jets als asymmetrisch.

6. Annäherung an den Ereignishorizont

Relativistische Effekte spielen auch bei der Annäherung an den Ereignishorizont eines Schwarzen Loches eine große Rolle (siehe Abb. 10). Diese können anhand der in der Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch rotierenden Eisenatome spektroskopisch untersucht werden. Die Eisenatome senden im Ruhezustand eine charakteristische Emissionslinie im Röntgenlicht bei einer Energie von 7,4 keV aus. Im inneren Bereich der Akkretionsscheibe rotiert die Materie mit hohen Geschwindigkeiten um das Schwarze Loch, was sich spektroskopisch durch eine Doppler-Verschiebung der Emissionslinie bemerkbar macht. Blicken wir unter flachem Winkel auf die Akkretionsscheibe, wie in Abbildung 10A, so sehen wir im klassischen Fall ein symmetrisches Emissionslinienprofil mit zwei „Hörnern“.

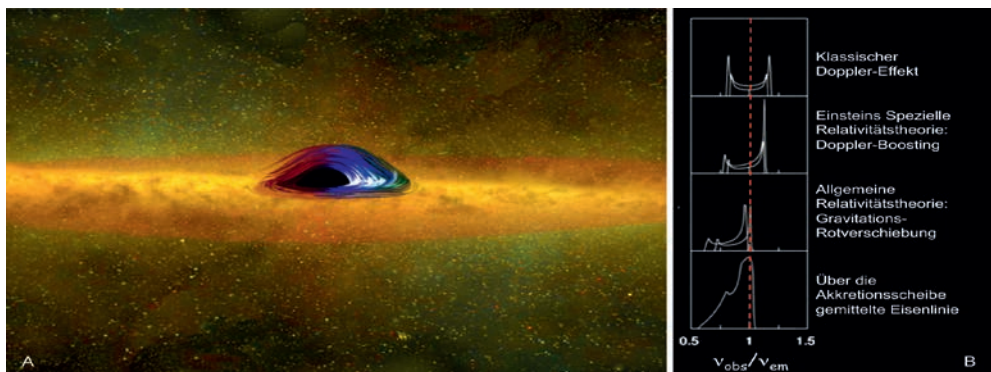


Abb. 10 (A) Schematische Darstellung des Inneren einer Akkretionsscheibe in unmittelbarer Nähe eines Schwarzen Loches. Materie, die sich mit relativistischer Geschwindigkeit auf uns zu bewegt, erscheint blau verschoben und deutlich heller als die Materie, die sich von uns weg bewegt. (B): Zwei Profile stellen jeweils einen Ring in der Akkretionsscheibe bei zwei verschiedenen Abständen dar. In der obersten Grafik sind nur Effekte der klassischen Mechanik berücksichtigt. Im zweiten Bild wird die Spezielle Relativitätstheorie hinzugezogen. In der dritten Grafik kommt die Allgemeine Relativitätstheorie hinzu. Das unterste Bild zeigt die asymmetrische, relativistisch verbreiterte Form der Eisenlinie über die ganze Akkretionsscheibe gemittelt.

Das kommt dadurch zustande, dass am Rande des betrachteten Ringes in der Akkretions-scheibe, wo sich die Materie mit der höchsten Geschwindigkeit auf den Beobachter zu bzw. von ihm weg bewegt, der Doppler-Effekt am größten ist. Nimmt man den Effekt der speziellen Relativitätstheorie hinzu, dann ist der „blaue“ Höcker der Emissionslinie durch das relativistische Doppler-Boosting, das wir bereits oben bei den Jets diskutiert haben, deutlich höher als der rote Teil. Die Linie wird asymmetrisch. Durch die Allgemeine Relativitätstheorie wird das gesamte Linienprofil deutlich zum „roten“ Teil des Spektrums verschoben: In der Nähe großer Massen laufen die Uhren langsamer, was zu einer Gravitationsrotverschiebung führt.

Das gesamte Emissionslinienprofil der Akkretionsscheibe (Abb. 10B, unten) ist schlussendlich eine symmetrische, breite, in den „roten“ Teil des Röntgenspektrums verschobene Emissionslinie, wie sie bereits bei einer ganzen Reihe von Schwarzen Löchern gefunden wurde (TANAKA et al. 1995).

7. Gravitationswellen-Kicks

Im Jahre 2002 hat unser Team am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik das erste doppelte Schwarze Loch in der Galaxie NGC6240 entdeckt, die sich mitten in einem Vereinigungsprozess befindet (siehe Abb. 11A). Nach den theoretischen Vorhersagen sollte dieser Vereinigungsprozess noch etwa 100 Millionen Jahre dauern, bevor sich die beiden Schwarzen Löcher mit großem Gravitationswellengetöse miteinander vereinigen. Die Wissenschaftler, die seit Jahrzehnten auf der ganzen Welt an immer empfindlicheren Detektoren zur Entdeckung von Gravitationswellen arbeiten, freuten sich, weil das Ergebnis von NGC6240 darauf hinwies, dass im Universum viele solcher Vereinigungen von Schwarzen Löchern stattfinden müssten, so dass sie tatsächlich Signale erwarten konnten. Die Häufigkeit solcher Vereinigungen und das Massenspektrum der Schwarzen Löcher ist aber noch weitgehend unbekannt.

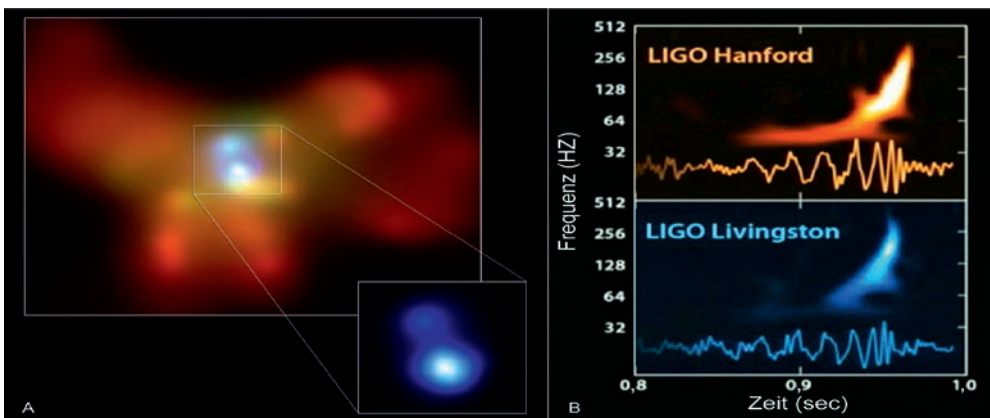


Abb. 11 (A) Röntgenaufnahme der verschmelzenden Galaxie NGC6240, in deren Zentrum zum ersten Mal zwei aktive Schwarze Löcher entdeckt wurden, die sich in etwa 100 Millionen Jahren miteinander vereinigen werden (CHANDRA). (B) Die ersten direkt nachgewiesenen Gravitationswellen-Chirps, die von einer Vereinigung zweier Schwarzer Löcher mit etwa 30 Sonnenmassen herrühren (aLIGO).

Erst im Jahr 2006 gelang einem Team am *Goddard Space Flight Center* der Durchbruch, die Vereinigung zweier Schwarzer Löcher in der vollen Allgemeinen Relativitätstheorie an einem Supercomputer zu modellieren. Seitdem wurden diese Simulationen immer detaillierter und genauer und dienten insbesondere der Vorhersage von Signalen an den Gravitationswellendetektoren. Wenn sich zwei Schwarze Löcher nahe kommen, umkreisen sie sich immer schneller, so dass die Frequenz und die Amplitude des Gravitationswellensignals stark ansteigen, bis das Signal bei der endgültigen Vereinigung der Schwarzen Löcher abrupt abbricht. Man spricht deshalb von einem *Chirp*, der sich, in akustische Schwingungen umgewandelt, wie das Zwitschern eines Vogels anhört.

Im Februar 2016, nach über 30-jähriger Vorbereitungszeit, vermeldete das „advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory“ (aLIGO) einen Durchbruch bei der Entdeckung der Gravitationswellen. In dem System GW150914 wurden im September 2015 zwei Schwarze Löcher mit etwa 36 und 29 Sonnenmassen in einer Entfernung von mehr als eine Milliarde Lichtjahren beobachtet, die bei ihrer Vereinigung starke Gravitationswellen abgaben, die von den beiden Gravitationswelleninterferometern in Livingston und in Hanford unabhängig voneinander als etwa 0,2 s langer *Chirp* gemessen wurden (siehe Abb. 11B) (ABBOTT et al. 2016). Dieses Ergebnis war nicht nur ein Durchbruch der modernen Experimentalphysik, der höchstwahrscheinlich mit dem Nobelpreis belohnt werden wird, sondern hat auch die Astrophysik transformiert. Wie beim Übergang vom Stummfilm zum Tonfilm können wir den Himmel nun nicht nur im gesamten elektromagnetischen Spektrum „sehen“, sondern mittels der Gravitationswellen jetzt auch „hören“. Das Ereignis gibt den Astrophysikern allerdings auch neue Rätsel auf: Niemand versteht bisher, wie zwei derart massereiche stellare Schwarze Löcher auf engstem Raum zusammenkommen können, um sich miteinander zu vereinigen. aLIGO hat bereits ein weiteres schwächeres Ereignis vermeldet, so dass man davon ausgehen kann, dass derartige Vereinigungsprozesse relativ häufig vorkommen.

Das Endprodukt des Gravitationswelleneignisses GW150914 war ein einzelnes Schwarzes Loch mit 62 Sonnenmassen. Daher wurden etwa 3 Sonnenmassen, also 5% der Gesamtmasse, als Gravitationswellen in den Weltraum abgestrahlt. Diese Vereinigung kann deshalb mit Fug und Recht als die (nach dem Urknall) größte jemals beobachtete Explosion bezeichnet werden. Je nachdem, wie symmetrisch oder wie asymmetrisch die Gravitationswellen dabei ausgesandt werden, kann das dramatische Auswirkungen auf das System haben. Ein Schwarzes Loch wird im Wesentlichen durch seine Masse charakterisiert, in zweiter Linie aber auch durch seinen Drehimpuls. Mit Hilfe der detaillierten allgemein-relativistischen Computersimulationen kann man die genaue Form der Gravitationswellen, die bei der Vereinigung der Schwarzen Löcher entsteht, berechnen. Liegen die Drehachsen (oder „Spins“) der beiden Schwarzen Löcher vor ihrer Vereinigung parallel oder antiparallel zueinander, entsteht ein relativ symmetrisches Gravitationswellenmuster. Sind die Spins jedoch deutlich gegeneinander gekippt, werden die Gravitationswellen in einem stark asymmetrischen Muster in eine bevorzugte Richtung ausgesandt. Das vereinigte Schwarze Loch bekommt dadurch einen starken Schub in die Gegenrichtung. Solche Gravitationswellen-Kicks können durchaus dazu führen, dass das Schwarze Loch nach der Vereinigung mit Geschwindigkeiten bis zu 3000 km/s aus seiner Galaxie herausgeschleudert wird – eine extreme Folge der Asymmetrie.

Literatur

- ABBOTT, B. P., et al. (*LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration*): Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.* *116*, 061102 (2016)
- GUTH, A.: Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts. München: Droemer Knauer 1999
- GUTH, A. H., and TYE, S.-H. H.: Phase transition and magnetic monopole production in the very early universe. *Phys. Rev. Lett.* *44*, 631 (1980)
- HASINGER, G.: Das Schicksal des Universums. München: Beck 2007
- KUSENKO, A., PEARCE, L., and YANG, L.: Postinflationary Higgs relaxation and the origin of matter-antimatter asymmetry. *Phys. Rev. Lett.* *114*, 061302 (2015)
- LINDE, A. D.: Chaotic inflation. *Phys. Lett. B* *129*, 177–181 (1983)
- TANAKA, Y., NANDRA, P., FABIAN, A., et al.: Gravitationally redshifted emission implying an accretion disk and massive black hole in the active galaxy MCG-6-30-15. *Nature* *375*, 659 (1995)

Prof. Dr. Günther HASINGER
University of Hawaii
Institute of Astronomy
2680 Woodlawn Drive
Honolulu HI 96822–1839
USA
Tel.: 001 808 956856
Fax: 001 808 946 3467
E-Mail: hasinger@ifa.hawaii.edu

Ohne Abweichung kein Leben – Die bildende Kunst und die Symmetrie

Horst BREDEKAMP ML (Berlin)



Zusammenfassung

In der Kunsttheorie stehen sich unversöhnbar zwei Grundauffassungen gegenüber. Eine erste Lehre, die in der Regel mit dem Begriff der Klassik verbunden wird, erkennt in der Kunst, wie sie etwa die Hochrenaissance entwickelt hat, die Symmetrie als Grundlage ihrer höchsten Vollendung. Die zweite, zumeist als Prinzip des Manierismus bezeichnete Überzeugung erkennt in der Symmetrie nicht etwa die Bedingung für höchste Vollendung, sondern für eine formale und damit auch inhaltliche Leere. Im Vortrag soll gefragt werden, ob Symmetrie ein erschöpfendes Prinzip der Kunst sein kann, oder ob ein Minimum an Asymmetrie notwendig ist, um die Kunst in jene Rahmenstellung zu führen, die mit dem Begriff des Lebens verbunden ist.

Abstract

Two basic principles of art theory are irreconcilable. The first principle, which is usually associated with the term “classic”, identifies symmetry in art, such as the High Renaissance developed it, as the basis for its ultimate perfection. The second persuasion, usually characterized as a principle of Mannerism, perceives symmetry as a formal emptiness lacking in content rather than a condition for ultimate perfection. This talk questions whether symmetry can be an exhaustive principle of art, or whether a minimum amount of asymmetry is necessary in order to place art in a framework that is tied to the concept of life.

1. Die Asymmetrie der Nofretete

Die Büste der *Nofretete* im Neuen Museum auf der Museumsinsel gilt als *Mona Lisa* Berlins.¹ Abgesehen von dem unausgeführten linken Auge erscheint das Bildnis der ägyptischen Königin aus den letzten Jahren der Regierungszeit ihres Gemahls ECHNATON (1375–1357 v. Chr.) als Inbegriff einer vollendeten Schönheit. Strikt frontal aufgenommene Photographien der *Nofretete* haben die Ebenmäßigkeit ihrer Züge auf deren spiegelbildliche Anlage bezogen (Abb. 1A).² In dieser Bestimmung erfüllt die *Nofretete* den Begriff der Symmetrie, wie ihn Johann Georg SULZER im Jahr 1794 definiert hat: Teilung eines Werkes in zwei gleiche Hälften.³



Abb. 1 (A) Büste der Königin *Nofretete*, Amarna-Zeit, um 1340 v. Chr., Kalkstein und farbige Fassung, Wiesbaden, Aufnahme des Jahres 1954, entnommen aus ANTHES 1954, S. 13. (B) Walter I. FARMER mit der Büste der Königin *Nofretete*, Wiesbaden, 1945.

Allerdings irritiert bei näherer Betrachtung ein Detail, das sich diesem Eindruck widersetzt.⁴ Die Standfläche liegt an ihrem rechten Rand nicht auf, sondern steht eigenartig in der Luft. Die erste überlieferte Aufnahme, bei der diese Situation von der Seite her

1 Grundlegend zur Geschichte ihrer Auffindung und Bewahrung KRAUSS 1988 und SAVOY 2011.

2 ANTHES 1954, S. 13.

3 *Historisches Wörterbuch der Philosophie* 1998, Bd. 10, Sp. 745.

4 Vgl. zum Folgenden ausführlicher, teils wörtlich BREDEKAMP 2013.

sichtbar wird, stellt das 1945 entstandene Portrait des amerikanischen Kunstschutzoffiziers Walter I. FARMER dar (Abb. 1B). Die Photographie zeigt den Offizier der *Monuments Men* als Leiter des Wiesbadener *Collecting Points* mit der auf dem dunklen Sockel ruhenden Büste.⁵ Auf der unteren Breitseite liegt der Schatten eines Spaltes, der durch einen seitlich unterlegten Keil verursacht wird. Die Schrägstellung der Unterkante, wie sie die Photographie des Jahres 1954 ausweist, ist ein Resultat desselben Keils (Abb. 1A). Er hebt die Büste auf der rechten Seite um ca. 8 mm in einem Winkel von ca. 3° an. Dieser Befund ist erstaunlich.

Seit ihrer ersten öffentlichen Aufstellung im Jahr 1924 ist die *Nofretete* noch niemals gemäß leicht schräger Basis aufgestellt worden, und dies gilt auch für ihre jüngste Präsentation im Neuen Museum Berlin. Das Postament ist so weit angewinkelt, dass die Büste eine lotrechte Ausrichtung erhält. Eine berühmt gewordene Aufnahme der Bundeskanzlerin Angela MERKEL lässt die Standfläche der *Nofretete* geradezu zu einer Rampe werden (Abb. 2).



Abb. 2 Bundeskanzlerin Angela MERKEL mit Michael EISSENHAUER vor der Büste der *Nofretete* anlässlich der Eröffnung des Neuen Museums, Fotografie, 16. 10. 2009, <http://www.bundregierung.de/Content/DE/Fotoarchiv/2009/10/2009-10-16-bundeskanzlerin-angela-merkel-eroeffnung-neues-museum-2009.htm>

Im Jahr 2010 wurde die Büste durch das Rathgen-Forschungslabor im Alten Museum von Berlin untersucht, und bei dieser Gelegenheit konnte ich sie näher studieren (Abb. 3A). Bei keilloser Aufsockelung verändert sie ihren Charakter. Die zentrale Achse ihres Gesichtes kippt um die erwähnten etwa 3° nach rechts (Abb. 3B).

Auf diese Weise geht von der leicht hochgezogenen und stärker ausgestellten rechten Schulter eine Art Drehmoment aus, der einen Schub der Verlebendigung bewirkt

5 FARMER 2002, S. 92, Abb. S. 236.



Abb. 3 (A) Büste der *Nofretete* während der Restaurierung, 2010. (B) Büste der *Nofretete* auf ihrem Gestell zum Abschluss der Restaurierung, 2010

(Abb. 4A). Die linke Augenbraue erscheint im nach außen gehenden Bereich nun breiter als die rechte; zudem setzen die Oberlidfurchen in unterschiedlicher Höhe an. Eine zentrale Vertikalachse vorausgesetzt, liegen die einzelnen Elemente des Gesichts nicht in demselben Abstand. Die geneigte *Nofretete* verliert den Eindruck makelloser Spiegelsymmetrie, gewinnt durch ihre minimalen Störungen aber den *touch* einer von innen kommenden Lebendigkeit.⁶ Noch gesteigert ist dieser Effekt in der Rückansicht. In der Schrägstellung kontrastieren die Hals- und Schulterlinien, und der Wechsel von der vertikalen Ausrichtung (Abb. 4B) in eine geneigte Stellung (Abb. 4C) kommt einem kleinen Stromstoß der Verlebendigung gleich.

Seit die *Nofretete* öffentlich zu sehen war, bestärkt ihre lotrechte Aufstellung (Abb. 1) die Lehrmeinung, dass die ägyptische Kunst eine normative Spiegelsymmetrie verfolgt habe. Dieses ästhetische Vorurteil opfert die ihr eigene Finesse, im Spiel von Symmetrie und Symmetriebruch ihre innere Lebendigkeit hervorzubringen (Abb. 4A). Umso mehr wird das Verstellte mein Thema sein.

6 KRAUSS 1991, S. 144f.



Abb. 4 (A) Büste der *Nofretete* ohne unterstützenden Keil, Aufnahme während der Restaurierung 2010. (B) Rückenansicht der *Nofretete*-Büste mit unterstützendem Keil. (C) Rückenansicht der *Nofretete*-Büste ohne unterstützenden Keil während der Restaurierung, 2010.

2. Proportionalität und Störung

Die vertikale Aufrichtung der *Nofretete* hat diese Figur dem gewohnten Bild der ägyptischen Kunst als einer durchweg streng symmetrischen und stilisierten Kunst eingepasst.⁷ Umso stärker kann diese Büste in unverkeilter Form eine alternative Sicht bekräftigen, die in der ägyptischen Skulptur eine gelebte Individualität verkörpert sieht.⁸ In dem hier angelegten Zusammenspiel von Symmetrie und Störung wird auf diese Weise die Bindung zur griechischen Kunst, die in der Regel als Gegentese begriffen wurde, verstärkt.⁹

Als ursprünglicher Begriff der griechischen Kunsttheorie hat die Symmetrie als Proportionalität eine allgemeine Bedeutung gewonnen, als Beziehung der Teile eines Werkes nach einem gemeinsamen Zahlenmaß. Diese Bestimmung geht wesentlich auf einen verlorenen Text des griechischen Bildhauers POLYKLET zurück, den legendären *Kanon*.¹⁰ Die Maßverhältnisse, welche POLYKLET der Musterfigur des *Doryphoros* (Abb. 5A) einverleibt hat, bestanden in glatten Brüchen: So macht das Gesicht $1/10$, der Kopf $1/8$, die Brustmitte bis Scheitel $1/4$ und die Fußlänge $1/6$ des gesamten Körpers aus (Abb. 5B). Nach diesem Muster richten sich auch die Ausmaße der einzelnen Gliedmaßen.¹¹

7 Eine frühe Kritik dieses Deutungsmusters stammt von ASSMANN 1985.

8 MORGAN 2011, S. 4.

9 Vgl. im Sinn dieses neuen Großverständnisses des Mittelmeerraumes BOL 2004a sowie die großartige Ausstellung „Ägypten Griechenland Rom. Abwehr und Berührung“ (BECK et al. 2005).

10 Der Mediziner GALEN hat zumindest den Kernsatz überliefert: „Das Gelingen kommt durch viele Zahlenverhältnisse zustande, wobei Kleinstes (para mikron) den Ausschlag gibt.“ (Freie Übersetzung nach DIELS, 1922, Bd. I, S. 296 [28, B, 2]; vgl. KAISER 1990, S. 51.)

11 BERGER 1990, S. 169. Vgl. hierzu und zum Folgenden ausführlicher, teils wörtlich BREDEKAMP 2014.



Abb. 5 (A) Römische Kopie nach POLYKLET, *Doryphoros*, 1. Jhd. v. Chr., Marmor, Neapel, Museo Archeologico Nazionale. (B) *Doryphoros*, Neapel, mit Viertel-, Fünftel- und Sechstel-Gliederung. (C) Zwei Speerträger der Ausstellung „Serial Classic“, Mailand 2015. (Die Aufnahme entstammt der Süddeutschen Zeitung, Nr. 149, 2. Juli 2015, S. 11.)

Im *Timaios* hat PLATON diese Art der Symmetrie als ein proportionales Zusammenspiel von Teilen eines Gebildes bestimmt. Diese Definition gilt bis heute.¹² PLATONS Ausgangspunkt war das Verhältnis von Ton und Zahl in der Musik, aber nicht weniger hat er die bildende Kunst, die er bekanntlich auch gefürchtet hat, in Rechnung gestellt. Man muss sich vergegenwärtigen, welche Prozesse auch und gerade mit Blick auf das Proportions- und Symmetriebewusstsein es bedeutete, wenn die Bewohner der griechischen Städte von mehr Statuen symmetrischer Körper umgeben waren, als es Einwohner gab (Abb. 5C).¹³ Ein jeder Schritt war gleichsam eine Einübung in Kommensurabilität und Proportionalität als Bedingung von Symmetrie.

3. Die Proportion und ihre Störung

Aber auch diesem Prinzip war die Störung systematisch eingegeben. Der Proportioniertheit des Speerträgers ist die zwischen 350 und 340 vor Christus von PRAXITELES geschaffene *Aphrodite von Knidos* gegenüber zu stellen (Abb. 6), die nicht weniger berühmt war als POLYKLETS Kanonfigur, jedoch aus entgegengesetztem Grund: Sie konfrontiert den Betrachter mit ihrer leicht disproportionalen Gestalt.¹⁴

12 BÖHME 1986, S. 10.

13 Diese Frage hat sich Babette BABICH gestellt (BABICH 2008). Vgl. zur Serialität der antiken Skulptur SETTIS 2015.

14 Sie ist in Kopien, wie etwa der Fassung der Vatikanischen Museen, überliefert. Zur Geschichte der Verehrung der Statue des PRAXITELES siehe HINZ 1998. Zur Figur selbst BOL 2004b, S. 329. Aufnahme entnommen aus BORBEIN 1995, S. 275.



Abb. 6 *Venus Colonna*, röm. Kopie nach PRAXITELES, *Aphrodite von Knidos*, 350–340 v. Chr., Marmor, Rom, Vatikanische Sammlungen.

Ihren schmalen Schultern und den entsprechenden Brüsten, die auf ein jugendliches Alter verweisen, steht der Eindruck ihres zu großen und zu weit ausschwingenden, fülligen Unterkörpers gegenüber. Dieser disproportionale Kompositcharakter des Körpers setzt sich in ihrer psychologischen Ambivalenz fort. Ihr Kopf wirkt in seiner leichten Neigung unentschlossen, und auch die Gestik der Hände erscheint mehrdeutig: Die linke Hand gibt nicht zu erkennen, ob sie das Gewand ablegt, um sich zu entkleiden, oder ob sie den Stoff aufnimmt, um sich zu bedecken. Entsprechend lässt die Rechte offen, ob sie das Geschlecht bedecken oder ob sie zum Gewand greifen will.

Es war dieses Zusammenspiel gegensätzlicher Motive, das einen unbekanntem Autoren des zweiten nachchristlichen Jahrhunderts dadurch in Erregung versetzt hat, „dass der

spröde Marmor doch an allen Gliedern elastisch und wie lebend sich darstellt“.¹⁵ Hierin liegt meines Erachtens die entscheidende Quelle. Die leicht disproportionale Aphroditen-Figur entwickelt mit ihrer Lebendigkeit eine Erosvalenz, der eine Reihe junger Männer bis zum Wahn zum Opfer fallen.¹⁶

Der Speerträger (Abb. 5A) verkörpert ein Proportionsverhältnis, das die *Aphrodite* verletzt. Und während der *Doryphoros* die Distanziertheit einer schier unerreichbaren Norm erzeugt, entfesselt die *Aphrodite* in ihrer gebrochenen Proportion ein bis zum Irrsinn sich steigerndes Verlangen. Beide Statuen veräußern ihre Wirkung auf unterschiedliche Weise: der Speerträger durch seine normative Proportion, die *Aphrodite* jedoch durch ihre verlebendigende Störung der Maßverhältnisse. Wie bei der *Nofretete* bedeutet der Bruch des Ebenmaßes eine Verlebendigung, wenn nicht Erotisierung.

4. Leonardos, Dürers und Michelangelos unstimmige Harmonie

Gemäß der Lehre des PYTHAGORAS war der Kosmos nach den Regeln der Verhältnismäßigkeit gestaltet, und dies schien in der Proportionalität des Menschen eine Entsprechung zu finden. Im dritten Buch seines Werkes über die Baukunst hat der CAESAR und AUGUSTUS dienende Heeresingenieur VITRUV einen Abschnitt über die Proportionen des menschlichen Körpers im Sinne des Kanons von POLYKLET vorgelegt. VITRUV zufolge ist der natürliche Mittelpunkt des Menschen der Nabel, der bei ausgestreckten Armen und Füßen sowohl für den Kreis wie auch für das Quadrat das Zentrum abgibt.¹⁷ Aus der *convenevolezza*, also Gebührligkeit dieses Zusammenspiels von Körper und Geometrie, ergab sich damit so etwas wie eine Weltformel. Was die Astrologie durch ihre Korrespondenzen zwischen der Sternwelt und den Menschenschicksalen behauptete, schien der Vitruv-Mann auf eine rationalere, mathematisch begründete Grundlage zu stellen.¹⁸

Auch diese Überzeugung wurde jedoch sowohl aufgenommen wie kritisiert. Schon der Lehrer LEONARDOS, Francesco di Giorgio MARTINI, hat VITRUVS Annahme mit der Lässigkeit einer intuitiven Gewissheit visualisiert, dass ideale Proportion und lebendige Wirklichkeit niemals absolut zur Deckung zu bringen sind. Seine Vitruv-Gestalt (Abb. 7A) vermeidet die starre Frontalität, um die Arme leicht ausschwingen lassen zu können. Indem sie von VITRUVS Vorschrift abweicht, verteidigt sie die Mathematik des Lebendigen. Der Mensch tritt hier förmlich aus der Gebundenheit durch das Maß des Kreises heraus. In der Souveränität, in der diese Einsicht hier charakterisiert wird, liegt die bestrickende Qualität dieser kleinen Zeichnung MARTINIS.

15 LUKIAN 1920, 13, S. 69. Vgl. LUCIAN 1979, S. 168/169–170/171. Vgl. HINZ 1998, S. 17–21.

16 Übersetzung nach LUKIAN 1920, 13, S. 69 f. (vgl. LUCIAN 1979, S. 170/171). Hierzu auch LUKIAN 1920, 16, S. 73 (vgl. LUCIAN 1979, S. 174/175–176/177).

17 „Ferner ist natürlicherweise der Mittelpunkt des Körpers der Nabel. Liegt nämlich ein Mensch mit gespreizten Armen und Beinen auf dem Rücken, und setzt man die Zirkelspitze an der Stelle des Nabels ein und schlägt einen Kreis, dann werden von dem Kreis die Fingerspitzen beider Hände und die Zehenspitzen berührt. Ebenso wie sich am Körper ein Kreis ergibt, wird sich auch die Figur des Quadrats an ihm finden. Wenn man nämlich von den Fußsohlen bis zum Scheitel Maß nimmt und wendet dieses Maß auf die ausgestreckten Hände an, so wird sich die gleiche Breite und Höhe ergeben, wie bei Flächen, die nach dem Winkelmaß quadratisch angelegt sind.“ (VITRUV 1991, S. 139.)

18 Der Vitruv-Mensch wurde zum Symbol der „mathematischen Sympathie zwischen Mikrokosmos und Makrokosmos“ (WITTKOWER 1969, S. 21). Zur Kritik WITTKOWERS siehe ZÖLLNER 1987, S. 8–22.

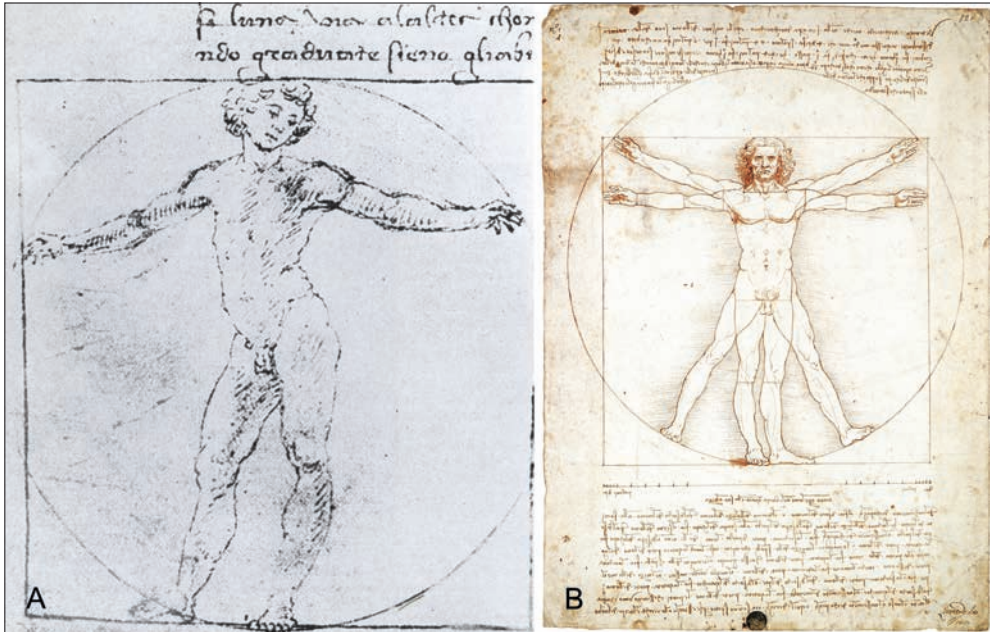


Abb. 7 (A) Francesco di Giorgio MARTINI, Vitruvianischer Mann, Zeichnung zu VITRUV, De Architectura III.1, um 1475, Florenz, Biblioteca Laurenziana, Codex Ashburnhamianus, Nr. 361, fol. 5'. (B) LEONARDO DA VINCI, Vitruvianischer Mann, Zeichnung zu VITRUV, De Architectura III.1, um 1492, Feder in Braun, aquarelliert, auf Papier, Venedig, Galleria dell' Accademia.

Auch LEONARDO zeigt keinesfalls, wie es durchweg behauptet wird, das Ideal des Gleichklangs von kosmischer und menschlicher Proportion, sondern die Unmöglichkeit, dieses umzusetzen (Abb. 7B). Nach einer Reihe von Studien hat er erkannt, dass VITRUVS Proportionsfigur als Quadratur des Kreises nicht zu realisieren ist.

Eine Symmetriebrechung besteht bereits darin, dass er die mittleren Füße nicht frontal ausrichtet, sondern zur Seite ausstellt, um damit den Unterkörper leicht zu drehen. Um einen Kreis zu bilden, winkelt er die Arme seines Vitruv-Mannes dann leicht nach oben an und stellt die Beine entsprechend aus. Das Quadrat dagegen wird durch gerade Beine und waagrecht ausgestreckte Arme gebildet. Der Mensch ist in Kreis und Quadrat eingeschrieben, aber der Kern von VITRUVS Aussage ist diskreditiert, denn der Mensch hat nun zwei Zentren: während der Nabel den Mittelpunkt des Kreises bildet, sitzt das Geschlecht im Zentrum des Quadrats. Die Zeichnung bedeutet keine Illustration des Vitruv-Mannes, wie dies immer behauptet wird, sondern die Widerlegung seiner zu Grunde liegenden Regel. Vielleicht blickt der alte, mit einem jugendlichen Körper ausgestattete Mann aus diesem Grund so grimmig.

Albrecht DÜRER hat einen ähnlichen Weg auf eigene Weise verfolgt.¹⁹ Auf seiner Italienreise von 1505 bis 1507 hat er sich intensiv mit Proportionsstudien befasst, und so wahr-

19 Seine Proportionsstudien wurden als normbesessene Gliederpuppendarstellungen missverstanden; so hat MICHELANGELO über sie geurteilt, die Figuren wirkten „steif wie die Pfähle“ (MICHELANGELO, nach CONDIVI [1874] 1970, S. 81).

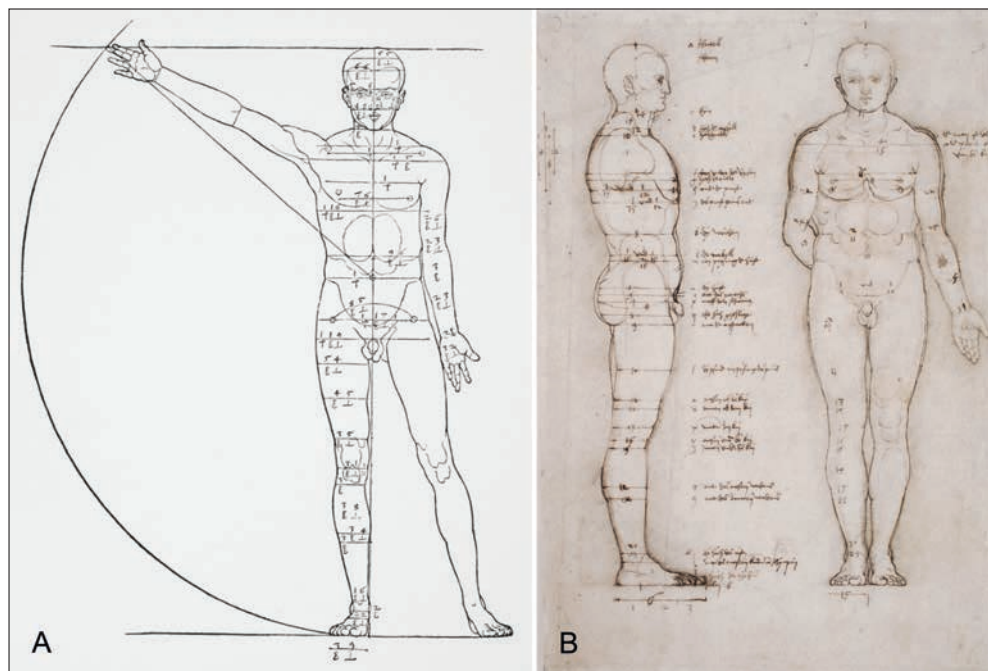


Abb. 8 (A) Albrecht DÜRER, Menschliche Proportionsstudie, Holzschnitt, in DÜRER 1591, Bd. 2, Fol. LV verso. (B) Albrecht DÜRER, Männliche Proportionsstudie in Profil- und Vorderansicht, Zeichnung, 1531, Feder in Braun, Wien, Graphische Sammlung Albertina.

scheinlich auch mit LEONARDOS Akademieblatt.²⁰ Nach Deutschland zurückgekehrt, vermaß DÜRER zwei- bis dreihundert Personen beiderlei Geschlechtes (Abb. 8A), und unter der Hand zersprang ihm ein normativer Begriff von proportionsbedingter Schönheit. Sein Ausspruch: „was aber die Schönheit sei, das weiß ich nicht“,²¹ war der Auftakt zu einer Vielfalt unterschiedlicher, in sich mehr oder weniger stimmiger Möglichkeiten zur Analyse der menschlichen Verhältnisse (Abb. 8B). Wie auch LEONARDO hat DÜRER nicht die Formel der idealen Proportion propagiert, sondern die Unmöglichkeit ihrer Fixierung ausgebreitet.²²

Auch MICHELANGELOS *David* zeigt den Unterschied gegenüber dem Speerträger (Abb. 9A). Der Körper ruht wie bei diesem auf dem rechten Standbein, und die erhobene Linke führt in Richtung Kopf, der seinen gespannten Blick auf einen Zielpunkt auf gleicher Höhe richtet. Zumindest in der Frontalsicht wirkt er unproportioniert, als würde ihn ein zu kleiner Leib tragen.

Dieses Missverhältnis vor Augen, konnte die Figur insgesamt kritisiert werden; einmal auf der Suche nach der Verletzung innerer Stimmigkeit, wurden die Arme als zu lang, die

20 Im Oktober schreibt er nach Deutschland, er wolle der „heimlichen Perspectiva“ wegen nach Bologna gehen – dies kann sich wohl nur auf Luca PACIOLI, den Mathematiker und Freund LEONARDOS, beziehen, der in seiner *Divina Proportione*, die im Jahr 1509 mit Illustrationen LEONARDOS erschien, den überlieferten Proportionskanones nachgegangen war (FREDEL 1992, S. 21).

21 „Waß aber dy schonheit sey, daz weis jch nit.“ (DÜRER 1966, Bd. 2, S. 100, Z. 53 f.)

22 Hierzu und zum Folgenden ZÖLLNER 1987, S. 88–103.

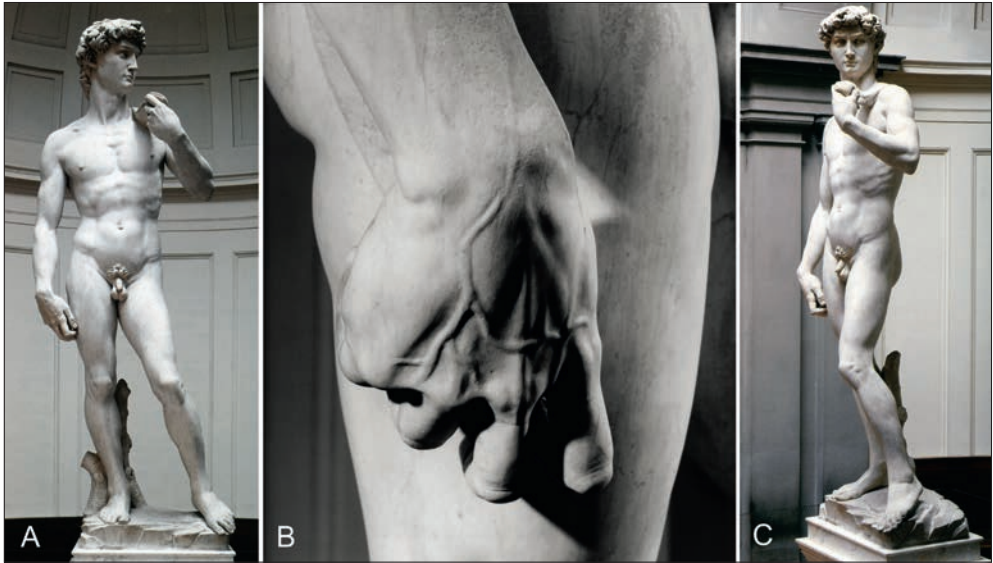


Abb. 9 (A) MICHELANGELO, *David*, Marmorskulptur, 1503, Florenz, Accademia di Belle Arti. (B) Rechte Hand des *David*. (C) *David* von halbrechts.

rechte Hand als zu groß und das Standbein als zu klein empfunden.²³ Diese Kritik benennt ein richtiges Phänomen, kennt aber nicht den Grund. MICHELANGELO wollte seine antiken Anregungsquellen, den Apoll vom Belvedere und den Rossebändiger vom Quirinalplatz, nicht erreichen, sondern durch Störung übertreffen. MICHELANGELOS *David* widersetzt sich der Norm der antiken Proportionslehre. Dieser Effekt war zwar auch dadurch bewirkt, dass MICHELANGELO einen verschlagenen Block hat retten müssen, aber es ist bei ihm Prinzip.

In der rechten Hand ist die Qualität der gesamten Figur konzentriert (Abb. 9B). Sie wirkt entspannt, fast lässig, offenbart mit ihrer Struktur aus kräftigen Adern und nervigen Sehnen und Muskeln aber die Möglichkeit der Aktion und des Zugriffs. Diese Hand ist ebenso zu groß geraten wie der übermächtige Kopf. Die Figur steht fest auf dem Standbein, aber das suchende Vorsetzen des linken Fußes wirkt, als würde sie im nächsten Moment den Standpunkt verlagern wollen; dem festen Stand ist daher auch etwas Federndes, Lauerndes eigen, das der lässigen Geschmeidigkeit des Körpers etwas Bedrohliches mitgibt. Dieses Moment der potentiellen Aktion wirkt besonders stark in der Sicht von halbrechts, von wo die Hand überdimensional nach vorn kommt (Abb. 9C).

Die flächige Entfaltung des Körpers ist hier zurückgebunden in eine schmale Achse, die in und an sich die Zentren von Entspannung und Energie, von Abwehr und potentiell

23 „Jacob Burckhardt hat in der ihm eigenen Rhetorik im Cicerone die Probleme der Figur sarkastisch charakterisiert. Michelangelo habe für das Modell eines jungen Mannes das eines Knaben gewählt, und dadurch seien ihm alle Proportionen durcheinander geraten. Man könne dies aber wiedergutmachen, indem er ein umgekehrtes Fernrohr auf ihn richte: „Durch ein Verkleinerungsglas gesehen, gewinnt der David ungemein an Schönheit und Leben, allerdings mit Ausnahme des Kopfes.“ (Zitiert nach VERSPOHL 1981, S. 206.)

Angriff konzentriert.²⁴ Auf engstem Raum sind die inneren Extreme der Figur hier verstärkt und konzentriert. Die bezwingende Lebendigkeit dieser Statue resultiert aus der Verbindung ihrer kanonisierenden Vollendung und den Brüchen ihrer Disproportionalität.

5. Symmetrie und Asymmetrie in der Renaissance

Es könnte argumentiert werden, dass dieses Prinzip des verlebendigen Bruches des Ebenmaßes vorwiegend für die figurative Kunst gelte, wohingegen die Architektur grundlegend oder fast ausschließlich auf Symmetrie angelegt sei. Die Symmetrie besitzt in der Geschichte der Architektur in der Tat einen unabdingbaren Stellenwert, aber das Prinzip der verlebendigten Störung wirkt hier nicht minder. Als ein schulbildendes Beispiel kann der *Palazzo Farnese* in Rom gelten (Abb. 10A). Seit 1516 von dem Architekten Antonio DA SANGALLO für den späteren Papst PAUL III. errichtet, zeigt das Bauwerk ein puristisches, rigoros an den klassischen Regeln orientiertes, schnörkelloses Architekturkonzept.²⁵ Die Fassade besticht in ihrer spartanisch knappen Anwendung weniger Module, wie dem Kreissegment- und Dreiecksgiebel, die der Architekt von den Ädikulen des Pantheons abgeleitet hat. Diese Gestaltung ist makellos spiegelsymmetrisch, und sie ist im Prinzip nach oben und zu den Seiten unbegrenzt.

Umso spektakulärer war der Akt, dass PAUL III. Mitte der 1540er Jahre die Fertigstellung des Palastes MICHELANGELO übertrug. Durch zunächst kaum auffallende Eingriffe veränderte MICHELANGELO den Charakter der Fassade. Er behielt SANGALLOS mittleres Fenster zwar bei, bekrönte es aber mit einem riesigen Farnese-Wappen, das bis in die Piedestalzone des Obergeschosses eingreift (Abb. 10B). Er stockt die Wand über den Fenstern zusätzlich auf, um auf diese Weise ein gewaltiges, dreieinhalb Meter hohes und weit ausladendes Kranzgesims vorzubereiten, das dem Bauwerk Flügel zu verleihen scheint. Gegen diese



Abb. 10 (A) Antonio DA SANGALLO und MICHELANGELO, Palazzo Farnese, 1514–1549. (B) Mitteltrakt des Palazzo Farnese.

24 VERSPOHL 1981, S. 210 f.

25 FROMMEL 1981. Vgl. BREDEKAMP 1995, FERRETTI 2009.

Abkehr von der klassischen Ordnung hetzten die Sangallo-Anhänger, das Gebälk würde das Hauptgesims nicht halten können, und tatsächlich mussten die Substruktionen des Palastes verstärkt werden, um das Gewicht dieser gewaltigen Stein-Dachmasse abfangen zu können.

Mit wenigen Eingriffen verwandelt MICHELANGELO das mathematisch ausgeklügelte Bauwerk in eine vertikal akzentuierte, im Abschluss erschwerte und fliegend verbreiterte plastische Masse. Der Architekt agiert als Bildhauer. Durch eine Überbetonung des Obergeschosses kehrt MICHELANGELO das Verhältnis von Last und Stütze um, und hierdurch erzeugt er eine innere Spannung, die gemäß der Vertikalachse keinen Symmetriebruch bedeutet, wohl aber in der Horizontalen. Das Bauwerk ist durch die Erhöhung und Auskragung des Kranzgesimses nach oben und zu den Seiten hin gedehnt und gezogen, und damit wird der präcartesianisch klaren Raster- und Proportionsordnung SANGALLOS durch MICHELANGELOS Eingriffe Bewegung und damit Leben vermittelt.

6. Symmetrie und Störung in der Moderne

Die symmetrische Bauweise, wie sie von SANGALLO perfektioniert wurde, ist durch die Einführung des Millimeterpapiers im Jahr 1803 optimiert worden.²⁶ Von diesem Moment an war die Möglichkeit gegeben, schon im Modell die Spiegelsymmetrie bis in kleinste Details vorzubereiten. Jean-Nicholas-Louis DURAND hat an der Pariser *École Polytechnique* unter anderem aus dem Quadrat eine Fülle von Motiven entwickelt, die durch vollendete Symmetrie ausgezeichnet sind (Abb. 11).

In dieser Tradition stehen Architekten wie Oswald Matthias UNGERS, die das Quadrat zur absoluten Zelle ihrer Bauwerke gemacht haben, wie die Hamburger Kunsthalle des Jahres 1997 (Abb. 12). Kaabahaft überragt sie ihre Umgebung. Ähnlich wie MICHELANGELO den Bau nach oben streckte (Abb. 10), hat UNGERS ihn durch eine Vertikalsymmetrie gestaltet, die in der Horizontalen aufgelöst wird, und dies nicht nur durch die Fensterlosigkeit der oberen Seitenflächen, sondern auch durch ein Halbfenster in den Zentralachsen. Seinem eigenen Verständnis zufolge führt das Zusammenspiel von Spiegelsymmetrie und Symmetriebruch auch bei ihm zu jener Metaphysik, die all seinen Baukörpern die Präsenz einer lebendigen Wirklichkeit vermittelt.

Dies gilt schließlich auch für die geometrisch angelegten Malereien von Barnett NEWMAN (Abb. 13) und Mark ROTHKO (Abb. 14). Sie vitalisieren sich selbst gleichsam nach innen und nach vorn: sich der flächigen Fixierung widersetzend, springen sie eigenmächtig in die Tiefe nach hinten in den Raum oder nach vorn zum Betrachter, und hierin erzeugen sie einen Symmetriebruch der Zweidimensionalität.²⁷ Dieser kann immer wieder heftigste Reaktionen erzeugen.

Mehrfach sind Barnett NEWMANS Bilder attackiert worden (Abb. 13B),²⁸ und vor keinen Werken brechen Betrachter willenlos so häufig in Tränen aus wie vor den Gemälden ROTHKOS.²⁹ Es sind Beispiele von gleichsam metaphysischen Symmetriebrüchen, die sich jenseits der geometrisch-symmetrischen Formen selbst abspielen.

26 SCHRAMLE 2015, S. 45 f.

27 LAUSCHKE 2014.

28 GAMBONI 2010. Vgl. MATYSSEK 2012.

29 ELKINS 2001.

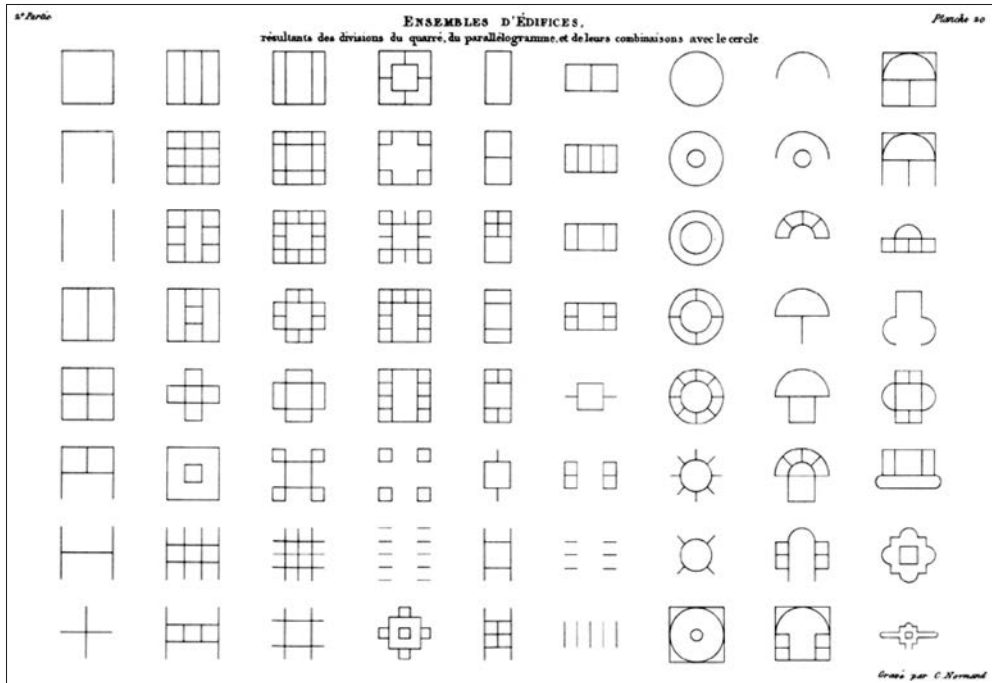


Abb. 11 Jean-Nicolas-Louis DURAND, Muster der Geometrisierung, in DURAND 1802



Abb. 12 Oswald Matthias UNGERS, Hamburger Kunsthalle, 1997

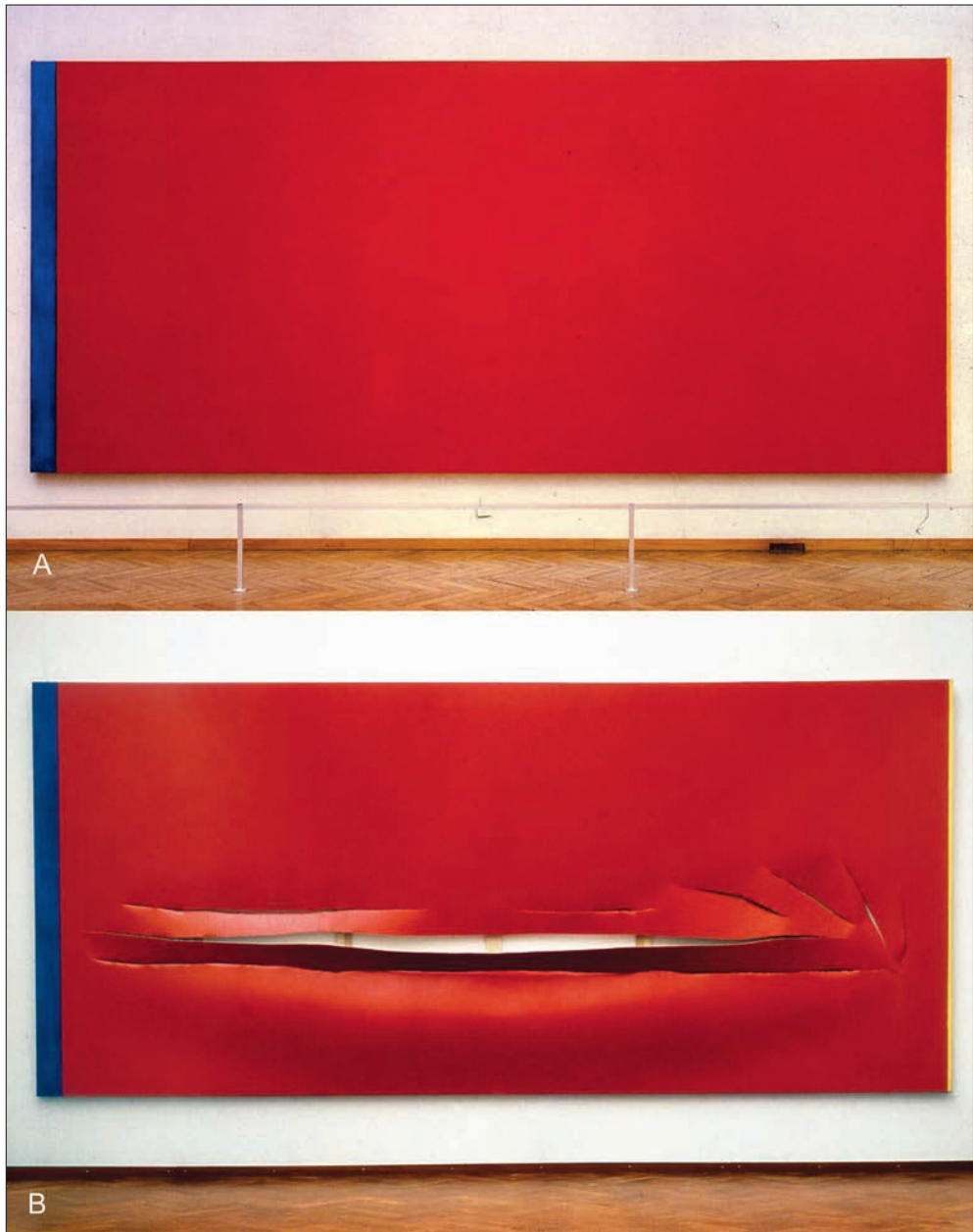


Abb. 13 (A) Barnett NEWMAN, *Who's Afraid of Red, Yellow and Blue III*, Öl auf Leinwand, 1967–1968, Amsterdam, Stedelijk Museum (Courtesy Stedelijk Museum). (B) nach dem Anschlag von 1986 mit Schnittspuren.



Abb. 14 Mark ROTHKO, Blau und Grau, Öl auf Leinwand, 1962, Basel, Fondation Beyeler

7. Lukrez' *Clinamen*

In meinem letzten Beispiel verdichtet sich für meinen Begriff, was für die bildende Kunst allgemein zu rekonstruieren ist. Es handelt sich um den Garten von Herrenhausen, der eine für unser Thema zentrale Sonderform aufweist (Abb. 15).³⁰

Jener Gottfried Wilhelm LEIBNIZ, der seit seiner Zeit im Paris der 1670er Jahre das Prinzip der Überraschung als ein entscheidendes Moment der denkanregenden Bildung

³⁰ Hierzu und zum Folgenden BREDEKAMP 2012.

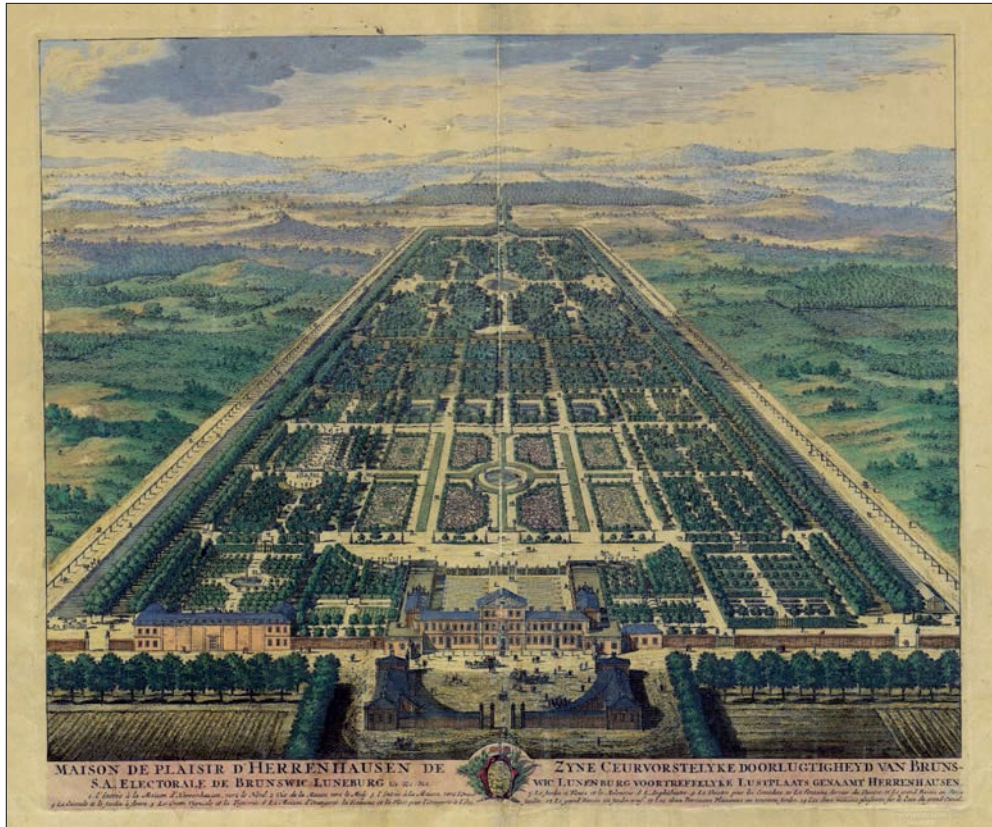


Abb. 15 „Maison de Plaisir d’Herrenhausen de S. A. Electorale de Brunswic Luneburg“, Vogelsicht auf den Großen Garten aus nördlicher Richtung, Kolorierter Kupferstich, um 1708, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Bibliothek – Niedersächsische Landesbibliothek, XIX, C, 178 b

gewertet hat, dürfte die Absonderlichkeit begrüßt haben, dass die Winkel des Gartens von Herrenhausen um $2,8^\circ$ vom lotrechten Abgang der Achsen vom Schlossgebäude abweichen (Abb. 16).³¹ LEIBNIZ hat diesen Effekt vermutlich nicht veranlasst, aber er hat sich in diesem Garten über Jahrzehnte planend und reflektierend bewegt.

Die Idee dieser Abweichung (Abb. 16) könnte durch jenes *clinamen* des römischen Epikureers LUKREZ angeregt worden sein, der eine unablässige Geltungsgeschichte bis in die Quantenphysik erfahren hat.³² Als „winzige Beugung“ umfasst das *clinamen* den unregelmäßigen Fall der Atome und damit das Prinzip allen Lebens und aller Schöpfung, das sich aus dem Eigenwillen und der Abweichung ergibt.³³ Ohne dass die Körper leicht von der Bahn abspringen, so LUKREZ, „hätte nichts die Natur je schaffend vollendet“.³⁴ Die

31 PREISSEL 2003.

32 SCHMIDT 2007. Vgl. SERRES 1977, S. 214–237.

33 LUKREZ 1973, II, 292 (S. 106/107).

34 „ita nil umquam natura creasset“ (LUKREZ 1973, II, 224 [S. 100/101]).

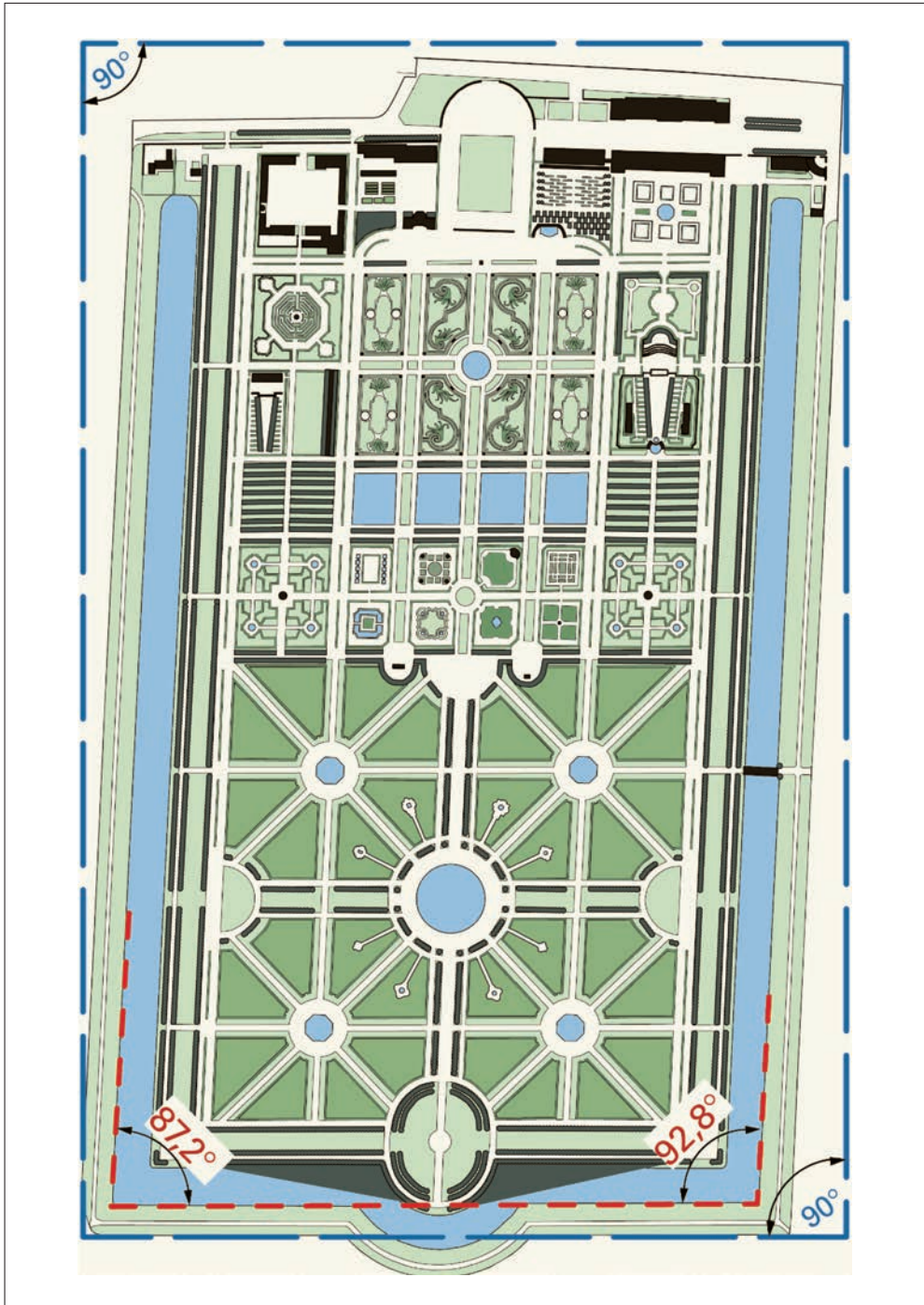


Abb. 16 Rekonstruktion der Winkelabweichung des Gartens von Herrenhausen durch Hans Georg PREISSEL 2003

„winzige Abweichung“ geschieht im Garten von Herrenhausen in großem Stil, und mit diesem Doppelsinn von Symmetrie und Störung könnte hier der Grundansatz des LUKREZ, dessen *De natura rerum* als gedichtete Naturphilosophie auch eine umfassende Kunsttheorie darstellt, gefasst sein. LUKREZ' Naturphilosophie ist auch eine überragende Kunsttheorie des Zusammenspiels von Symmetrie und Asymmetrie im kosmischen Maßstab.

An diesen Garten (Abb. 17) und an LUKREZ' Theorie der kosmischen Abweichung wurde ich erinnert, als vor einigen Jahren die diagrammatischen Karten der weitest entfernten Zonen des Kosmos durch die Presse gingen, die neben der Bestätigung des Symmetrie-Modells auch Anomalien aufweisen. Sie zeigen die Muster jener Materieverteilung, die dem Modell des Urknalls zufolge nur wenige 100 000 Jahre nach diesem hypostasiierten Ereignis verteilt gewesen sein sollen (Abb. 18).

Das Modell, so lauten die Berichte, sei weitgehend bestätigt worden, bis auf eine Reihe von Anomalien, die sich bislang nicht erklären ließen. In der Fläche des Pointilismus zeigen sich immer wieder Kulminationscluster, die nicht recht zu begründen sind. Man merkt den Verlautbarungen an, dass es diese Abweichungen sind, die vorsichtige Irritationen hervorgerufen haben.³⁵

Für LUKREZ wäre diese Existenz von Ausnahmen nicht etwa der Grund einer *Irritation*, sondern einer *Beruhigung*. Denn in ihr hätte er seine Theorie bestätigt gefunden, dass die Asymmetrie die Grundbedingung für jede Schöpfung, jedes Leben, und jedes Kunstwerk darstellt.³⁶ Symmetrie ohne Störung ihrer selbst ist LUKREZ zufolge noch nicht einmal als Gedankenkonstrukt möglich.

Hierin ist der Kern dessen gefasst, was sich meines Erachtens mit Blick auf die bildende Kunst sagen lässt, und darin ist dieses Diagramm des Kosmos für mich auch eines der Kunstwerke unserer Zeit. Als Yoichiro NAMBU und seine Mitstreiter im Jahr 2008 den Nobelpreis für Physik erhielten, formulierte die Jury: „Wir sind alle Kinder gebrochener Symmetrie.“ Dieser Kern der Lehre des LUKREZ ist ein Grundprinzip der bildenden Kunst. Sie setzt unabdingbar auf die Spannung von Symmetrie und Asymmetrie.

Ohne Symmetrie entsteht keine Formsemantik, aber alle strikt spiegel- und proportions-symmetrische Gestaltung bleibt leer.³⁷ Der Begriff der Symmetrie ist im Verlauf von Jahrtausenden von der Bildenden Kunst und der Musik, die nicht mein Thema war, geprägt und in so gut wie allen Lebensbereichen entwickelt worden. Der von ihm aufgestellte Begriffsrahmen von der Spiegel- bis zur Proportionsasymmetrie und deren Assoziationsfähigkeit zwischen dem Kleinsten und dem Entferntesten prägt, das brauche ich auf dieser Versammlung nicht zu wiederholen, auch den naturwissenschaftlichen Erkenntnisanspruch bis heute.

Die Besonderheit der Bildenden Kunst liegt allerdings darin, dass sie die Störung systematisch mit einbezogen hat, und mit ihr sind die Begriffe der Lebendigkeit verbunden. Um die Kunst zum lebendigen Gegenüber werden zu lassen, bildet die Abweichung die Voraussetzung. Symmetrie und Symmetriebruch sind entscheidende, sich

35 ADE et al. 2013, S. 25, Fig. 14.

36 Wenn die Atome, die durchweg in gleichen Bahnen parallel fallen, *ad infinitum* in dieser Struktur verharren, existiert im Prinzip Nichts, denn die gleichförmige Bewegung ist ohne Widerstand, ohne Raum, ohne Zeit. Erst das *clinamen*, die minutiöse Abweichung, erzeugt jene Störung, die Turbulenzen, Wirbel, Verdichtungen und mit der hieraus entstehenden Spannung eine endlose Form von Dynamiken bewirkt, die mit der Prozessualität auch alles Leben bedingt. LUKREZ hätte nicht etwa in der Gleichförmigkeit der Ausdehnung, sondern in der Störung einzelner, weniger Bereiche die Begründung des Kosmos erkannt.

37 RENTSCHLER et al. 1999.



Abb. 17 Heckenausrichtung im Großen Garten von Herrenhausen, entnommen aus PREISSEL 2003, S. 7

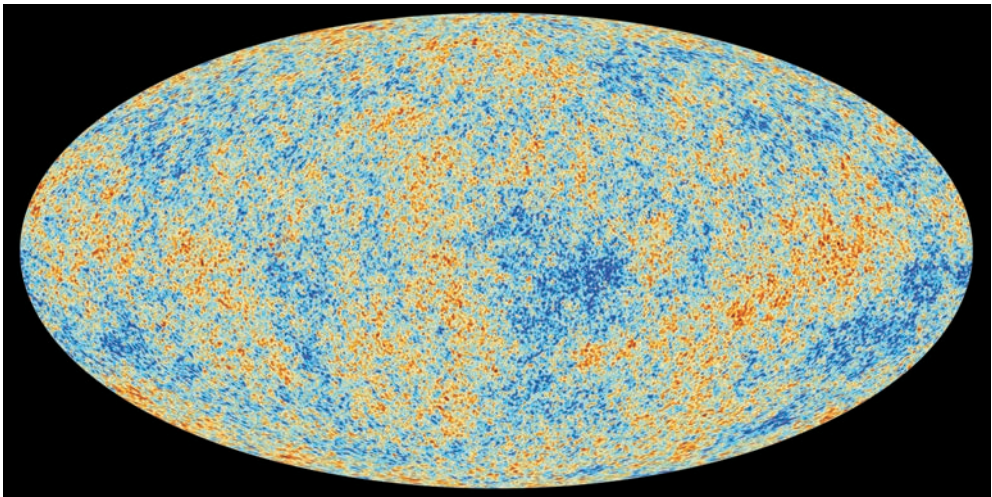


Abb. 18 Europäische Raumsonde Planck (NASA), The SMICA CMB Map, 2013, entnommen aus ADE 2013, S. 25, Fig. 14

wechselseitig bedingende und zusammenwirkende Grundbestimmungen jeder Kunst, die dem Betrachter als lebendiges Gegenüber entgegentritt. Die Störung vermittelt dem Werk jene *energeia*, die als Pseudolebendigkeit in ihren Bann zieht. Und dies begründet wiederum ein asymmetrisches Beziehungsgeflecht zwischen Bild und Betrachter, das aber ein eigenes Thema wäre.

Literatur

- ADE, P. A. R., et al.: Planck 2013 results. Overview of products and scientific results. *Astronomy Astrophysics*. Manuscript Nr. PlanckMission 2013, 22. 03. 2013, S. 25 (2013)
- ANTHES, R.: Die Büste der Königin Nofretete. Berlin: Gebrüder Mann 1954
- ASSMANN, J.: Flachbildkunst des Neuen Reiches. In: VANDERSLEYEN, C.: Das Alte Ägypten. (= Propyläen Kunstgeschichte in achtzehn Bänden, Bd. 17), S. 304–317. Berlin: Propyläen-Verlag 1985
- BABICH, B.: Die Naturgeschichte der griechischen Bronze im Spiegel des Lebens. Betrachtungen über Heideggers ästhetische Phänomenologie und Nietzsches agonale Politik. In: *Articles and Chapters in Academic Book Collections*, Paper 1, 2008 http://fordham.bepress.com/phil_babich/1
- BECK, H., BOL, P. C., und BÜCKING, M. (Hrsg.): Ägypten – Griechenland – Rom. Abwehr und Berührung, Ausstellungskatalog. Frankfurt (Main): Liebighaus u. a. 2005
- BERGER, E.: Zum Kanon des Polyklet. In: BECK, H., BOL, P. C., und BÜCKING, M. (Hrsg.): Polyklet. Der Bildhauer der griechischen Klassik. Ausstellungskatalog Frankfurt (Main). S. 156–184. Mainz: von Zabern 1990
- BÖHME, G.: Symmetrie: Ein Anfang mit Platon. In: KRIMMEL, B. (Hrsg.): Symmetrie in Kunst, Natur und Wissenschaft. Ausstellungskatalog. Bd. 1 – Texte. S. 9–16. Darmstadt 1986
- BOL, P. C. (Hrsg.): Fremdheit – Eigenheit. Ägypten, Griechenland und Rom. Austausch und Verständnis. Symposium des Liebighauses Frankfurt a. M., vom 28.–30. November 2002 und 16.–19. Januar 2003. (= Städel-Jahrbuch, N. F. Bd. 19) 2004a
- BOL, P. C. (Hrsg.): Zur Figur selbst: Die Geschichte der antiken Bildhauerkunst. Bd. II. Mainz: von Zabern 2004b
- BORBEIN, A. H.: Das alte Griechenland. München: Bertelsmann 1995
- BREDEKAMP, H.: Michelangelos Modellkritik. In: EVERS, B. (Hrsg.): Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo. Ausstellungskatalog Berlin. S. 116–123. München: Prestel 1995
- BREDEKAMP, H.: Leibniz und die Revolution der Gartenkunst. Herrenhausen, Versailles und die Philosophie der Blätter. Berlin: Wagenbach 2012
- BREDEKAMP, H.: Der Keil der Nofretete, oder: 8 mm entscheiden die Welt. In: DE GIORGIO, M., HOFFMANN, A., und SUTHOR, N. (Hrsg.): Synergies in Visual Culture. Bildkulturen im Dialog. Festschrift für Gerhard WOLF. S. 579–590. München u. a.: Fink 2013
- BREDEKAMP, H.: Das Ideal der Proportion und die Kontingenz des Lebens. In: Die Verfassung als Aufgabe von Wissenschaft, Praxis und Öffentlichkeit. Freundesgabe für Bernhard SCHLINK zum 70. Geburtstag. S. 311–321. Heidelberg: C. F. Müller 2014
- CONDIVI, A.: Das Leben des Michelangelo Buonarroti. Übersetzung R. VALDEK. [Nachdruck der Ausgabe 1874] Osnabrück: Zeller 1970
- DIELS, H.: Die Fragmente der Vorsokratiker. Griechisch und Deutsch. Bd. 1–3. 4. Aufl. Berlin: Weidmann 1922
- DURAND, J.-N.-L.: Leitfaden des Architekturunterrichts. 1802
- DÜRER, A.: Vier Bücher von menschlicher Proportion. Nürnberg 1591
- DÜRER, A.: Van Schonheit. In: DÜRER, A.: Schriftlicher Nachlass. Herausgegeben von H. RUPPRICH. Bd. 2. Berlin 1966
- ELKINS, J.: Pictures and Tears. A History of People Who have Cried in Front of Paintings. New York, London: Routledge 2001
- FARMER, W. I.: Die Bewahrer des Erbes. Das Schicksal deutscher Kulturgüter am Ende des Zweiten Weltkrieges. Überarbeitet und mit einem Vorwort versehen von K. GOLDMANN (Übersetzung: H. KUNZE). Berlin: de Gruyter 2002
- FERRETTI, E.: Palazzo Farnese. In: MUSSOLIN, M., und ALTAVISTA, C.: Michelangelo. Architetto a Roma. S. 158–167. Mailand 2009
- FREDEL, J.: Ideale Maße und Proportion. In: BARTA, I., und GEISMAR, C. (Hrsg.): Die Beredsamkeit des Leibes. Zur Körpersprache in der Kunst. S. 11–42. Salzburg, Wien: Residenz-Verlag 1992
- FROMMEL, C. L.: Sangallo et Michel-Ange (1513–1550). In: Le Palais Farnèse. Bd. I/1, S. 127–174. Rom 1981
- GAMBONI, D.: The Destruction of Art: Iconoclasm and Vandalism since the French Revolution. London: Reaktion 1997
- HINZ, B.: Aphrodite. Geschichte einer abendländischen Passion. München, Wien: Hanser 1998
- Historisches Wörterbuch der Philosophie*: Historisches Wörterbuch der Philosophie. Bd. 10. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1998

- KAISER, N.: Schriftquellen zu Polyklet. In: Polyklet. Der Bildhauer der griechischen Klassik. Ausstellungskatalog Frankfurt (Main). S. 48–78. Mainz: von Zabern 1990
- KRAUSS, R.: 1913–1988: 75 Jahre Büste der NofretEte/Nefret-iti in Berlin (Teil 1). Jahrbuch Preußischer Kulturbesitz Bd. *XXIV*, S. 67–124 (1988)
- KRAUSS, R.: 1913–1988: 75 Jahre Büste der NofretEte/Nefret-iti in Berlin (Teil 2). Jahrbuch Preußischer Kulturbesitz Bd. *XXVIII*, S. 123–156 (1991)
- LAUSCHKE, M.: Bodily resonance. Formative processes in aesthetic experience and developmental psychology. In: YOUNG, C. (Ed.): *The Body in Relationship. Self, Other, Society*; pp. 175–196. Stow/Galashiels (UK) 2014
- LUCIAN: In Eight Volumes. Herausgeber und Übersetzer: M. D. MACLEOD. Bd. *VIII*. Cambridge (MA), London: Harvard University Press 1979
- LUKIAN: Ein Gespräch über die Liebe. Übersetzung: H. LICHT. München: Müller 1920
- LUKREZ: *De rerum natura. Welt aus Atomen*. Übersetzung: K. BÜCHNER. Stuttgart: Reclam 1973
- MATYSSEK, A.: Überleben und Restaurierung. Barnett Newmans Who's afraid of Red, Yellow, and Blue III und Cathedra. (= Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint 398) Berlin 2010
- MORGAN, L.: Enlivening the body: Color and stone statues in old kingdom Egypt. Source. Notes in the History of Art Bd. *XXX*, Nr. 3, S. 4–11 (2011)
- PACIOLI, L.: *Divina Proportione*. 1509
- PREISSEL, H. G.: Über die Wahrnehmung des Unbewussten im Großen Garten. War Leibniz der Urheber einer Winkelverschiebung? *Aus den Herrenhäuser Gärten* 4, 4–8 (2003)
- RENTSCHLER, I., JÜTTNER, M., UNRICKER, A., and LANDIS, T.: Innate and learned components of human visual preference. *Curr. Biol.* 9/13, 665–671 (1999)
- SAVOY, B.: Eine deutsch-französische Affäre 1912–1931. Köln: Böhlau 2011
- SCHMIDT, E. A.: *Clinamen. Eine Studie zum dynamischen Atomismus der Antike*. Heidelberg: Winter 2007
- SCHRAMLE, S.: Das autonome Quadrat: Zum Gebrauch von Millimeterpapier in der Architektur Oswald Mathias Ungers. In: HILLNHÜTTER, S. (Hrsg.): *Bildwelten des Wissens. Bd. 11: Planbilder. Medien der Architekturgestaltung*. S. 44–52. Berlin: de Gruyter 2015
- SERRES, M.: *La Naissance de la Physique dans le Texte de Lucrèce. Fleuves et Turbulences*. Paris: Éditions de Minuit 1977
- SETTIS, S.: *Serial Classics [sc]. Multiplying Art in Greece and Rome*. Ausstellungskatalog. Mailand 2015
- VERSPOHL, F.-J.: Michelangelo und Machiavelli. Der David auf der Piazza della Signoria in Florenz. *Städel Jahrbuch N. F.* Bd. 8, S. 204–246 (1981)
- VITRUV: *Vitruvii De Architectura Libri Decem/Vitruv, Zehn Bücher über Architektur*. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von C. FENSTERBUSCH. 5. Aufl. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1991
- WITTKOWER, R.: *Grundlagen der Architektur im Zeitalter des Humanismus*. München: Beck 1969
- ZÖLLNER, F.: *Vitruvs Proportionsfigur. Quellenkritische Studien zur Kunstliteratur im 15. und 16. Jahrhundert*. Worms: Werner 1987

Prof. Dr. Horst BREDEKAMP
Humboldt-Universität zu Berlin
Kunstgeschichtliches Seminar
Dorotheenstraße 28
10099 Berlin
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 30 209366207
E-Mail: horst.bredenkamp@rz.hu-berlin.de

Neuronale Kontrolle der Fortbewegung – Erzeugung adaptiver Bewegungsmuster auf Basis struktureller Symmetrien

Ansgar BÜSCHGES (Köln)



Zusammenfassung

Die Kontrolle der Motorik gehört bei Tieren zu den Hauptaufgaben des Nervensystems. Wenn sich Tiere fortbewegen, sei es schwimmend, kriechend, springend, fliegend, hüpfend, laufend oder fliegend, tun sie dies mit einem Körper und Fortbewegungsapparat, der häufig symmetrisch ist. Symmetrien des Bewegungssystems von Tieren existieren in allen Formen, d.h. in Spiegel- und Radiärform, und sind das Resultat von ontogenetisch bestimmten Restriktionen. Ein spiegelsymmetrischer Körperbau kann z.B. die Erzeugung der grundlegenden Bewegungen für Hüpfen auf zwei Beinen, Kriechen von Würmern oder Fliegen erleichtern.

Allerdings sind komplexere Fortbewegungsformen nur dann möglich, wenn der symmetrische Bauplan eines Tierkörpers asymmetrisch eingesetzt werden kann, d.h. wenn räumliche Symmetrie zeitlich und vorübergehend gebrochen wird. Im Falle terrestrischer Fortbewegung, wie dem Laufen, erlauben zeitliche Asymmetrien die Erzeugung eines großen und flexiblen Repertoires adaptiver Bewegungsmuster der Beine. Diese ermöglichen Änderungen der Laufgeschwindigkeit und -richtung, die Erzeugung unterschiedlicher Gangarten und Koordinationsmuster, Anpassungen an Belastung oder Verletzung und schlussendlich ein sicheres Fortkommen in unvorhersehbarem Terrain.

Ich werde in dem Vortrag drei Aspekte der Symmetrie in der Biologie mit Bezug auf die Fortbewegung von Tieren ansprechen: Symmetrien des Fortbewegungsapparates, Symmetrien der Topologie neuronaler Netzwerke, die die motorische Aktivität erzeugen, und schlussendlich, Symmetrie in der neuronalen Kontrolle von Fortbewegung. Bei der Besprechung der Rolle struktureller Symmetrien im Bewegungssystem von Tieren werde ich mich insbesondere der Erzeugung der terrestrischen Fortbewegung des Laufens mit einer verschiedenen großen Anzahl an Beinen widmen, für die unterschiedliche Gangarten im Lichte der strukturellen Symmetrie der Organismen zu betrachten sind. Anschließend werde ich die Konsequenzen der symmetrischen topologischen Struktur der neuronalen Netzwerke im Zentralnervensystem für die neuronale Kontrolle von Schreitbewegungen bei Tieren besprechen. Der letzte Teil meines Vortrags wird sich der Vorstellung des Fehlens von Symmetrie auf der Ebene der neuronalen Kontrolle einzelner Extremitäten bei der Erzeugung rhythmisch-zyklischer Fortbewegungsmuster widmen.

Abstract

Motor behavior is a prime function of the nervous system in animals. When animals move, be it by swimming, crawling, jumping, hopping, walking, or flying, they rely on symmetrical body plans and locomotor apparatuses for the generation of propulsion. Symmetries of organisms and locomotor organs come in all forms, i. e. as mirror or radial symmetries which result from ontogenetic developmental constraints. A mirror-symmetric body plan can already facilitate the generation of basic locomotor patterns, such as two-legged hopping, crawling in legless worms, or flying in birds.

More complex locomotor patterns, however, are only possible if the symmetric layout of an animal's body is actuated in an asymmetric pattern, i. e. when the spatial symmetry is complemented by a temporal and transient break in symmetry. In the case of legged locomotion, for instance, these temporal asymmetries allow for the generation of a large and flexible repertoire of all kinds of behavioral adaptations. The latter comprise changes in speed and direction, the use of different gaits and coordination patterns, adaptations to increased load or injuries, and safe navigation in unpredictable terrain.

In my talk I will touch upon three aspects of symmetry in biology: symmetry in the morphology of the locomotor apparatus, symmetry in the topology of neural networks responsible for motor output, and, finally, symmetry in organization and control of the locomotor behavior. First, I will discuss the role structural symmetries play for the movements of the locomotor apparatus during the generation of locomotion. In particular, I will focus on the generation of terrestrial locomotion with two, four, six, eight, or more legs, in which the use of different coordination patterns has to be seen in the light of existing structural symmetries. Next, I will shed light on the consequences of symmetry in the topology of neural networks in the central nervous system that generate the motor output driving the locomotor apparatus. The last part of the talk will focus on the control of the legs, and will emphasize the lack of symmetry in the neural control of their cyclic motor behavior.

1. Einleitung

Fortbewegung ist verhaltensbiologisch betrachtet ein sogenanntes Mehrzweckverhalten: Tiere setzen Fortbewegung als Element diverser komplexerer Verhalten ein, so z. B. bei Futtersuche, jahreszeitlicher Wanderung, Flucht vor Fressfeinden oder dem Auffinden eines Sexualpartners. Neurobiologisch wird Fortbewegung häufig den sogenannten automatischen Funktionen des Nervensystems zugeordnet. Solche Funktionen des Nervensystems können ohne ständige, aktive Kontrolle durch höhere Zentren im Nervensystem fehlerfrei ablaufen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass im Nervensystem lokal identifizierbare neuronale Netzwerke für diese Aufgabe existieren. Diese Klassifikation hat zu der Annahme geführt, dass solche Funktionen des Nervensystems auch genauso einfach und automatisch erzeugt werden, wie sie dem Betrachter erscheinen. Eine Ursache für diese Einschätzung liegt sicherlich darin begründet, dass die Lokomotionsapparate und die gängigen Fortbewegungsformen von Tieren verschiedene Symmetrien aufweisen. Diese legen es dem Beobachter nahe anzunehmen, dass der Erzeugung von Fortbewegung lediglich durch eine funktionelle Kopplung gleicher Strukturelemente Rechnung getragen werden kann – ein oberflächlicher Trugschluss, wie man bei genauerer Betrachtung schnell gewahr wird. Stellen Sie sich nur vor, der Boden gibt beim Schreiten plötzlich für ein Bein ein wenig unter ihrem Gewicht nach, oder das Licht wird ausgeschaltet und sie haben einen Raum erst zur Hälfte durchschritten. Beiden Anforderungen kann ihr motorisches System und ebenso das aller Tiere aber gerecht werden. Diese Leistung ist jedoch für ein Nervensystem alles andere als trivial zu erreichen: die die Fortbewegung erzeugenden Muskelaktivitäten müssen entsprechend der Umweltbedingungen schnell verändert und angepasst werden. Dabei müssen aber Gleichgewicht und Körperhaltung sichergestellt sein, damit kein Sturz passiert.

Seit mehr als 100 Jahren befassen sich Wissenschaftler mit der Untersuchung der neuronalen Grundlagen der Fortbewegung. Im Jahr 1911 veröffentlichte BROWN eine bahnbrechende Studie, die erstmals zeigte, dass Schreitbewegungen von Säugetieren weder allein durch das Gehirn, noch durch Reflexketten erzeugt werden, sondern von einem sogenannten „Mechanismus im Rückenmark“ (BROWN 1911, 1912). Bis heute sind trotz großer Fortschritte in unserem Verständnis die Leistungen des Nervensystems, die Fortbewegung von Tieren erzeugen, nur unvollständig aufgeklärt. Die Konsequenz unseres begrenzten Verständnisses findet sich am deutlichsten in dem immer noch recht eingeschränkten Leistungsportfolio von Laufmaschinen gegenüber all ihren lebenden Gegenständen dokumentiert (BUSCHMANN et al. 2015).

Im folgenden Kapitel beabsichtige ich, Fortbewegung von Tieren aus dem Blickwinkel der strukturellen Symmetrien der Fortbewegungsapparate zu betrachten und dabei die Anforderungen an das Nervensystem und seine Arbeitsweise bei der Erzeugung von Fortbewegung vorzustellen.

Zur Erzeugung von Fortbewegung kommt der Morphologie eines Organismus und der Funktion des Nervensystems im Umgang mit den Symmetrien derselben eine besondere Rolle zu. Der folgende Aufsatz stellt die für die Fortbewegungserzeugung relevanten Symmetriefformen bei Tieren vor und widmet sich der Rolle des Nervensystems mit Hinblick auf ihre Handhabung bei Fortbewegung. Dabei muss aus Gründen des begrenzten Umfangs die Durchdringungstiefe des Problems recht allgemein bleiben. Ich kann den aktuellen Wissensstand nur cursorisch vorstellen. Daher werden an entsprechenden Stellen Quellen

zum weitergehenden Studium angegeben, damit der interessierte Leser entsprechend seines Interesses tiefer in das Problem und den verfügbaren Wissensstand eindringen kann.

2. Symmetrie im Tierreich

Es sind alle vier gängigen Formen der Symmetrie, die Spiegel- oder Bilateralsymmetrie, die Radiärsymmetrie, die Longitudinalsymmetrie oder Metamerie und die zeitliche Symmetrie, also Rhythmicität, die für unsere Betrachtung von Bedeutung sind.

2.1 Bilateral- oder Spiegelsymmetrie

Bilateral- oder Spiegelsymmetrie bedeutet, dass man eine Spiegelachse entlang eines Objekts legen kann, an der sich beide Seiten des Objekts durch Spiegelung ineinander überführen lassen (Abb. 1A). Für die meisten Tierarten ist dies die Körperlängsachse, wie z. B. bei laufenden und fliegenden Insekten, kriechenden Raupen oder schwimmenden Wirbeltieren, hier z. B. Fische und Kieferlose (siehe Abb. 1A). Der überwiegende

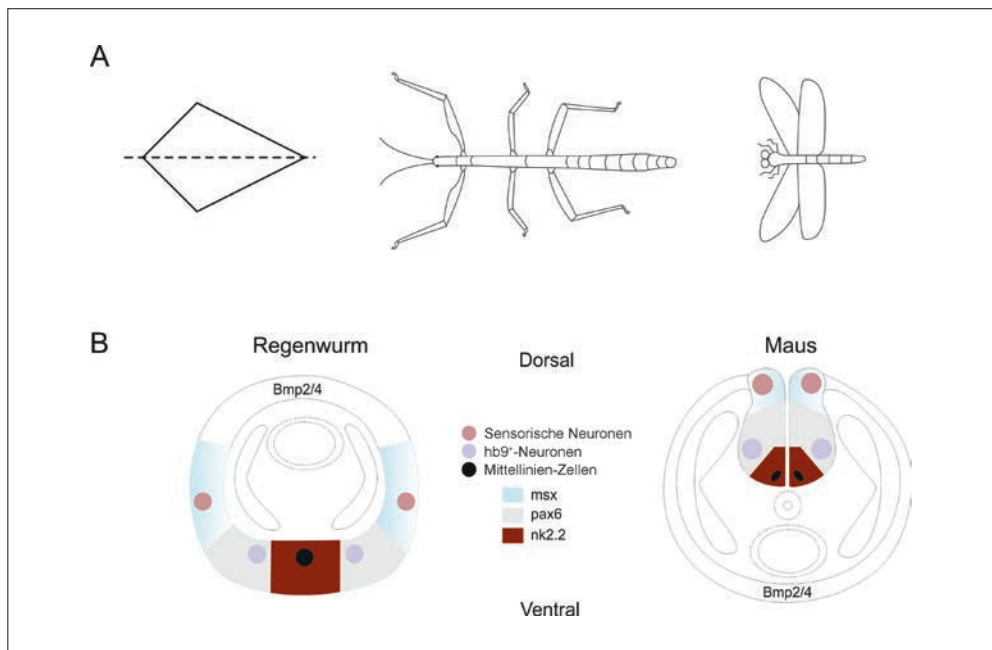


Abb. 1 (A) Schematische Darstellung der Bilateral- oder Spiegelsymmetrie und schematische Aufsicht auf den Körperbau von Stabheuschrecke und Libelle. (B) Schematische Darstellung des Vergleichs der embryonalen mediolateralen Musterung neurogenetischer Domänen, welche in wirbellosen und Wirbeltieren, *links* für einen Anneliden und *rechts* für die Maus, die Entwicklung des Nervensystems kontrollieren. Gleiche Farben der embryonalen Bereiche bedeuten gleichen genetischen Ursprung (*nk2.2* [rotbraun], *pax6* [grau], *msx* [bläulich]). Ebenso bedeuten gleiche Farben der gefüllten Kreise gleiche neurogenetische Provenienz der in den Domänen verorteten Neurone (Zellen der Mittellinie [schwarz], *hb9*⁺-Neurone [lila], *ath*⁺-sensorische Neurone [altrosa]). (Neu gezeichnet nach DENES et al. 2007.)

Teil metazoer Tierarten, etwa 95 %, ist entlang seiner Körperlängsachse bilateral- oder spiegelsymmetrisch organisiert. Sie sind zur Gruppe der Bilateria zusammengefasst (z. B. SAUERMOST und FREUDIG 1999, MAINZER 1988). Typisch für die Bilateria ist die Differenzierung des Körperbaus mit rostralem und kaudalem Pol, sowie den zueinander symmetrischen rechten und linken Körperhälften.

Die Bilateralsymmetrie von Tieren findet ihren Ursprung in der Ontogenese, d. h. in der Entwicklung des Embryos, durch welche die morphologische Darstellung des Organismus entlang der Körperlängsachse bestimmt wird. Wie in Abbildung 1B gezeigt, sind die beiden Hälften des Querschnitts durch einen Embryo spiegelsymmetrisch zueinander. Dies gilt sowohl für Wirbeltiere wie auch wirbellose Tiere, für die interessanterweise die embryonale Entwicklung unter der Kontrolle der gleichen Gene und Genprodukte stattfindet (z. B. DENES et al. 2007). Der in Abbildung 1B dargestellte Vergleich der genetischen Bestimmung der Regionen und Zellen des Nervensystems zwischen Wurm (Annelid) und Wirbeltier (Säugetier) zeigt, dass dieselben Gene (*msx*, *pax6*, *nk2.2*) nicht nur für die Formierung unterschiedlicher Regionen des Nervensystems (gleiche Farbkodierung) verantwortlich sein können, sondern auch für die Bildung von diesen lokalisierten Nervenzelltypen. Man spricht in diesem Fall von konservierten Strukturgenen. Es ist wichtig, an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass sich bei den Bilateria die äußere Symmetrie des Körpers nicht notwendigerweise vollständig in der Morphologie umsetzt, besonders deutlich wird das am Aufbau des Blutkreislaufs von Wirbeltieren oder der Anordnung von Geschlechtsorganen von Wirbellosen.

2.2 Radial- oder Rotationssymmetrie

Radial- oder Rotationssymmetrie bedeutet, dass sich ein Objekt um einen gewählten zentralen Drehpunkt durch Drehung um einen bestimmten Winkelbetrag in sich selbst überführen und zur Deckung bringen lässt (Abb. 2).

Von den verbleibenden 5% der Tierarten verfügen die meisten über einen radial-, bzw. rotationsymmetrischen Körperbau (z. B. SAUERMOST und FREUDIG 1999, MAINZER,

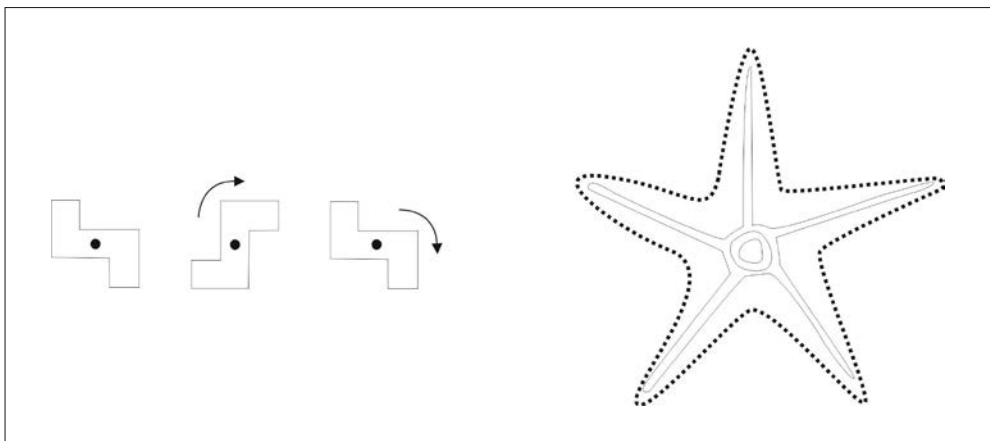


Abb. 2 Schematische Darstellung der Radialsymmetrie und schematische Darstellung des Körperbaus eines Echinodermen, des Seesterns

1988). Es ist die Gruppe der Echinodermata (Stachelhäuter), welche beinahe umfassend diesen Typ Symmetrie repräsentiert, im Fall der Asteroidea (Seesterne) gekennzeichnet durch die Pentamerie, die Fünfstrahligkeit des Körperbaus. Da die Stachelhäuter diese Symmetrieform aus einem zunächst bilateralen Embryo entwickeln, wird sie auch als sekundäre Radiärsymmetrie bezeichnet. Neben den Echinodermata sind typische radial-symmetrische Organismen die Coelenterata (Hohltiere; Abb. 2).

2.3 Longitudinalsymmetrie oder Metamerie

Geometrisch bedeutet Longitudinalsymmetrie, dass ein Objekt aus sich wiederholenden, gleichenden Elementen entlang einer durch das Objekt gelegten Achse besteht (Abb. 3). Viele tierische Organismen zeigen sowohl als Embryo als auch noch adult diese Form der Symmetrie (z. B. SAUERMOST und FREUDIG 1999, MAINZER 1988).

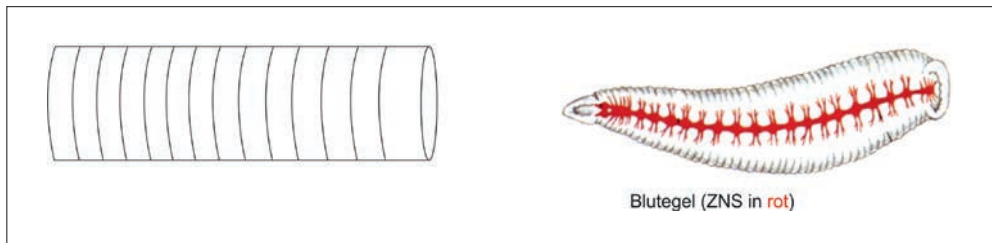


Abb. 3 Schematische Darstellung der Longitudinalsymmetrie (*links*) und schematische Darstellung des Körperbaus eines Blutegels inklusive der Struktur seines Zentralnervensystems (ZNS, *rechts*)

Sie stellt sich als prinzipielle Gleichförmigkeit der beitragenden Elemente, d. h. bei Tieren der Aneinanderfolge von ähnlichen Segmenten in Längsrichtung des Körpers, dar. Für viele wirbellose Tiere und Wirbeltiere basiert der adulte Organismus bezüglich seiner Morphologie, inklusive der Struktur und Funktion des Nervensystems, auf der Aneinanderreihung von grundsätzlich im Embryo noch gleichen, sogenannten homologen, Segmenten. Entwicklungsbiologisch bezeichnet man diese Form der Entwicklung als *Metamerie*. Als Beispiel kann hier der Blutegel aus der Gruppe der Hirudineen (Abb. 3) dienen, dessen Organisation des Körpers und Zentralnervensystems die Metamerie klar deutlich macht.

2.4 Zeitliche Symmetrie/Rhythmen

Die vierte Form der Symmetrie, welche bei der Betrachtung der Fortbewegung eine wichtige Rolle spielt, ist die zeitliche Symmetrie. Zeitliche Symmetrie bedeutet, dass ein physikalischer Parameter systematisch über die Zeit in einer Form variiert wird, dass seine Zustandswerte in gleicher Abfolge immer wiederkehren (z. B. SAUERMOST und FREUDIG 1999, MAINZER 1988). Man spricht dann von Rhythmus (Abb. 4). Unser Blick auf die Fortbewegung von Tieren zeigt, dass die Erzeugung der lokomotorischen Aktivität auf einer Ähnlichkeit der Muskelaktivierung von einem Zyklus zu dem nächsten beruht. Neben Fortbewegung basieren aber auch viele physiologische Funktionen von Tieren auf

rhythmischen Prozessen, z. B. Herzschlagaktivität, Bewegungen zur Ventilation der Lunge, Bewegungen zur Ventilation der Kiemen.

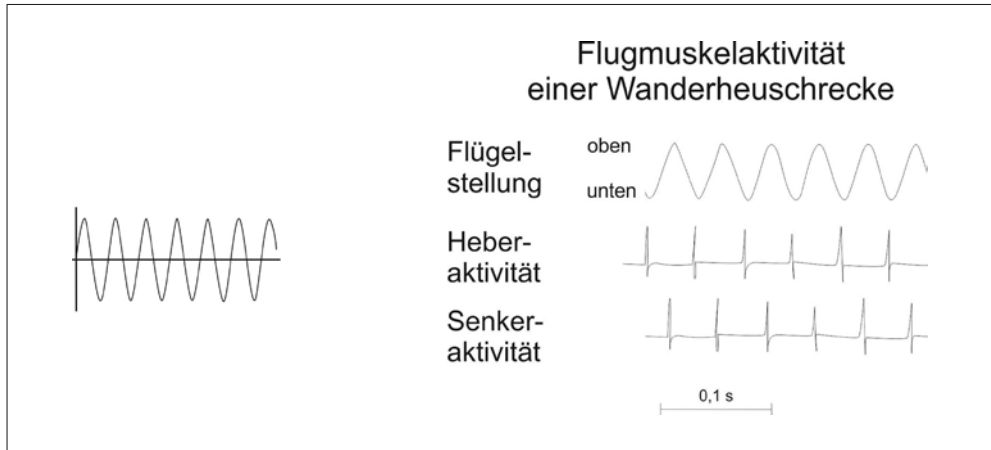


Abb. 4 Schematische Darstellung zeitlicher Symmetrie (*links*) und schematische Darstellung des Phänomens anhand der rhythmischen und zyklischen Aktivität der Flugmuskeln einer Wanderheuschrecke (*rechts*). Die dargestellten Aktivitätsspurten zeigen die Flügelposition zusammen mit alternierender Aktivität von Flügelheber- und Flügelsenkermuskeln.

Das Fliegen von Tieren wird durch einen zyklisch wiederkehrenden grundsätzlich gleichen Auf- und Abschlag von Flügeln ermöglicht (Abb. 4). Gleiches gilt für das Schwimmen mittels rhythmischer Flossen- oder Körperwandbewegungen oder auch für das Laufen. Letztere Form der Fortbewegung beruht auf den zyklisch wiederkehrenden Schreitbewegungen der einzelnen Beine. Lediglich einzelne Formen der Fortbewegung, wie z. B. das Springen, zeigen keine grundsätzliche zeitliche Symmetrie oder tun dies nur unter besonderen Bedingungen, z. B. bei Springen mit konstanter Wiederholrate.

Einschränkend sollte hier angemerkt werden, dass diese Beschreibung nur für die grundlegende Rhythmizität von Fortbewegung zutrifft und ihre Allgemeingültigkeit in dem Moment verliert, wenn die Erzeugung von Richtungsänderungen bei Fortbewegung mit einbezogen wird.

Der Ursprung der Rhythmizität für Fortbewegung, also für die zeitliche Symmetrie, findet sich in spezialisierten Netzwerken von Neuronen im Zentralnervensystem der Tiere. Diese Netzwerke sind nah bei den Lokomotionsorganen, z. B. nah der Beine im Rückenmark von Wirbeltieren, oder dem Bauchmark von wirbellosen Tieren lokalisiert (Abb. 5A; siehe auch unten).

Diese Netzwerke sind in der Lage, durch anhaltende Aktivierung, jedoch ohne phasische, also zeitlich strukturierte Signale von außen, rhythmische Aktivität in den die Muskeln der Lokomotionsorgane innervierenden Motoneuronen zu erzeugen. Sie werden deshalb auch als „zentrale Mustergeneratoren“, im Englischen „Central Pattern Generator (CPG)“, bezeichnet.¹

¹ Siehe z. B. GRILLNER 1981, MARDER und BUCHER 2001, MARDER et al. 2005, KATZ und HOOPER 2007, BÜSCHGES et al. 2011.

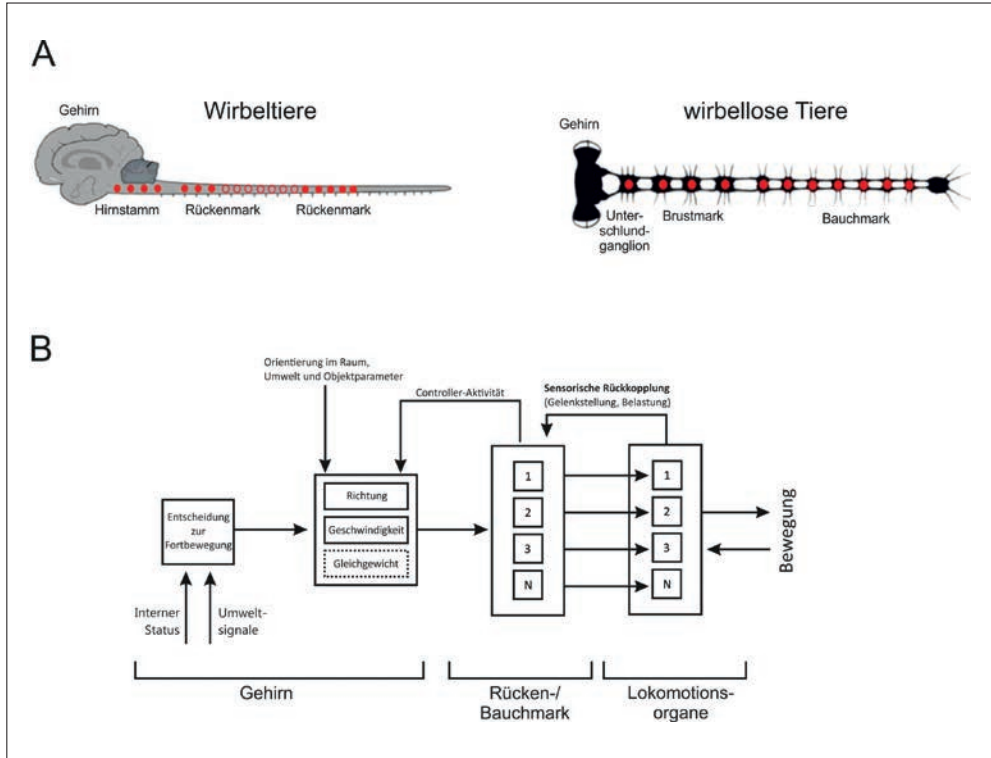


Abb. 5 (A) Schematische Darstellung des Zentralnervensystems von Wirbeltieren (*links*) und wirbellosen Tieren (*rechts*) unter besonderer Berücksichtigung der Lokalisation neuronaler Netzwerke, der CPGs (siehe Text), die rhythmische Aktivität für vielfältige Aufgaben, besonders auch für Fortbewegung erzeugen können (rote gefüllte Kreise). Für die aktuelle Betrachtung des Ursprungs von Fortbewegung sind die Netzwerke relevant, welche in den Segmenten des Rückenmarks (*links*) und des Brust- bzw. Bauchmarks (*rechts*) lokalisiert sind. Weiterführende Informationen finden sich in ORLOVSKY et al. 1999 und BÜSCHGES et al. 2011. (B) Schematische Darstellung der Organisation der neuronalen Kontrolle der Bewegungen von Wirbeltieren und wirbellosen Tieren, hier Insekten, dargestellt entlang der rostro-caudalen Ausdehnung des Zentralnervensystems. Bei Wirbeltieren ist die Kontrolle des Gleichgewichts zentral im Hirnstamm angesiedelt, während diese Funktion bei wirbellosen Tieren dezentral organisiert ist (gestichelte Box „Gleichgewicht“).

3. Neuronale Kontrollstrukturen für Fortbewegung in symmetrischen Wirbeltieren und symmetrischen wirbellosen Tieren

Bei Wirbeltieren und wirbellosen Tieren kommt dem in der Kopffregion innewohnenden Nervenzellgeflecht, auch Gehirn genannt, eine entscheidende Rolle für die Kontrolle von Fortbewegung zu. Das Gehirn eines Tieres initiiert willkürliche und automatische Bewegungen. Zu ersteren gehören z.B. Greif- und Manipulationsbewegungen der Extremitäten, zu letzteren gehört die Fortbewegung. Das Gehirn hält Bewegungen, also auch die für Fortbewegung, aufrecht und bestimmt deren Richtung. Die Befehle des Gehirns werden in Form von Kommandos mittels absteigender Bahnen an die nachgeschalteten neuronalen Zentren im Nervensystem, so auch die CPGs, vermittelt

(Abb. 5B).² Dies gilt für Wirbeltiere wie wirbellose Tiere gleichermaßen. Trotz der offensichtlichen morphologischen Unterschiede zwischen den Tiergruppen gibt es generell viele Ähnlichkeiten in der neuronalen Organisation der Kontrolle von Fortbewegung (Abb. 5B). Besonders erwähnenswert sind hier die Kommandosysteme des Gehirns, die nach erfolgter sensomotorischer Transformation über einzelne absteigende Neurone oder ganzer Populationen, den sogenannten Kommandoneuronen, spezifische Fortbewegungsformen initiieren und aufrechterhalten können.³ Klassische Beispiele sind für Wirbeltiere die absteigenden Neurone der *Formatio reticularis* im Stammhirn, allen voran das Mauthner-Neuron (z. B. EATON et al. 2001), welches die sehr schnellen Fluchtbewegungen von Fischen auslöst. Neben der Aktivierung von Sequenzen von Fortbewegung und ihrer Aufrechterhaltung kommt den absteigenden Neuronen mittels lateraler, also rechts-links-spezifischer Aktivitätsunterschiede die Kontrolle der Richtung von Fortbewegung zu (z. B. KOZLOV et al. 2014). Ähnliche Kommandosysteme existieren bei wirbellosen Tieren. So sind bei Insekten Neurone im Gehirn bekannt, welche Bein- und Flügelbewegungen für den Werbebesang initiieren können (z. B. HEDWIG und MEYER 1994, VON PHILIPSBORN et al. 2011) oder die Fortbewegungsrichtung bestimmen können (z. B. BIDAYE et al. 2014). Bei Wirbeltieren und wirbellosen Tieren wird Gleichgewicht und Körperhaltung unterschiedlich kontrolliert. Im Gegensatz zu den Wirbeltieren, für die diese Aufgabe maßgeblich das Innenohr übernimmt (gestrichelte Box „Gleichgewicht“ in Abb. 5B), gibt es bei wirbellosen Tieren keine zentrale sensorische Instanz zur Detektion von Änderungen in der Lage gegenüber der Schwerkraft (BÜSCHGES und SCHMIDT 2015, ORLOVSKY et al. 1999). Das Nervensystem von wirbellosen Tieren löst diese Aufgabe auf vielfältige Weise durch den Einsatz von sogenannten Propriozeptoren in und an den Körpersegmenten und Extremitäten (Abb. 5B).

Diese funktionelle Ähnlichkeit in der Strukturierung geht, wie auch schon die Entstehung der bilateralen Symmetrie, auf eine Konservierung von Strukturgenen zurück, welche die molekulargenetische Bestimmung der rostro-caudalen Achse des Embryos im Allgemeinen und des Nervensystems im Speziellen bestimmen, hier am Vergleich der relevanten Transkriptionsfaktoren für Maus und Fruchtfliege dargestellt (Abb. 6).

Zusammenfassend betrachtet gehen also Bilateralsymmetrie und Longitudinalsymmetrie auf die Rolle und Bedeutung evolutionsbiologisch sehr alter Gene zurück.

4. Der Bruch der Symmetrie des Körpers durch neuronale Kontrolle

Wir wollen nun zunächst die neuronale Umsetzung der Anforderungen an die Erzeugung von Fortbewegung betrachten, bei der es um die Erzeugung der geradlinigen Bewegung geht. Beim Fliegen und Kriechen sind die Anforderungen an die neuronale Kontrolle durch eine Spiegelsymmetrie des Körpers recht einfach umsetzbar, da zur Erzeugung von Fortbewegung die Aktivierung der Körpermuskeln beiderseits symmetrisch und segmental gleichzeitig erfolgt. Man kann sich dies am Beispiel des Kriechens einer Raupe oder des Flugs einer Wanderheuschrecke oder einer Libelle verdeutlichen, bei denen Fort-

² Zur Übersicht für Fortbewegung siehe z. B. ORLOVSKY et al. 1999, BÜSCHGES und SCHMIDT 2015.

³ Zur Übersicht siehe DAGHFOUS et al. 2016, EATON und DiDOMENICO 1983, EDWARDS et al. 1999, HEDWIG 2000, KUPFERMANN und WEISS 1978.

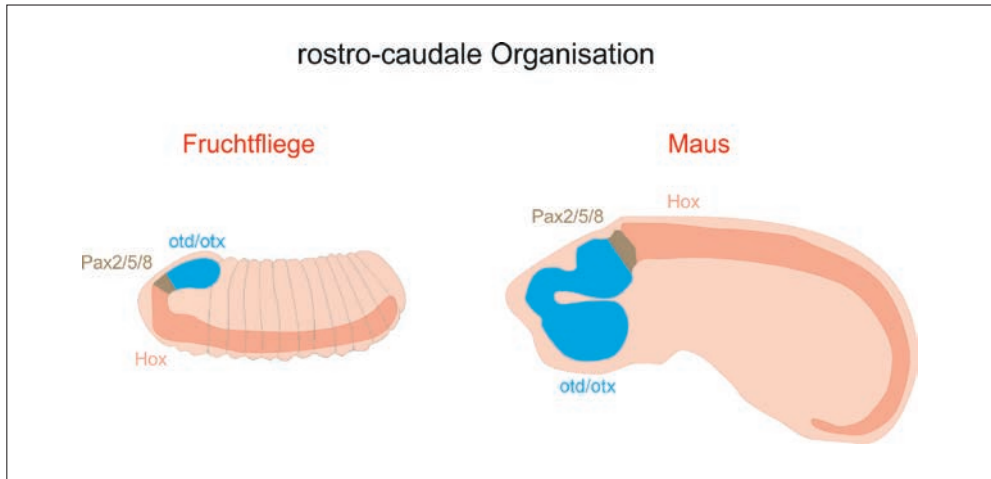


Abb. 6 Schematische Darstellung der evolutionär konservierten embryonalen Bestimmung der rostro-caudalen segmentalen Organisation des Nervensystems von wirbellosen Tieren, hier für die Fruchtliege (*links*), und von Wirbeltieren, hier für die Maus (*rechts*). Die Expressionsmuster der gemeinsamen Gene tragen gleiche Farben: otd/Otx (blau), Pax2/5/8 (braun) und Hox (rötlich). Für detaillierte Informationen im Überblick sollte REICHERT 2005 konsultiert werden.

bewegung von der gleichzeitigen Aktivierung von Muskeln auf beiden Seiten des Körpers getragen wird. Als weiteres Beispiel können die Schwimmbewegungen von Tieren dienen, wenn diese sich im Wasser durch gleichzeitiges Ausstrecken der Hinterbeine fortbewegen, z. B. im Falle der Froschlurche oder von Insekten, wie Grille und Heuschrecke. Zentrale symmetrisch organisierte neuronale Netzwerke, mit den Eigenschaften der oben schon beschriebenen CPGs und koordinierender Verknüpfung zwischen beiden Seiten des Nervensystems, erzeugen Bewegungen.⁴ (Ein zeitlicher Versatz der Aktivierung der segmentalen Muskulatur, wie z. B. beim Kriechen, entsteht durch die intersegmentale Interaktion der segmentalen CPGs für Fortbewegung und lässt sich durch das Bild einer peristaltischen Welle vergegenwärtigen.)

Anders stellt sich die Situation für Tiere dar, die sich dadurch fortbewegen, dass die Muskulatur beider Körperseiten abwechselnd im Zyklus aktiviert wird. Beim Schwimmen werden bei vielen Tieren nicht nur Flossen, sondern vielmehr der ganze Körper als Lokomotionsorgan für die Fortbewegung eingesetzt. Die Kontraktionen der Körperwandmuskeln auf beiden Seiten des Körpers alternieren miteinander, wobei sich die segmentalen Aktivierungen durch intersegmentale Koordination zu einer rostro-caudal gerichteten Welle der Muskelkontraktionen zusammenfügen. Diese bewegt das Tier im Wasser (Abb. 7A).

Beim Laufen ist die Situation komplexer. In der Regel werden zum Laufen mehrere Beine eingesetzt, und jedes von ihnen besteht aus mehreren Segmenten (z. B. BÜSCHGES 2005). Auf der Basis der vorliegenden morphologischen Spiegelsymmetrie müssen für das Laufen die Bewegungen der Beine nicht nur untereinander, sondern auch die Bewegungen der einzelnen Segmente jeden Beines koordiniert werden.

4 Siehe z. B. ORLOVSKY et al. 1999.

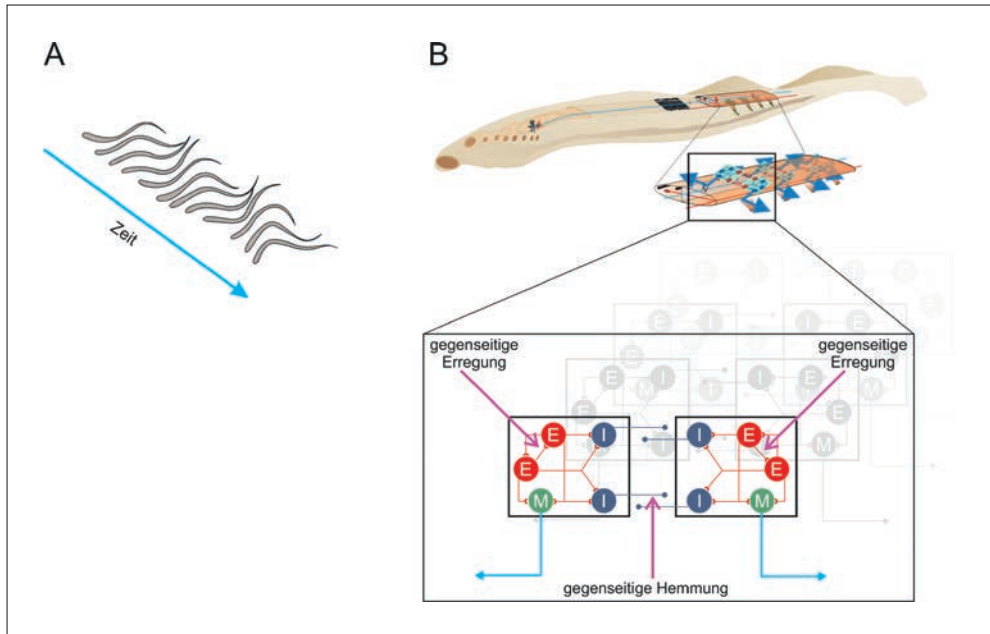


Abb. 7 (A) Schematische Darstellung der undulatorischen Schwimmbewegung eines Neunauges unter besonderer Berücksichtigung der von vorne nach hinten verlaufenden Kontraktionswelle jeder Seite des Organismus. (B) Schematische Darstellung der Organisation der segmentalen neuronalen Netzwerke im Rückenmark des Neunauges, welche die Fortbewegung des Tieres erzeugen. Besondere Bedeutung haben in der Darstellung die segmental repetitive Topologie der CPGs (siehe Text) sowie die in ihnen lokalisierten zwei Mechanismen zur Aufrechterhaltung neuronaler Aktivität (gegenseitige Erregung) sowie zur Erzeugung alternierender Aktivität beider Seiten (gegenseitige Hemmung) gegeben. Hemmende synaptische Verknüpfungen sind durch gefüllte Kreise dargestellt, erregende Verknüpfungen durch offene Dreiecke.

Wir wollen uns dem aktuellen Kenntnisstand zur Erklärung der neuronalen Kontrolle für die Fortbewegungsformen Schwimmen und Laufen zunächst über die im Vergleich einfachere Situation, nämlich über die neuronalen Grundlagen der Erzeugung der Aktivität zum Antrieb der Körpermuskulatur beim Schwimmen, nähern. Als Beispiel dient uns das im Vergleich zu anderen Wirbeltieren sehr ursprünglich organisierte Nervensystem des Neunauges (Abb. 7B). Das Neunauge, welches zur Gruppe der Kieferlosen gehört, gilt als eines der am ursprünglichsten organisierten Wirbeltiere (z. B. ORLOVSKY et al. 1999, GRILLNER 2003). Dennoch gilt heute wegen der evolutionsbiologisch konservierten Organisation seines Nervensystems das Wissen um die Topologie der neuronalen Netzwerke zur Bewegungserzeugung als „blue print“ für das Feld der lokomotorischen Kontrolle bei Wirbeltieren, besonders wenn es um die vergleichende molekulargenetisch-physiologische Aufklärung der neuronalen Netzwerke bei Säugetieren, z. B. der Maus, geht (z. B. GOULDING 2009).

Die Schwimmbewegungen von Neunaugen werden durch eine auf jeder Körperseite koordiniert von rostral nach caudal verlaufende Kontraktion der Körperwandmuskulatur entlang der 80–100 Körpersegmente erzeugt (Abb. 7A). Für unsere Betrachtung lassen wir die stabilisierende Funktion der Rückenflossen außer Acht (MENTEL et al. 2008). In je-

dem Segment des Körpers werden beim Schwimmen die Muskeln alternierend zu der anderen Seite aktiviert. Die segmental alternierende Rechts-links-Aktivität der Muskulatur wird durch CPGs im Rückenmark erzeugt (Abb. 7B, ROVAINEN 1979, GRILLNER et al. 1995). Entscheidend dafür ist eine Gruppe von kreuzenden hemmenden Interneuronen im Rückenmark, welche dafür sorgt, dass die Motoneurone auf beiden Seiten des Körpers alternierend und nicht gleichzeitig aktiviert werden („M“ – grün in Abb. 7B). Dies sind die „kommissuralen kreuzenden Interneurone“, auch „crossing commissural interneurons“ genannt („I“ – blau in Abb. 7B; BUCHANAN und GRILLNER 1987).⁵ Die Aktivierung der segmentalen Netzwerke wird auf jeder Seite des Rückenmarks durch eine weitere Gruppe von Interneuronen erzeugt und aufrechterhalten, den lokalen erregenden Interneuronen („E“ – rot in Abb. 7B; CANGIANO und GRILLNER 2003). Diese erregen nicht nur sich gegenseitig, sondern erregen auch alle anderen ipsilateralen Neurone des Netzwerks (Abb. 7B). Die Folge ist eine Aktivierung des gesamten ipsilateralen CPGs. In jedem Segment des Rückenmarks des Neunauges existiert also ein Mechanismus des Netzwerks, der Aktivität befördert, und ein weiterer, der die ausschließliche Aktivierung jeweils nur einer Körperseite sicherstellt (GRILLNER 2006, GRILLNER et al. 2005; Abb. 7B). Beide Mechanismen zusammen können die Bilateral-symmetrie des Neunauges im Sinne der zu erzeugenden Fortbewegung „brechen“. Wichtig anzumerken ist, dass die Erzeugung der Schwimmaktivität nicht allein durch die beschriebene Netzwerkarchitektur ermöglicht wird. Die einzelnen Nervenzellen verfügen über ein ganzes Arsenal individueller Eigenschaften, die ihre spezifische Aktivität bestimmen. So verfügen viele Neurone zum einen über die Eigenschaft, eine synaptische Aktivierung zu potenzieren, aber auch bei andauernder Aktivierung ihre Aktivität selbst wieder in Richtung Inaktivierung zu reduzieren (GRILLNER und EL MANIRA 2015). Solche sogenannten intrinsischen Eigenschaften der einzelnen Interneuronklassen, die hier nicht näher erläutert werden können, sind zusammenfassend z. B. in GRILLNER (2006) nachzulesen.

Kommen wir nun zur Organisation der neuronalen Netzwerke, welche bei landlebenden Tieren zur Erzeugung der Schreitbewegungen ihrer Beine beiträgt. Beobachtet man die Beinbewegungen eines Tieres beim Laufen, so sind es die Rhythmizität der Einzelbeinbewegungen und die zeitliche Ordnung der Schreitbewegungen der Beine untereinander, welche die Funktionalität von Fortbewegung sicherstellen. Wenden wir uns zunächst dem letzten Aspekt, der Koordination der Beine untereinander, zu.

Die Koordination der Schreitbewegungen wird bei allen Tieren in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit und des zu tragenden Gewichts modifiziert. Dies gilt unabhängig von der Zahl der Beine eines Tieres. Vierbeiner zeigen z. B. bei langsamem Gehen den Schritt, bei schnellerer Fortbewegung den Trab oder Passgang (Abb. 8A). Dabei bewegen sich die Beine auf beiden Seiten des Tieres wohl koordiniert, aber nur bedingt streng alternierend. Die Ursache hierfür ist, dass die Stemmphase eines jeden Beins, also die Phase des Schreitzyklus, bei der ein Bein am Untergrund zur Bewegung des Tieres in Laufrichtung beiträgt, in der Regel viel kürzer ist als die Schwingphase, mit der das Bein in die Ausgangsposition für die nächste Stemmphase zurückgeführt wird. Deutlich wird dies beim langsamen Schritt, wenn bei Vierbeinern jedes Bein recht unabhängig von den anderen Laufbewegungen erzeugt, oder beim Tölt, wenn alle vier Beine in wechselnder kontralateraler Folge zwischen einem Vorder- und Hinterbein die Schreitphasen erzeugen. Allein bei der schnellsten Form der Fortbewegung, dem Galopp, erscheinen die Bewegungen aller Beine fest zueinander

5 Übersichten in GRILLNER 2003, GRILLNER et al. 1998.

gekoppelt. Allerdings sind selbst dann die Bewegungen der kontralateralen Beine zwar beinahe zeitgleich, jedoch nie wirklich simultan in ihrer Bewegung.

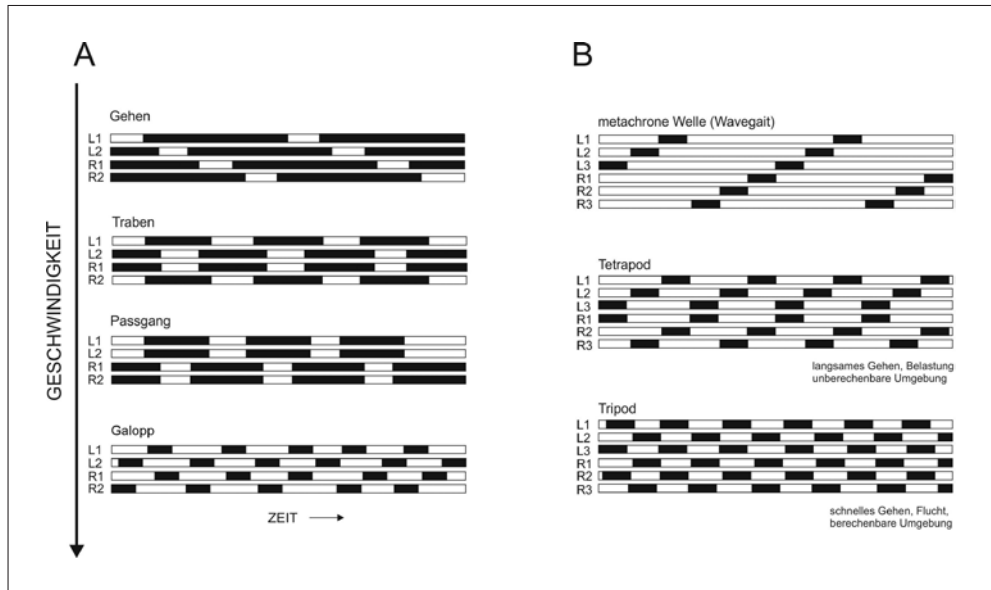


Abb. 8 (A) Schematische Darstellung der Laufmuster der Beine bei Wirbeltieren für das bekannte Spektrum der Laufgeschwindigkeit. (B) Schematische Darstellung der Laufmuster der Beine bei Insekten für das bekannte Spektrum der Laufgeschwindigkeit.

Abbildung 8A zeigt, wie sich die Koordination der Beine für die unterschiedlichen Gangarten darstellt. Bei den sechsbeinigen Insekten stellt sich die Situation ähnlich dar, indem sich die Koordination der Schreitbewegungen der Beine systematisch ändert (Abb. 8B): vom langsamen zum schnellen Laufen hin wird bei konstanter Dauer der Schwingphase der Beine, also der Rückführungsbewegung, maßgeblich die Intensität und damit Dauer der Stemmphase der Beine modifiziert. Dies führt dazu, dass aus der beim langsamen Laufen auf jeder Seite von caudal nach rostral erzeugten Schrittfolge der ipsilateralen Beine, dem sogenannten „Wavegait“, beim schnelleren Laufen zunächst die tetrapode, mit jeweils vier Beinen am Boden, und bei noch größeren Geschwindigkeiten die tripode Koordination, mit jeweils weitgehend drei Beinen am Boden, automatisch entsteht (z. B. BORGMANN und BÜSCHGES 2015, SCHILLING et al. 2013, WOSNITZA et al. 2013).

Vergleicht man die Bewegungen der Beine in den verschiedenen Gangarten, so fällt z. B. bei den Vierbeinern auf, dass insbesondere beim langsamen Laufen, also dem Schritt, jedes Bein unabhängig voneinander bewegt wird, während beim schnellen Laufen, dem Galopp, die Beine auf beiden Seiten des Tieres beinahe, aber nie vollständig synchron miteinander bewegt werden (z. B. Abb. 8A). Neueste Untersuchungen aus dem Labor von Ole KIEHN (TALPALAR et al. 2013) zeigten nun, dass die unabhängige Schreitbewegung der Beine auf beiden Seiten der Maus, welche für die Gangarten bei langsamen Laufgeschwindigkeiten typisch ist, von der Aktivität einer spezifischen Population von Interneuronen im Rückenmark, den sogenannten $V0_D$, bestimmt wird (Abb. 9).

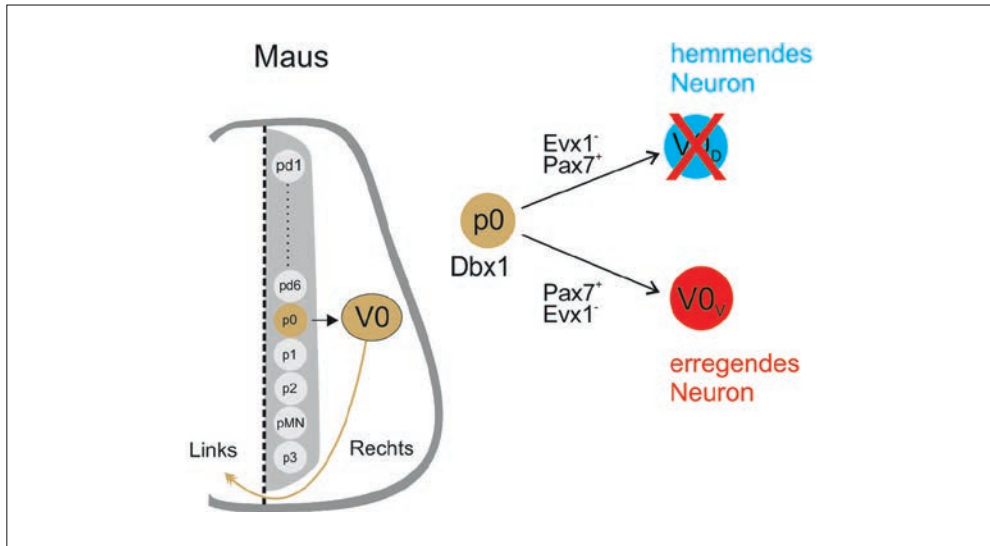


Abb. 9 Schematische Darstellung der ontogenetischen Provenienz der Neurone im Rückenmark der Maus. Dargestellt ist ein Hemisegment des Rückenmarks mit den Ursprungszelltypen für die Ontogenese der Neurone im Rückenmark (entlang der Mittellinie von dorsal nach ventral von pd1 bis p3). Tochterzellen der p0-Zellen entwickeln sich zu Neuronen des Typs V0, welche die Mittellinie kreuzen werden. Die Aktivität der Transkriptionsfaktoren Evx1 und Pax7 bestimmt die genetische Disposition der Tochterzellen, wobei solche mit Pax7⁺-Charakteristik sich zu hemmenden kreuzenden Interneuronen entwickeln. Mittels neurogenetischer Intervention lässt sich die Entwicklung dieses Zelltyps verhindern (TALPALAR et al. 2013; siehe Text).

Die V0_D-Interneurone liegen in jedem Segment auf einer Seite des Rückenmarks, und ihre Axone ziehen auf die kontralaterale Seite. Dort wirken sie hemmend auf alle zu diesen Neuronen postsynaptischen Nervenzellen. Damit ähneln sie funktionell den oben für das Neunauge beschriebenen CCI (Abb. 7). Fallen diese Neurone durch neurogenetisch induzierte Inaktivierung dauerhaft aus, so bewegt sich die Maus ausschließlich „galoppierend“ vorwärts. Interessanterweise zeigt diese Mausmutante dann eine wirklich zeitgleiche Bewegung der kontralateralen Beine (TALPALAR et al. 2013). Alle anderen Gangarten, die einer unabhängigen Schreitbewegung der Hinter- und Vorderbeinpaare bedürfen, können nicht mehr erzeugt werden. Diese neuen Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Bruch der Symmetrie für die Fortbewegung des Laufens neuronal durch einen für die Wirbeltiere konservierten Mechanismus gebildet wird. Er wird durch eine wechselseitig hemmende Interaktion zwischen den ipsilateralen neuronalen Netzwerken auf beiden Seiten des Rückenmarks möglich (KIEHN 2016).

5. Modularität der Kontrollnetzwerkstruktur für Fortbewegung

Beine bestehen in der Regel aus mehreren Segmenten. Das Bein eines Insekts besteht aus den sechs Segmenten Coxa, Trochanter, Femur, Tibia, Tarsus und Prätarsus. Vielsegmentig ist ebenso der Aufbau der Wirbeltierextremität. Die Wirbeltierextremität wird von etwa drei Dutzend Muskeln bewegt, die Wirbellosenextremität dagegen von bis zu eineinhalb

Dutzend Muskeln. Die oben beschriebenen neuronalen Lösungen gelten bezogen auf die Kontrolle der Rechts-links-Schreitaktivität der Beine nur für die Erzeugung der Koordination der Schreitbewegungen der Beine untereinander, nicht aber für die Koordination der einzelnen Segmente untereinander, welche zusammen den Schritt erzeugen. Sie bieten auch keine Erklärung für die Anforderung, wenn sich die Aktivierungen der Muskulatur auf beiden Seiten des Versuchstieres in ihrer Stärke und zeitlichen Strukturierung unterscheiden müssen.

Eindrucksvoll wird dies für Vierbeiner beim Laufen entlang einer Geländekante bei unebenem Gelände verdeutlicht, bei der die Beine jeder Seite stark unterschiedliche Bewegungen für jeden Schritt machen müssen. Als weiteres Beispiel können Beinbewegungen dienen, die sechsbeinige Insekten beim Kurvenlaufen erzeugen. Jedes Bein generiert in dieser Situation eine ganz spezifische Kinematik. Der Hauptunterschied besteht darin, dass die Beine auf der Innenseite besonders über eine deutliche Flexion im Femur-Tibia-Gelenk, dem funktionellen Kniegelenk, das Tier in Richtung der Kurve ziehen, während die Beine auf der Außenseite das entsprechende Gelenk nur wenig einsetzen, dafür aber die Beinbewegung entlang der Körperlängsachse vergrößern, was durch eine vergrößerte Auslenkung der Coxa ermöglicht wird (GRUHN et al. 2009). Zur Erzeugung der unterschiedlichen Bewegungen der Beine auf beiden Seiten des Körpers wird die Aktivierung der Muskulatur der einzelnen Beingelenke unabhängig voneinander modifiziert, wobei interessanterweise unterschiedliche Beinbewegungen fließend ineinander übergehen können, was bei aufeinanderfolgenden Änderungen der Laufrichtung wichtig ist.

Die Flexibilität der Koordination der Bewegungen der verschiedenen Segmente eines Beines zueinander wird dadurch ermöglicht, dass die Schreitbewegungen eines Beines nicht etwa durch einen einzelnen CPG für alle Gelenke und Segmente erzeugt werden, sondern vielmehr durch individuelle CPGs für jedes einzelne Segment eines Beins (Abb. 10).⁶

Die Hypothese einer solchen Organisation der CPGs für die Kontrolle der Gelenke eines Beins wurde vor mehr als 40 Jahren von GRILLNER und ZANGGER (1979) für die Generierung der Beinbewegungen bei Katzen vorgeschlagen, und zwar als „Unit-Burst-Generator-Concept“. Eindeutige Evidenzen, die diese Hypothese verifizieren, liegen heute für hinreichend detailliert untersuchte Tiergruppen vor: für wirbellose Tiere, hier Insekten (BÜSCHGES et al. 1995), niedere Wirbeltiere, Anuren (CHENG et al. 1998) und Säugetiere (die Maus; HÄGGLUND et al. 2013).

6. Mechanismen der Kopplung der Module

Nach den oben gemachten Ausführungen stellt sich für den letzten Abschnitt die Frage, was heute über die neuronalen Mechanismen bekannt ist, die für die koordinierte Aktivierung der Muskelgruppen der Beine bei der Erzeugung von Schreitbewegungen verantwortlich sind. Die Aktivierung der Muskulatur eines Beins wird durch die neuronalen Netzwerke im Zentralnervensystem in der Form erzeugt, dass sowohl die aktuelle Stärke als auch die zeitliche Strukturierung der neuronalen Aktivität bestimmt wird. So befördert für das Katzenhinterbein während der Stemmphase eine von den Muskelsehnenorganen an das Zentralnervensystem gemeldete Erhöhung der Belastung eine Erhöhung der Muskel-

6 Übersicht in BÜSCHGES et al. 2008.

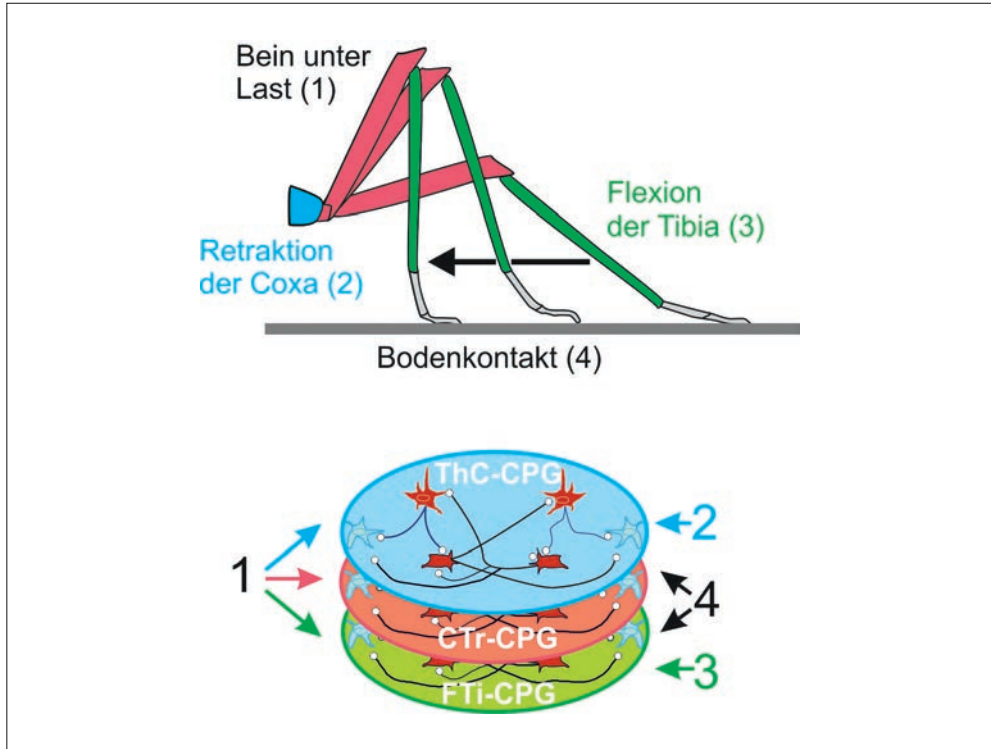


Abb. 10 Organisation der neuronalen Netzwerke, welche die Schrittbewegung eines Insektenbeines erzeugen, am Beispiel der Stemmphase. Die beitragenden Beinsegmente sind farbkodiert dargestellt: Coxa – blau; Trochanterofemur – rot; Tibia – grün. Die Benennung und Zahlen bezeichnen die relevanten sensorischen Rückkopplungssignale, welche die Aktivität der individuellen CPGs bestimmen. Der untere Teil der Darstellung zeigt, welche sensorischen Rückkopplungssignale die einzelnen CPGs beeinflussen und so zur koordinierten Bewegung der Beinsegmente beitragen: 1 – Belastung des Beines; 2 – Retraktion der Coxa; 3 – Flexion der Tibia; 4 – Bodenkontakt. Weitere Details finden Sie in BÜSCHGES et al. 2011.

aktivierung. Eine am Ende der Stemmphase gemeldete Entlastung führt zu einem Umschalten von Strecker- auf Beugeraktivierung, welche den Beginn der Schwingphase einleitet.⁷

Aspekte des aktuellen Kenntnisstandes zur Rolle sensorischer Rückkopplungssignale bei der Erzeugung von Schrittbewegungen eines Insektenbeines sind in Abbildung 10 für die Erzeugung der Stemmphase zusammengefasst. Interessanterweise weisen Ergebnisse aus Untersuchungen an anderen laufenden Tieren, seien es nun wirbellose Tiere, wie Schaben oder Krebse, oder Wirbeltiere, wie Katze, Maus oder Mensch, daraufhin, dass für die Rolle sensorischer Signale in der Erzeugung der Schrittbewegung prinzipiell eine große Ähnlichkeit zwischen den verschiedenen Tiergruppen besteht.⁸

7 Übersicht in PEARSON et al. 2006.

8 Übersicht in BÜSCHGES 2005, BÜSCHGES et al. 2011, PEARSON 1993, PROCHAZKA 1996.

7. Fazit und Nachwort

Die Fortbewegungsapparate von Tieren weisen die vier gängigsten Formen der Symmetrie auf, Spiegelsymmetrie (Bilateralsymmetrie), Radiärsymmetrie, Longitudinalsymmetrie (Metamerie) und zeitliche Symmetrie (Rhythmen). Die ersten drei strukturellen Symmetrieeigenschaften bringen besondere Anforderungen an die neuronalen Netzwerke zur Erzeugung von Fortbewegung mit sich, die durch eine entsprechende neuronale Kontrolle entweder benutzt werden können oder überwunden werden müssen. Betrachtet man die Organisation der Kontrollnetzwerke für Fortbewegung im Nervensystem, so finden sich die neuronalen Netzwerke zur Erzeugung rhythmischer lokomotorischer Aktivität immer eng benachbart zu den Lokomotionsorganen, z. B. die CPGs für die Kontrolle der Hinterbeine eines Säugetieres im Bereich des Lumbalrückenmarks, oder die CPGs für den Insektenflug in den Thorakalganglien. Über Tiergruppen und Bewegungsformen hinweg sind diese Netzwerke modular organisiert, mit segment- oder gelenkspezifischen Zuordnungen. Dabei tragen sensorische Rückkopplungssignale über die erzeugten Bewegungen zur Koordination bei. Basierend auf der modularen Struktur kann das Nervensystem sehr flexibel den Fortbewegungsapparat ansteuern.

Im Gegensatz zu dem schon recht weit fortgeschrittenen Verständnis der neuronalen Grundlagen der Erzeugung lokomotorischer Aktivität steht das Verständnis der Frage, wie das Gehirn diese modularen neuronalen Netzwerke ansteuert, um deren Koordination für unterschiedliche Bewegungsformen zu modifizieren, noch am Anfang. Es ist insbesondere die Aufklärung der absteigenden Kontrolle im Nervensystem, welche in den nächsten Jahren unsere besondere Aufmerksamkeit verlangt.

Dank

Der Autor bedankt sich bei Dr. SCHWAGER-BÜSCHGES und Dr. PFLÜGER für die kritische Lektüre einer früheren Version des Artikels und ihre Verbesserungsvorschläge und bei S. SEELIGER für die Zusammenarbeit zur Erstellung der Abbildungen. Die in die textliche Darstellung eingegangenen eigenen Arbeiten wurden durch Forschungsprojekte bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (BU 857), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, der *National Science Foundation*, dem DAAD, dem Wissenschaftskolleg zu Berlin und dem *Howard Hughes Medical Institute* ermöglicht.

Literatur

- BIDAYE, S. S., MACHACEK, C., WU, Y., and DICKSON, B. J.: Neuronal control of *Drosophila* walking direction. *Science* 344, 97–101 (2014)
- BORGMANN, A., and BÜSCHGES, A.: Insect motor control: methodological advances, descending control and inter-leg coordination on the move. *Curr. Opin. Neurobiol.* 33, 8–15 (2015)
- BROWN, T. G.: The intrinsic factors in the act of progression in the mammal. *Proc. Roy. Soc. London B Biol. Sci.* 84, 308–319 (1911)
- BROWN, T. G.: The factors in rhythmic activity of the nervous system. *Proc. Roy. Soc. London B Biol. Sci.* 85, 278–289 (1912)
- BUCHANAN, J. T., and GRILLNER, S.: Newly identified ‘glutamate interneurons’ and their role in locomotion in the lamprey spinal cord. *Science* 236, 312–314 (1987)
- BÜSCHGES, A.: Sensory control and organization of neural networks mediating coordination of multisegmental organs for locomotion. *J. Neurophysiol.* 93, 1127–1135 (2005)

- BÜSCHGES, A., AKAY, T., GABRIEL, J. P., and SCHMIDT, J.: Organizing network action for locomotion: insights from studying insect walking. *Brain Res. Rev.* 57, 162–171 (2008)
- BÜSCHGES, A., und SCHMIDT, J.: Neuronale Kontrolle des Laufens – Einblicke aus Untersuchungen an Insekten. *Neuroforum* 4 (2015)
- BÜSCHGES, A., SCHMITZ, J., and BÄSSLER, U.: Rhythmic patterns in the thoracic nerve cord of the stick insect induced by pilocarpine. *J. Exp. Biol.* 198, 435–456 (1995)
- BÜSCHGES, A., SCHOLZ, H., and EL MANIRA, A.: New moves in motor control. *Curr. Biol.* 21, R513–524 (2011)
- BUSCHMANN, T., EWALD, A., TWICKEL, A. VON, and BÜSCHGES, A.: Controlling legs for locomotion-insights from robotics and neurobiology. *Bioinspir. Biomim.* 10, 041001 (2015)
- CANGIANO, L., und GRILLNER, S.: Fast and slow locomotor burst generation in the hemispinal cord of the lamprey. *J. Neurophysiol.* 89, 2931–2942 (2003)
- CHENG, J., STEIN, R. B., JOVANOVIĆ, K., YOSHIDA, K., BENNETT, D. J., and HAN, Y.: Identification, localization, and modulation of neural networks for walking in the mudpuppy (*Necturus maculatus*) spinal cord. *J. Neurosci.* 18, 4295–4304 (1998)
- DAGHFOS, G., GREEN, W. W., ALFORD, S. T., ZIELINSKI, B. S., and DUBUC, R.: Sensory activation of command cells for locomotion and modulatory mechanisms: Lessons from lampreys. *Front Neural Circuits* 10, 18 (2016)
- DENES, A. S., JEKELY, G., STEINMETZ, P. R. H., RAIBLE, F., SNYMAN, H., PRUD'HOMME, B., FERRIER, D. E. K., BALAVOINE, G., and ARENDT, D.: Molecular architecture of annelid nerve cord supports common origin of nervous system centralization in bilateria. *Cell* 129, 277–288 (2007)
- EATON, R. C., and DiDOMENICO, R.: Command and the neural causation of behavior: a theoretical analysis of the necessity and sufficiency paradigm. *Brain Behav. Evol.* 27, 132–164 (1985)
- EATON, R. C., LEE, R. K. K., and FOREMAN, M. B.: The Mauthner cell and other identified neurons of the brain-stem escape network of fish. *Progr. Neurobiol.* 63, 467–485 (2001)
- EDWARDS, S. J., BRAUNHOLTZ, D. A., LILFORD, R. J., and STEVENS, A. J.: Ethical issues in the design and conduct of cluster randomised controlled trials. *BMJ* 318, 1407–1409 (1999)
- GOULDING, M.: Circuits controlling vertebrate locomotion: moving in a new direction. *Nature Rev. Neurosci.* 10, 507–518 (2009)
- GRILLNER, S.: Control of locomotion in bipeds, tetrapods, and fish. In: *Comprehensive Physiology*. John Wiley & Sons, Inc. 1981
- GRILLNER, S.: The motor infrastructure: from ion channels to neuronal networks. *Nature Rev. Neurosci.* 4, 573–586 (2003)
- GRILLNER, S.: Biological pattern generation: The cellular and computational logic of networks in motion. *Neuron* 52, 751–766 (2006)
- GRILLNER, S., DELIAGINA, T., EKEBERG, O., EL MANIRA, A., HILL, R. H., LANSNER, A., ORLOVSKY, G. N., and WALLEIN, P.: Neural networks that co-ordinate locomotion and body orientation in lamprey. *Trends Neurosci.* 18, 270–279 (1995)
- GRILLNER, S., EKEBERG, Ö., EL MANIRA, A., LANSNER, A., PARKER, D., TEGNÉR, J., and WALLÉN, P.: Intrinsic function of a neuronal network – a vertebrate central pattern generator. *Brain Res. Rev.* 26, 184–197 (1998)
- GRILLNER, S., and EL MANIRA, A.: The intrinsic operation of the networks that make us locomote. *Curr. Opin. Neurobiol.* 31, 244–249 (2015)
- GRILLNER, S., MARKRAM, H., DE SCHUTTER, E., SILBERBERG, G., and LEBEAU, F. E.: Microcircuits in action – from CPGs to neocortex. *Trends Neurosci.* 28, 525–533 (2005)
- GRILLNER, S., and ZANGGER, P.: On the central generation of locomotion in the low spinal cat. *Exp. Brain Res.* 34, 241–261 (1979)
- GRUHN, M., ZEHL, L., and BÜSCHGES, A.: Straight walking and turning on a slippery surface. *J. Exp. Biol.* 212, 194–209 (2009)
- HÄGGLUND, M., DOUGHERTY, K. J., BORGUS, L., ITOHARA, S., IWASATO, T., and KIEHN, O.: Optogenetic dissection reveals multiple rhythmogenic modules underlying locomotion. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 110, 11589–11594 (2013)
- HEDWIG, B.: Control of cricket stridulation by a command neuron: efficacy depends on the behavioral state. *J. Neurophysiol.* 83, 712–722 (2000)
- HEDWIG, B., and MEYER, J.: Auditory information processing in stridulating grasshoppers: tympanic membrane vibrations and neurophysiology. *J. Compar. Physiol. A* 174, 121–131 (1994)
- KATZ, P. S., and HOOPER, S. L.: Invertebrate central pattern generators. *Invertebrate Neurosci.* 2007, 251–279 (2007)
- KIEHN, O.: Decoding the organization of spinal circuits that control locomotion. *Nature Rev. Neurosci.* 17, 224–238 (2016)

- KOZLOV, A. K., KARDAMAKIS, A. A., HELLGREN KOTALESKI, J., and GRILLNER, S.: Gating of steering signals through phasic modulation of reticulospinal neurons during locomotion. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *111*, 3591–3596 (2014)
- KUPFERMANN, I., and WEISS, K. R.: The command neuron concept. *Behav. Brain Sci.* *1*, 3–39 (1978)
- MAINZER, K.: *Symmetrien der Natur: ein Handbuch zur Natur- und Wissenschaftsphilosophie*. Berlin, New York: Walter de Gruyter & Co 1988
- MARDER, E., and BUCHER, D.: Central pattern generators and the control of rhythmic movements. *Curr. Biol.* *11*, R986–996 (2001)
- MARDER, E., BUCHER, D., SCHULZ, D. J., and TAYLOR, A. L.: Invertebrate central pattern generation moves along. *Curr. Biol.* *15*, R685–699 (2005)
- MENTEL, T., CANGIANO, L., GRILLNER, S., and BÜSCHGES, A.: Neuronal substrates for state-dependent changes in coordination between motoneuron pools during fictive locomotion in the lamprey spinal cord. *J. Neurosci.* *28*, 868–879 (2008)
- ORLOVSKY, C. N., DELIAGINA, T. G., and GRILLNER, S.: Neuronal control of locomotion. In: ORLOVSKY, C. N., DELIAGINA, T. G., and GRILLNER, S. (Eds.): *Neuronal Control of Locomotion from Mollusc to Man*. Oxford [u.a.]: Oxford University INC. 1999
- PEARSON, K. G.: Common principles of motor control in vertebrates and invertebrates. *Annu. Rev. Neurosci.* *16*, 265–297 (1993)
- PEARSON, K., EKEBERG, O., and BÜSCHGES, A.: Assessing sensory function in locomotor systems using neuro-mechanical simulations. *Trends Neurosci.* *29*, 625–631 (2006)
- PHILIPSBORN, A. C. VON, LIU, T., YU, J. Y., MASSER, C., BIDAYE, S. S., and DICKSON, B. J.: Neuronal control of *Drosophila* courtship song. *Neuron* *69*, 509–522 (2011)
- PROCHAZKA, A.: Proprioceptive feedback and movement regulation. In: ROWELL, L., and SHEPERD, J. T. (Eds.): *Handbook of Physiology. Section 12. Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*; pp. 87–127. New York: American Physiological Society, 1996
- REICHERT, H.: A tripartite organization of the urbilaterian brain: developmental genetic evidence from *Drosophila*. *Brain Res. Bull.* *66*, 491–494 (2005)
- ROVAINEN, C. M.: Neurobiology of lampreys. *Physiol. Rev.* *59*, 1007–1077 (1979)
- SAUERMOST, R., und FREUDIG, D. R.: *Lexikon der Biologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1999
- SCHILLING, M., HOINVILLE, T., SCHMITZ, J., and CRUSE, H.: Walknet, a bio-inspired controller for hexapod walking. *Biol. Cybern.* *107*, 397–419 (2013)
- TALPALAR, A. E., BOUVIER, J., BORGIUS, L., FORTIN, G., PIERANI, A., and KIEHN, O.: Dual-mode operation of neuronal networks involved in left-right alternation. *Nature* *500*, 85–88 (2013)
- WOSNITZA, A., BOCKEMÜHL, T., DÜBBERT, M., SCHOLZ, H., and BÜSCHGES, A.: Inter-leg coordination in the control of walking speed in *Drosophila*. *J. Exp. Biol.* *216*, 480–491 (2013)

Prof. Dr. Ansgar BÜSCHGES
Institut für Zoologie
Biozentrum Köln
Universität zu Köln
Zülpicher Straße 47b
50694 Köln
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 221 4702607
Fax: +49 221 4704889
E-Mail: ansgar.bueschges@uni-koeln.de

Krebsentstehung als überschießende Wundheilung: Verlust einer wichtigen Balance

Sabine WERNER ML (Zürich, Schweiz)



Zusammenfassung

Die Verletzung adulter Gewebe setzt ein komplexes Wundheilungsprogramm in Gang, das zum Ziel hat, den verletzten Körperbereich wieder herzustellen. Die verschiedenen, an der Wundheilung beteiligten Prozesse, müssen engmaschig reguliert und aufeinander abgestimmt werden, um einen optimalen Heilungsprozess zu ermöglichen. Wundheilungsstörungen stellen ein schwerwiegendes gesundheitliches Problem dar, insbesondere bei alten Menschen, bei Diabetikern und bei Patienten, die mit immunsuppressiven Medikamenten behandelt werden. Andererseits kann Wundheilung auch überschießend sein, was zur Bildung von hypertrophen Narben und Keloiden führt. Interessanterweise wurde postuliert, dass „bösartige Tumoren Wunden sind, die nicht heilen“ (Harold DVORAK 1986) und dass Tumorzellen die Wundheilungsantwort des Wirts kapern, um ihr eigenes Wachstum zu fördern. Im Gegensatz zu heilenden Wunden ist der Prozess bei Krebs jedoch nicht selbst limitierend, und es kommt zu unkontrollierter Zellteilung, zum Eindringen der Tumorzellen in benachbartes Gewebe und schließlich zur Metastasenbildung. Die Parallelen zwischen Wundheilung und Krebs wurden in den letzten Jahren auch auf molekularer Ebene aufgezeigt, und wir und andere Arbeitsgruppen konnten Gene identifizieren und funktionell charakterisieren, die sowohl die Wundheilung als auch die Krebsentstehung beeinflussen. Im Vortrag werde ich einige Beispiele für die bemerkenswerten Parallelen zwischen Wundheilung und Krebs aufzeigen, aber auch wichtige Unterschiede herausheben. Diese Beispiele zeigen, wie der Verlust der empfindlichen Balance, mit der Wundheilungsprozesse austariert sind, zu unkontrolliertem Wachstum und Verlust der Symmetrie führt und damit letztendlich zur Bildung bösartiger Tumoren.

Abstract

Injury to adult tissues initiates a complex wound repair program, which aims to restore the damaged body site. The different events involved in wound repair must be tightly regulated and synchronized to allow an optimal wound healing process. Defects in wound repair constitute a severe health problem, in particular in elderly people, in diabetic patients and in patients treated with immunosuppressive medication. On the other hand, wound healing can be excessive, resulting in the formation of hypertrophic scars and keloids. Interestingly, it has previously been postulated that “cancers are wounds that do not heal” (Harold DVORAK 1986) and that tumour cells hijack the wound healing response of the host to promote their own growth. In contrast to healing wounds, however, the process is not self-limiting in cancer tissue, resulting in uncontrolled cell proliferation, invasion and metastasis. The parallels between wound healing and cancer have recently been verified at the molecular level, and we and others have identified and functionally characterized genes that control the wound healing process, but also the development and progression of malignant cancers. I will present recent examples that demonstrate the remarkable similarities, but also important differences between wounds and cancers. These examples demonstrate how loss of the delicate balance that exists in normally healing wounds promotes uncontrolled growth and loss of the symmetry, ultimately resulting in cancer development.

Was verbindet Wundheilung und Krebsentstehung? Bösartige Tumoren bilden sich oft an Stellen, an denen Gewebe chronisch verletzt sind. Die Verletzung von Geweben spielt eine wichtige Rolle bei der Entstehung bösartiger Erkrankungen, wobei die chronische Entzündung den wichtigsten Risikofaktor darstellt. In den vergangenen Jahren konnten molekulare und zelluläre Mechanismen identifiziert werden, die den Parallelen zwischen Wundheilung und Krebsentstehung zugrunde liegen, und auf einige dieser Mechanismen soll in diesem Artikel eingegangen werden.

1. Wundheilung – ein mehrphasiger und streng regulierter Prozess

Die Verletzung der Haut setzt ein komplexes Wundheilungsprogramm in Gang, das zum Ziel hat, den verletzten Hautbereich wieder herzustellen (Abb. 1).

Bei jeder Wunde, die sowohl die Oberhaut (Epidermis) als auch die Unterhaut/Lederhaut (Dermis) betrifft, kommt es zunächst zu einer Blutung. Die Blutgerinnung führt zu einem transienten Verschluss der Wunde. In das dabei entstehende Fibringerinnsel wandern verschiedene Entzündungszellen ein, insbesondere neutrophile Granulozyten und Makrophagen. Diese sind einerseits essentiell für die Abwehr von eindringenden Krankheitserregern, und andererseits produzieren sie Wachstumsfaktoren, die die nächste Phase der Wundheilung einleiten, in der neues Gewebe gebildet wird. Diese Phase beginnt mit dem Einwandern von Epithelzellen, den Keratinozyten, von der verletzten Epidermis und von verletzten Haarfollikeln am Wundrand. Danach kommt es zu einer massiven Teilung der Wundkeratinozyten, um die verloren gegangenen Zellen zu ersetzen. Dieser Vorgang geht so lange, bis die Wunde wieder mit einer neuen, mehrschichtigen Epidermis bedeckt ist. Während dieser Reepithelialisierungsphase differenzieren die Keratinozyten und bilden wieder unterschiedlich differenzierte Schichten aus, einschließlich der Hornhaut, wodurch die ursprüngliche Barrierefunktion wieder ausgeübt werden kann. Parallel zur Bildung der neuen Epidermis kommt es zur Reparatur der Dermis. Dabei wandern Bindegewebszellen (Fibroblasten) vom Wundrand in das Wundgewebe ein, sowie Vorläuferzellen aus dem Knochenmark, die in der Wunde ebenfalls zu Fibroblasten differenzieren. Diese Bindegewebszellen teilen sich dann und ein Großteil davon differenziert in sogenannte Myofibroblasten, die kontraktile Eigenschaften haben und für die Kontraktion der Wunde verantwortlich sind. Um das neue Gewebe mit Sauerstoff und Nährstoffen zu versorgen, muss es ausreichend durchblutet werden. Dies geschieht durch das Aussprossen von Blutkapillaren am Wundrand, wobei es zur Wanderung und Teilung der Blutgefäßzellen kommt und zur Bildung neuer Kapillaren im Wundgewebe. Dieser als Angiogenese bezeichnete Prozess führt dazu, dass das Wundgewebe (genannt Granulationsgewebe) mit einem neuen Blutgefäßnetzwerk durchzogen wird. Etwas später erfolgt dann auch die Bildung neuer Lymphgefäße im Wundgewebe, was ebenfalls durch Aussprossung aus bestehenden Lymphgefäßen am Wundrand geschieht. An diesen Reparaturprozessen sind auch verschiedene Entzündungszellen beteiligt, die wichtige, für die Reparatur notwendige Faktoren produzieren. Wenn das verletzte Gewebe durch neues Gewebe ersetzt ist, kommt es zu einem Umbauprozess des Bindegewebes, der mehrere Monate dauern kann. Dabei wird die Zellzahl im Granulationsgewebe durch programmierten Zelltod reduziert, und es entsteht eine veränderte extrazelluläre Matrix, die wieder mehr Ähnlichkeit mit der der unverwundeten Haut hat (MARTIN 1997, WERNER und GROSE 2003, GURTNER et al. 2008, EMING et al. 2014, WERNER et al. 2014).

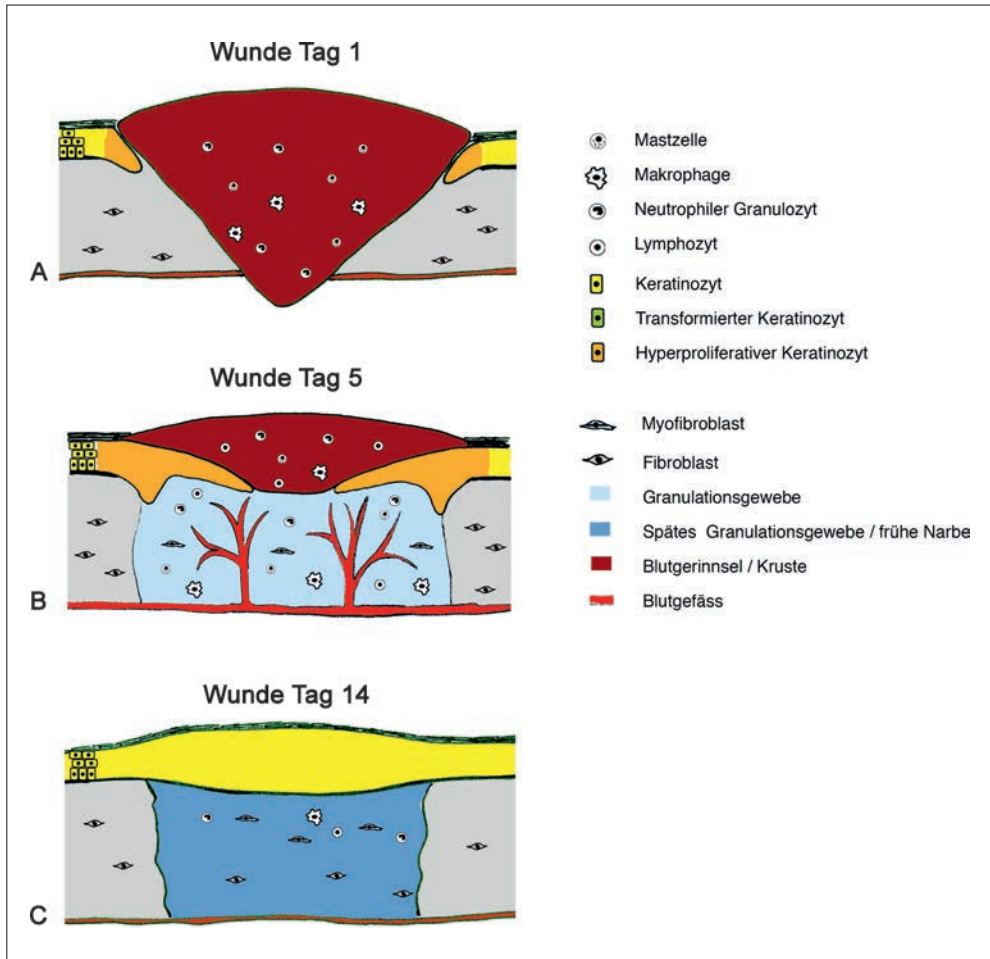


Abb. 1 Die verschiedenen Phasen der Wundheilung. (A): Die Entzündungsphase. 1–3 Tage nach Hautverletzung ist die Wunde mit einem Blutgerinnsel aus Fibrin gefüllt, und Entzündungszellen sind in die Wunde eingewandert. (B): Die Phase der Bildung von neuem Gewebe. 3–10 Tage nach Hautverletzung findet man viele Makrophagen und neue Blutgefäße in der Wunde. Fibroblasten wandern ein, teilen sich und lagern extrazelluläre Matrix ab. Ein hoher Prozentsatz der Fibroblasten differenziert in kontraktile Myofibroblasten. Das neue Gewebe, das die Wunde ausfüllt, wird Granulationsgewebe genannt. Am Wundrand wandern Keratinozyten von der verletzten Epidermis und von Haarfollikeln in die Wunde ein und teilen sich, um das Wundepithel zu erneuern. (C): Die Phase der Gewebsumbildung. 1–2 Wochen nach Verletzung ist die Wiederbedeckung der Wunde mit Epithel abgeschlossen. Die Zellzahl in der Wunde wird nach und nach reduziert und das Bindegewebe wird umgebaut. Dies führt zur Bildung einer Narbe, die durch reduzierte Reißfestigkeit und Elastizität verglichen mit normaler Haut gekennzeichnet ist und der alle Anhangsgebilde wie Haare, Schweiß- und Talgdrüsen fehlen. Abbildung aus SCHÄFER und WERNER 2008. Mit Bewilligung von SpringerNature.

2. Narbenbildung – ein klinisches Problem bei Kindern und Erwachsenen

Obwohl der Wundheilungsprozess in den meisten Fällen problemlos verläuft, bleibt bei Verletzungen, die auch die Dermis umfassen, immer eine Narbe zurück. Das Narbengewebe hat eine, verglichen mit normaler Haut, reduzierte Reißfestigkeit und Elastizität. Zudem können die Hautanhangsgebilde (Haare, Nägel, Talg- und Schweißdrüsen) nicht regenerieren, sodass diese im Narbengewebe fehlen. Dies ist insbesondere bei großflächigen Narben problematisch, da hierdurch die Temperaturregulation gestört ist. Großflächige Narben sind daher nicht nur ein ästhetisches, sondern häufig auch ein funktionelles Problem. Bei einigen Patienten sind die Narben auch besonders stark ausgeprägt (hypertrophe Narben), und sie können sogar den ursprünglichen Wundbereich überschreiten, was bei Keloiden – gutartigen Bindegewebswucherungen – der Fall ist (GURTNER et al. 2008, EMING et al. 2014). Interessanterweise erfolgt die Wundheilung in Embryos von Nagetieren und Menschen bis zum Ende des zweiten Trimesters ohne Narbenbildung. Die dafür verantwortlichen Mechanismen sind nur unvollständig verstanden, aber die reduzierte Entzündungsreaktion im Embryo wird zumindest teilweise dafür verantwortlich gemacht. In der Zukunft wird es wichtig sein, die molekularen und zellulären Mechanismen zu identifizieren, die für die narbenfreie Wundheilung in Embryos verantwortlich sind. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung von Strategien für die Verhinderung der Narbenbildung bei Kindern und Erwachsenen.

3. Wundheilung versus Regeneration

Während Säugetiere, einschließlich des Menschen, den oben beschriebenen Wundheilungsprozess durchlaufen, der zur Bildung von Narbengewebe führt, können einige niedrigere Organismen, wie z. B. Amphibien, Planarien und Hydra, ganze Körperteile komplett regenerieren. Dies funktioniert sogar nach Amputation des Kopfes, der Gliedmaßen oder des Schwanzes. Bei diesen Organismen kommt es nach Amputation zu einer De-Differenzierung der Zellen am Wundrand, die ein sogenanntes Blastem bilden. Diese Zellen teilen sich und differenzieren nach Abheilen der Verletzung wieder vollständig. Ein Teil dieser regenerativen Kapazität ist beim Menschen offenbar erhalten, da unter bestimmten Bedingungen amputierte Fingerkuppen regenerieren können. Die rasche Bildung des Narbengewebes verhindert jedoch vermutlich in den meisten Fällen den Regenerationsprozess (TANAKA und REDDIEN 2011). Eine 2012 erschienene Arbeit zeigt jedoch, dass auch einige Säugetiere eine erstaunliche regenerative Fähigkeit haben. So können bei der Zwergstachelmaus (*African spiny mouse*) größere Hautareale abgestoßen werden, worauf es zur kompletten Regeneration kommt, bei der ein Blastem gebildet wird (SEIFERT et al. 2012). Diese Ergebnisse wecken die Hoffnung, dass mit geeigneten Maßnahmen solche latenten regenerativen Mechanismen auch im Menschen wieder angeschaltet werden können. Daher wird es wichtig sein, die molekularen und zellulären Mechanismen zu identifizieren, die der Regeneration in niedrigen Organismen und den Unterschieden zur Narbenbildung in Säugetieren zugrunde liegen.

4. Das klinische Problem der chronischen Wunden

Während die Bildung von hypertrophen Narben und Keloiden aus einer überschießenden Wundheilung resultiert, ist die Heilung von Wunden häufig verzögert oder sogar ganz verhindert. Bei diesen Patienten bilden sich dann chronische, nicht heilende Geschwüre (Ulcera). Diese führen zu zunehmender Immobilisierung der Patienten und sind mit Schmerzen, schlechtem Geruch und Funktionsverlust des Gewebes verbunden. Chronische Wunden sind besonders häufig bei alten Menschen. Sie können jedoch auch bei jüngeren Menschen auftreten, insbesondere nach bakterieller Infektion von Operations- oder Verbrennungswunden, nach Behandlung mit anti-inflammatorischen Steroiden oder Chemotherapeutika, oder bei Stoffwechselerkrankungen (insbesondere Diabetes, Gefäßerkrankungen oder Autoimmunerkrankungen) (SEN et al. 2009). Chronische Wunden sind schwer behandelbar und verursachen hohe Kosten im Gesundheitswesen (EMING et al. 2014, SEN et al. 2009), sodass neue Diagnose- und Therapiemöglichkeiten dringend benötigt werden.

5. Parallelen zwischen Wundheilung und Krebs

Eine gefürchtete Komplikation von chronischen Wunden ist die Krebsentstehung im Wundbereich. Offensichtlich ist das Wundmilieu für das Wachstum bösartiger Tumoren förderlich (SCHÄFER und WERNER 2008, WERNER et al. 2014). Dieser Zusammenhang wurde bereits durch Rudolf VIRCHOW im Jahr 1863 erkannt, der postulierte, dass „chronische Reizungen und vorausgehende Verletzungen die Tumorbildung fördern“. Diese These wurde von Sir Alexander HADDOW 1972 aufgegriffen, der „Tumorbildung als mögliche überschießende Wundheilung“ bezeichnete (HADDOW 1972). Schließlich postulierte Harald DVORAK 1986, „dass Tumoren Wunden sind, die nicht heilen“, und dass „Tumoren die Mechanismen der Wundheilung ausnützen, um ihr eigenes Wachstum zu fördern“ (DVORAK 1986). DVORAK konnte dabei eine Reihe zellulärer Gemeinsamkeiten zwischen Wunden und bösartigen Tumoren identifizieren, was durch nachfolgende Forschungsarbeiten zahlreicher Wissenschaftler bestätigt und ergänzt wurde. Zu diesen Gemeinsamkeiten gehören beispielsweise die Bildung eines Fibringerinnsels, die Ablagerung von Bindegewebe, die Entzündungsreaktion, die Bildung neuer Blut- und Lymphgefäße und die verstärkte Zellteilung (Abb. 2). Im Gegensatz zu heilenden Wunden ist der Prozess bei Krebs jedoch nicht selbst limitierend, und es kommt zu unkontrollierter Zellteilung, zum Eindringen der Tumorzellen in benachbartes Gewebe und schließlich zur Metastasenbildung.

Parallelen zwischen Wundheilung und Krebs wurden in den letzten Jahren auch auf molekularer Ebene nachgewiesen. So konnte gezeigt werden, dass das Genexpressionsprofil von bösartigen Tumoren dem von Hautwunden sehr ähnelt. Dies kann diagnostisch genutzt werden, da in einigen Studien gezeigt wurde, dass das Genexpressionsprofil eines Tumors, das dem einer Wunde besonders stark ähnelt, mit einer schlechten Prognose des Tumors einhergeht. In jedem Fall zeigen diese Untersuchungen, dass Gene, die durch Hautverletzung reguliert werden und die bei der Wundheilung eine Rolle spielen, auch für die Bildung bösartiger Tumoren höchst relevant sind (SCHÄFER und WERNER 2008). Daher ist es ein wichtiges Ziel der Forschung, diese Gene zu identifizieren und funktionell zu charakterisieren. Besonders interessant sind hierbei auch die wenigen Gene, die in Tumoren und Wunden unterschiedlich reguliert werden. Diese sind vermutlich wichtig für das unkon-

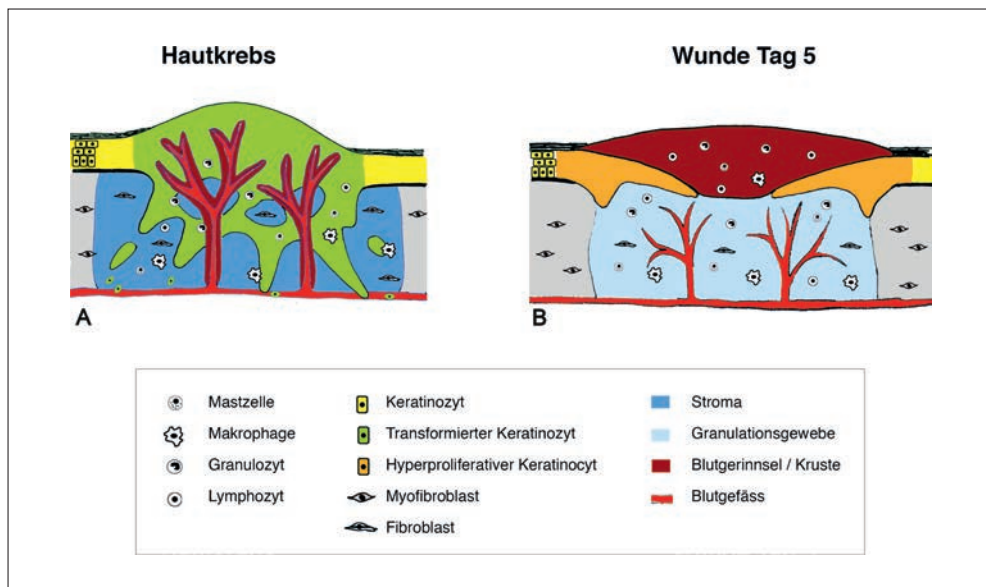


Abb. 2 Zelluläre Parallelen zwischen einem Hautkrebs und einer Hautwunde. Schematische Darstellung eines bösartigen Hauttumors (epithelialer Hautkrebs; A) und einer Hautwunde (B) während der Phase der Gewebsneubildung. Beide Gewebe sind gekennzeichnet durch die Anwesenheit eines Fibringerinnsels, von Entzündungszellen (neutrophile Granulozyten, Makrophagen, Lymphozyten, Mastzellen), neuen Blut- und Lymphkapillaren, und einer großen Zahl an Fibroblasten und Myofibroblasten. Dies sind Komponenten des Wundgranulationsgewebes, das große Ähnlichkeiten mit dem Tumorstroma aufweist. Zudem findet man wandernde und sich teilende Keratinozyten in der Wunde und im Krebs, wobei die Zellen im Krebs durch Mutationen maligne sind und invasiv wachsen. Dies ist der Hauptunterschied zwischen bösartigen Tumoren und Wunden. Abbildung aus SCHÄFER und WERNER 2008. Mit Bewilligung von SpringerNature.

trollierte Wachstum von Tumorzellen und könnten neue Angriffspunkte für die Entwicklung von Pharmaka darstellen, die die Krebsentstehung hemmen, ohne die Wundheilung zu beeinträchtigen. Die Identifizierung von Genen und den von diesen kodierten Proteinen, die in Wunden und/oder malignen Tumoren gleichermaßen oder gegenläufig reguliert sind, wurde in den letzten Jahren durch zahlreiche neue Technologien wie RNA-Sequenzierung und *Proteomics* ermöglicht. Insbesondere konnte die Funktion dieser Gene bei Wundheilung und Tumorbildung durch Untersuchungen an genetisch veränderten Mäusen in vielen Fällen aufgeklärt werden. Ein repräsentatives Beispiel aus unserer eigenen Forschung ist Activin A, ein Regulator der Wundheilung und der Hautkrebsbildung (ANTSIFEROVA und WERNER 2012).

6. Die Rolle von Activin bei der Wundheilung und der Hautkrebsentstehung – ein Beispiel für die Parallelen zwischen diesen beiden Prozessen

Activine sind Mitglieder der sogenannten *Transforming growth factor* β -Familie von Wachstums- und Differenzierungsfaktoren, die zunächst durch ihre wichtige Funktion bei der Embryonalentwicklung bekannt wurden. Unsere Arbeitsgruppe konnte vor vielen

Jahren zeigen, dass Activin A, ein Subtyp der Activine, nach Hautverletzung sowohl in der Maus als auch im Menschen in besonders großen Mengen gebildet wird. Dabei wird Activin insbesondere von Keratinozyten sezerniert, aber auch von einigen anderen Zelltypen in der Wunde. Versuche mit genetisch veränderten Mäusen, die den Activin-Antagonisten Follistatin in der Haut verstärkt bilden, zeigten die wichtige Funktion der Activin-Induktion in der Wunde. Nach Blockade des endogenen Activins durch Follistatin war die Wundheilung in diesen Tieren nämlich stark verlangsamt. Dies führte zu der Frage, ob eine weitere Erhöhung der Activinmenge im Wundgewebe die Wundheilung beschleunigen kann. Daher generierten wir genetisch veränderte Mäuse, deren Keratinozyten vermehrt Activin A bilden. Während die verstärkte Activinbildung in normaler Haut keine oder nur geringfügige Konsequenzen hatte, war die Wundheilung in diesen Tieren in der Tat deutlich beschleunigt. Allerdings hatten diese Tiere auch ein etwas vergrößertes Narbengewebe (ANTSIFEROVA und WERNER 2012 und unveröffentlichte Daten). Dies zeigt, dass eine transiente Erhöhung der Activinmenge in der Wunde eine positive Auswirkung hat, während eine längerfristige Erhöhung auch Nachteile mit sich bringt. Aufgrund der wichtigen Parallelen zwischen Wundheilung und Krebs untersuchten wir, ob Activin auch in Hauttumoren verstärkt gebildet wird. In der Tat konnten wir in bösartigen epithelialen Hauttumoren des Menschen (Basalzellkarzinome und Spindelzellkarzinome) eine deutlich erhöhte Activinbildung nachweisen. Dies hat vermutlich wichtige Konsequenzen, wie unsere Untersuchungen am Mausmodell zeigen. Hierbei wurden die genetisch veränderten Mäuse, die vermehrt Activin in der Haut bilden, einem Protokoll unterzogen, das zur Bildung von gutartigen Hauttumoren führt. Dabei entwickelten diese viel rascher als Kontrolltiere Tumoren, und die Zahl der Tumoren war auch deutlich erhöht. Eine histologische Untersuchung zeigte, dass die Tumoren, die sich unter erhöhten Activinmengen bilden, häufig bösartig wurden, während dies bei Kontrolltieren nur sehr selten der Fall war. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine verstärkte Activinbildung allein keine Tumoren auslöst. Wenn jedoch ein Tumor-induzierender Stimulus hinzukommt, der zu Mutationen der Keratinozyten führt, verstärkt Activin die Tumorbildung und die maligne Entartung von bestehenden gutartigen Tumoren. Interessanterweise wirkt dabei Activin nicht auf die Tumorzellen selbst, sondern es beeinflusst Zellen im Tumorstroma, wie z. B. viele Entzündungszellen. Dadurch werden diese Entzündungszellen so umprogrammiert, dass sie die Tumorbildung und deren bösartige Entartung fördern (ANTSIFEROVA et al. 2011, ANTSIFEROVA und WERNER, 2012). Diese Ergebnisse lassen hoffen, dass Hemmstoffe gegen Activin zur Prävention und/oder Therapie von epitheliale Hautkrebs eingesetzt werden können, zumal solche Activin-Inhibitoren bereits in klinischen Studien für die Behandlung anderer Erkrankungen sind (ANTSIFEROVA und WERNER, 2012). Allerdings muss beachtet werden, dass dies voraussichtlich auch zu einer Beeinträchtigung der Wundheilung führt. Derartige Fragestellungen müssen in der Zukunft untersucht werden, wobei Mausmodelle zunächst wieder ein wichtiger Ansatz sein werden.

Am Beispiel von Activin wird deutlich, dass Faktoren, die auf die Wundheilung Einfluss nehmen, gleichzeitig auch eine wichtige Funktion bei der Krebsentstehung haben. Untersuchungen zu den Parallelen zwischen Wundheilung und Krebs, aber mehr noch die Identifizierung der wenigen, aber wesentlichen Unterschiede, sind eine große Herausforderung für die Zukunft. Es besteht aber die realistische Hoffnung, dass sich daraus neue Möglichkeiten zur effizienten Behandlung von schlecht heilenden Wunden und Krebs-erkrankungen ergeben.

Literatur

- ANTSIFEROVA, M., HUBER, M., MEYER, M., PIWKO-CZUCHRA, A., RAMADAN, T., MACLEOD, A. S., HAVRAN, W. L., DUMMER, R., HOHL, D., and WERNER, S.: Activin enhances skin tumorigenesis and malignant progression by inducing a pro-tumourigenic immune cell response. *Nature Commun.* 2, 576 (2011)
- ANTSIFEROVA, M., and WERNER, S.: The bright and the dark sides of activin in wound healing and cancer. *J. Cell Sci.* 125, 3929–3927 (2012)
- DVORAK, H. F.: Tumors: wounds that do not heal. Similarities between tumor stroma generation and wound healing. *New Engl. J. Med.* 315, 1650–1659 (1986)
- EMING, S. A., MARTRIN, P., and TOMIC-CANIC, M.: Wound repair and regeneration: mechanisms, signaling, and translation. *Sci. Transl. Med.* 6, 265sr6 (2014)
- HADDOW, A.: Molecular repair, wound healing, and carcinogenesis: tumor production a possible overhealing? *Adv. Cancer Res.* 16, 181–234 (1972)
- GURTNER, G. C., WERNER, S., BARRANDON, Y., and LONGAKER, M. T.: Wound repair and regeneration. *Nature* 453, 314–321 (2008)
- MARTIN, P.: Wound healing-aiming for perfect skin regeneration. *Science* 276, 75–81 (1997)
- SCHÄFER, M., and WERNER, S.: Cancer as an overhealing wound: an old hypothesis revisited. *Nature Rev. Mol. Cell Biol.* 9, 628–638 (2008)
- SEIFERT, A. W., KIAMA, S. G., SEIFERT, M. G., GOHEEN, J. R., PALMER, T. M., and MADEN, M.: Skin shedding and tissue regeneration in African spiny mice (*Acomys*). *Nature* 489, 561–565 (2012)
- SEN, C. K., GORDILLO, G. M., ROY, S., KIRSNER, R., LAMBERT, L., HUNT, T. K., GOTTRUP, F., GURTNER, G. C., and LONGAKER, M. T.: Human skin wounds: a major and snowballing threat to public health and the economy. *Wound Repair Regen.* 17, 763–771 (2009)
- TANAKA, E. M., and REDDIEN, P. W.: The cellular basis for animal regeneration. *Dev. Cell* 21, 172–185 (2011)
- VIRCHOW, R.: Aetiologie der neoplastischen Geschwulste/Pathogenie der neoplastischen Geschwulste. Berlin: Verlag von August Hirschwald 1863
- WERNER, S., ANTSIFEROVA, M., and SMOLA, H.: Skin wound healing. In: McMANUS, L. M., and MITCHELL, R. N. (Eds.): *Pathobiology of Human Disease*; pp. 550–557. San Diego: Elsevier 2014
- WERNER, S., and GROSE, R.: Regulation of wound healing by growth factors and cytokines. *Physiol. Rev.* 83, 835–870 (2003)

Prof. Dr. Sabine WERNER
Institute of Molecular Health Sciences
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Hönggerberg, HPL F12
8093 Zürich
Schweiz
Tel.: +41 44 633 3941
Fax: +41 44 633 11 74
E-Mail: sabine.werner@biol.ethz.ch

Symmetrie als strukturelles Prinzip des Denkens in der Moderne

Rainer Warning zum 80. Geburtstag zugeeignet

Andreas KABLITZ ML (Köln)



Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird der Versuch unternommen, das Prinzip der „Symmetrie“ als ein spezifisches Merkmal des Denkens der Moderne nachzuweisen. Demnach kennzeichnen diese Epoche nicht jeweils bestimmte theoretische Positionen, vielmehr wird die Konkurrenz symmetrisch einander korrespondierender, gegensätzlicher Positionen zu einer Signatur der Moderne.

Dieser These wird in drei theoretischen Bereichen: der Geschichte, der Kunst und des Denkens nachgegangen. Innerhalb des ersten Bereiches wird die Kontroverse zwischen dem Verständnis von Geschichte in der Geschichtsphilosophie einerseits und demjenigen des Historismus andererseits dargelegt, zwischen der Annahme eines logischen Verlaufs der Geschichte und der dazu gegenteiligen Annahme einer Abfolge voneinander unabhängiger epochaler Ordnungen der Kultur. Im Bereich der Kunst wird die These im Hinblick auf den symmetrischen Gegensatz zwischen dem Prinzip der Autonomie und Selbstbezüglichkeit der schöpferischen Gestaltung, deren Vordenker KANT ist, und der marxistischen Widerspiegelungstheorie, nach welcher die Kunst das Gegebene abzubilden habe, untersucht. Im Bereich des Denkens werden schließlich beispielhaft die symmetrisch-entgegengesetzten Positionen von HEGEL und SCHOPENHAUER vorgestellt. Während jener im Rahmen seiner Geiststheorie eine Versöhnung zwischen der Erkenntnis und ihrem Gegenstand, zwischen der Vernunft und der Natur verkündet, postuliert dieser die radikale Trennung von Vernunft und Wirklichkeit. In einem abschließenden Blick auf DESCARTES wird eine Erklärung für diese Struktur der Symmetrie des Gegensätzlichen im Denken der Moderne vorgeschlagen.

Abstract

The present article attempts to demonstrate the principle of “symmetry” as a specific feature of modern thought. In this sense, the modern era is not characterized by single theoretical positions, but it is rather the competition between symmetrically corresponding, antithetic positions which determines its intellectual profile.

This thesis is examined in three theoretical fields: history, art and thought. In relation to the first field, the article presents the controversy between the understanding of history within philosophy of history on the one hand and its conception in historicism on the other hand, between the idea of a logical development of the course of history and the opposite idea of a succession of independent epochal cultural orders. In the field of art, the principle of a general coexistence of symmetrical conceptual oppositions is investigated by a comparison between the idea of autonomy and self-reference of the artistic creation, for which KANT is a guiding intellectual, and the Marxist *Widerspiegelungstheorie*, according to which art has to reproduce a preexisting reality. In the field of thought itself, finally, the symmetrically opposite philosophical positions of HEGEL and SCHOPENHAUER are examined. While the first of these proclaims a reconciliation of knowledge with its object, of reason with nature, the second philosopher postulates a radical division between reason and reality. The conclusion of the article is dedicated to an explanation of the specific profile of modern thought, analyzed in this article, by a brief look to DESCARTES' philosophy.

1. Symmetrie als strukturelles Prinzip des Denkens in der Moderne

Symmetrie als strukturelles Prinzip des Denkens in der Moderne: Dieser Titel zeigt an, dass in den folgenden Überlegungen ‚Symmetrie‘ nicht als eine Eigenschaft von bestimmten Gegenständen wissenschaftlicher Untersuchungen, sondern als ein Prinzip des Denkens verstanden wird. Es geht mir um den Nachweis, dass dieses Prinzip für eine bestimmte Phase des Denkens der westlichen Kultur grundlegende Bedeutung besitzt. Mir scheint vor allem ein Merkmal des Denkens der Moderne darin zu bestehen, dass zu den von ihr entwickelten Konzepten häufig, wo nicht in aller Regel, genau eine symmetrisch entsprechende Gegenposition existiert.

Dieser Umstand ist von erheblicher Tragweite für das intellektuelle Profil der Moderne. Denn kennzeichnend für sie sind aus diesem Grund nicht jeweils bestimmte theoretische Positionen. Weit eher macht die Konkurrenz von symmetrisch einander korrespondierenden, gegensätzlichen Positionen ihre geistige Signatur aus. Ich werde diese These im Folgenden vor allem für drei theoretische Kontexte verfolgen und ihr anhand der unterschiedlichen Konzepte der *Geschichte*, der *Kunst* und schließlich des *Denkens* selbst nachgehen. Dieser letzte thematische Komplex wird uns am Ende unserer Überlegungen auch die Möglichkeit einer Antwort auf die Frage bieten, warum gerade die Moderne eine solche Affinität zum Nebeneinander von antithetischen Positionen besitzt, die sich spiegelbildlich entsprechen.

2. Konzepte der Geschichte

Zu den Äußerungen, die aus dem großen Umbruchjahr 1989 im Gedächtnis haften geblieben sind, gehört ein Satz des damaligen Generalsekretärs des Zentralkomitees der KPdSU, Michail GORBATSCHOW. Anlässlich seines Besuchs zum 40. Jahrestag der Gründung der DDR am 6. Oktober in Ost-Berlin soll er gesagt haben: „Wer zu spät kommt, den bestraft das Leben.“ An der Authentizität dieses Satzes sind Zweifel angemeldet worden. Verbürgt ist etwa die Formulierung: „Wenn wir zurückbleiben, bestraft uns das Leben sofort“ aus GORBATSCHOWS Rede vor dem Politbüro der SED.¹ Aber wie immer es um den genauen Wortlaut bestellt sein mag, für unseren Zusammenhang tut das nicht viel zur Sache. Was uns hier vielmehr interessieren soll, ist die genaue Bedeutung des Begriffs *Leben* in diesem berühmt, ja sprichwörtlich gewordenen Satz.

Augenscheinlich benutzt GORBATSCHOW in seiner bekannten Äußerung dieses Wort weder im Sinne biologischen Lebens, noch bezieht er es auf die Biographie eines einzelnen Menschen. Gleichwohl bedient er sich dieser zweiten uns geläufigen Bedeutung des Begriffs, um daraus eine weitere zu bilden. Denn nicht ein individuelles, sondern ein kollektives Leben ist damit nun bezeichnet.

In der Formulierung aus GORBATSCHOWS Rede vor dem Politbüro wird dies unmittelbar ersichtlich, benutzt er bei dieser Gelegenheit doch den Plural „wir“. Der Kontext seiner Äußerung aber legt auch im Fall des berühmt gewordenen Wortlauts nahe, dass er sich auf das Leben einer Gemeinschaft, ja der menschlichen Gemeinschaft schlechthin bezieht. Denn sein Satz richtet sich an die politischen Führer der DDR, die er zu bislang versäum-

1 Vgl. dazu die Tageszeitung *Die Welt* vom 6. 10. 2014.

ten Veränderungen in ihrem Staat bewegen möchte. Um ihnen die Dringlichkeit ihres Handelns vor Augen zu führen, beruft er sich deshalb auf eine allgemeine Gesetzmäßigkeit, die keinen Unterschied zwischen dem Leben von Individuen und demjenigen von Institutionen kennt. Der Begriff des Lebens nähert sich deshalb einem anderen an: dem Begriff der *Geschichte*. GORBATSCHOW hätte also durchaus auch sagen können: ‚Wer zu spät kommt, den bestraft die Geschichte.‘ Doch indem er sprachlich die Geschichte durch das Leben ersetzt, verleiht er dem Verlauf der Geschichte den Eindruck einer in der Natur der Sache liegenden Unumkehrbarkeit und Zwangsläufigkeit, die die Staatsspitze der DDR umso deutlicher zu sofortigen Maßnahmen ermuntern soll.

Nicht nur der Generalsekretär der KPdSU bediente sich des Begriffs der *Geschichte* im Zusammenhang mit den Ereignissen, die man seit geraumer Zeit unter dem – übrigens von Egon KRENZ geprägten – Begriff der *Wende* bezeichnet. Im Umgang mit dem Begriff der *Geschichte* war GORBATSCHOWS Verhandlungspartner auf deutscher Seite, Bundeskanzler Helmut KOHL, noch sehr viel entschiedener. In seiner Ansprache vor der damals noch in Trümmern liegenden Dresdner Frauenkirche sagte er am 19. Dezember 1989: „Mein Ziel bleibt, wenn die geschichtliche Stunde es zuläßt, die Einheit unserer Nation.“² Noch am Ende des 20. Jahrhunderts also bleibt die *Geschichte* eine relevante Bezugsgröße für den Umgang mit jedenfalls bedeutsamen politischen Ereignissen.

Das Konzept der Geschichte, auf das sich beide, GORBATSCHOW wie KOHL, in ihren Worten berufen, ist gemessen an der Zeitspanne der westlichen Kultur insgesamt verhältnismäßig jungen Datums. Erst seit dem späteren 18. Jahrhundert bürgert sich die *Geschichte* als ein Konzept ein, unter das sich die Wechselfälle der Menschheit und ihrer Entwicklung, soweit wir schriftliche Zeugnisse über sie besitzen, in ihrer Gesamtheit subsumieren lassen.³ In einer glücklichen Formulierung hat der Historiker Reinhart KOSELLECK einmal vom *Kollektivsingular* der Geschichte im Blick auf ein solches Verständnis von ihr gesprochen.⁴ Man könnte auch sagen: Bis dahin gab es Geschichten nur im Plural, weil eine Geschichte immer die Geschichte *von* etwas war: Die *Geschichte des Peleponnesischen Krieges* bei THUKYDIDES, die *Geschichte der Langobarden* aus der Feder des Mönchs PAULUS DIACONUS oder die von VOLTAIRE verfasste *Geschichte des Jahrhunderts Ludwigs XIV.*, um nur drei prominente Beispiele aus Antike, Mittelalter und Neuzeit zu zitieren. Seit dem Ausgang des 18. Jahrhunderts aber gibt es neben solchen Geschichten *von* etwas auch die Geschichte *als solche*. Und die Verwendung dieses Begriffs geht mit dem Anspruch einher, dass sich alle anderen Geschichten unter die eine Geschichte, die Geschichte an sich, subsumieren lassen.

Die damit verbundene Veränderung beschränkt sich allerdings nicht auf eine solche „Kollektivierung“. Zu den Implikationen dieser Verwandlung der (vielen) Geschichten in die (eine) Geschichte gehört es auch, dass die solchermaßen verstandene Geschichte nun zu einem *Konzept* wird. Sie ist nicht mehr nur eine Form der Darstellung, ein Erzählen von Vergangenheit, sondern das *Konzept* der Geschichte setzt die Existenz von Eigenschaften voraus, die die Geschichte *selbst* und die sie *insgesamt* auszeichnen. Die vielleicht

2 Vgl. DIEKMANN 2001, S. 62.

3 Als sich dieses Konzept von Geschichte entwickelt, steht außer Frage, dass sich der Begriff nur für jene Phase der Menschheitsentwicklung benutzen lässt, für die wir über schriftliche Zeugnisse verfügen. Diese Einschränkung wird inzwischen mit guten Argumenten vor allem aus archäologischer Sicht in Frage gestellt. Vgl. PARZINGER 2015, S. 12.

4 Vgl. KOSELLECK 1992, S. 50–51.

bedeutsamste Konsequenz dieser Veränderung aber besteht darin, dass die Geschichte damit auch zu einem Akteur, zu einem Subjekt der Wechselfälle gerät, die den Lauf der Menschheitsentwicklung ausmachen und bestimmen. Unsere beiden von GORBATSCHOW und KOHL zitierten Sätze lassen dies unmittelbar deutlich werden. Denn sie billigen der Geschichte, alias dem Leben, eine ihr zugehörige *agency*, wie man seit geraumer Zeit zu sagen pflegt, also eine genuine Handlungsmacht zu: bei GORBATSCHOW in Gestalt von Sanktionen für diejenigen, die ihre Prinzipien missachten; in KOHLS Worten durch die Gelegenheiten, die sie bietet oder versagt. Geschichte bezieht sich einem solchen Verständnis zufolge auch keineswegs nur mehr auf die Vergangenheit. Ihre Eigenschaften bestimmen vielmehr den Verlauf der Geschichte schlechthin, sie determinieren Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.

Um eben dieses Konzept von Geschichte aber gibt es von Anfang an eine Kontroverse. Der Streit über die Natur der Geschichte ist also ungefähr so alt wie die Vorstellung von ihrer Existenz selbst. Die beiden Lager, die sich bei dieser Auseinandersetzung gegenüberstehen, lassen sich mit Hilfe zweier Begriffe recht genau identifizieren. Sie lauten: *Geschichtsphilosophie* und *Historismus*. Das Grundproblem, um das die Kontroverse zwischen beiden Positionen kreist, besteht in der Frage, ob sich für die Geschichte eine konstante Gesetzmäßigkeit ihres Ablaufs, ein durchgängiges Prinzip ihres Verlaufs angeben lässt oder nicht. Die Geschichtsphilosophie behauptet, der Historismus bestreitet dies.

Beginnen wir bei unserem kurzen Abgleich der beiden Konzepte von Geschichte mit dem erstgenannten. Denn nicht nur stellt der Historismus im Grunde eine Reaktion auf die Geschichtsphilosophie dar. In Gestalt jener Variante, die der dialektische Materialismus für sie entwickelt hat, hat sie zudem einen gewaltigen Einfluss auf den Lauf der Dinge selbst genommen und die Geschichte des 20. Jahrhunderts maßgeblich bestimmt. Manche haben ihr sogar einen unmittelbaren Einfluss auf politische Entscheidungen zugesprochen. So behauptet der britische Historiker Orlando FIGES, der Petersburger Arbeiter- und Soldatenrat hätte schon im Februar 1917 die Möglichkeit gehabt, die (ganze) Macht im zerfallenden Zarenreich zu ergreifen; doch hätte er davon Abstand genommen, weil insbesondere die Parteidoktrin der Menschewiki, getreu der marxistischen Geschichtstheorie, zwischen dem feudalen Zeitalter und der Herrschaft des Proletariats eine bürgerliche Phase verlangt habe.⁵ Aber wie dem auch sei, an der Geschichtsmächtigkeit der marxistischen Geschichtsphilosophie und damit der Geschichtsphilosophie selbst dürfte kein ernsthafter Zweifel bestehen.

Die wohl geläufigste Form, in der die Geschichtsphilosophie uns bis auf den heutigen Tag in unserem Alltag begegnet, ist die Vorstellung vom Fortgang der Geschichte als einem konstanten Fortschritt. Im Laufe der Geschichte hat sich, dieser Auffassung zufolge, die Menschheit mehr und mehr vervollkommnet, technisch und intellektuell, und wie einige, ausgesprochen optimistisch, meinen, auch moralisch. Es genügt ein Blick in manchen Werbespot, um sich der andauernden Aktualität eines solchen Fortschrittsdenkens zu vergewissern. „Neu!“ lautet der suggestive Ruf, mit dem das soeben auf den Markt gekommene Produkt verheißungsvoll angepriesen wird – als verbürge schon allein dieser Umstand, dass es allen bisherigen Erzeugnissen derselben Branche überlegen sei. Aber was eigentlich garantiert uns, dass etwas, das jüngeren Datums, deshalb auch schon besser ist?

5 FIGES 2014, S. 356 f.

Spätestens seit der Mitte des 20. Jahrhunderts ist die Geschichtsphilosophie zum Gegenstand einer sehr grundsätzlichen Kritik geworden.⁶ Vor allem die sogenannte „Postmoderne“ hat sich später den Kampf gegen sie auf ihre Fahnen geschrieben.⁷ Ungeachtet dieser theoretischen Skepsis, aber ist der Glaube an den Fortschritt, aller noch so vehementen Kritik an diesem Konzept zum Trotz, nach wie vor so tief in unserem Bewusstsein verankert, dass man damit vor noch nicht allzu langer Zeit Wahlen gewinnen konnte: *New Labour* und *Neue Mitte* lauteten die erfolgreichen Parolen der englischen und deutschen Sozialdemokraten in den 1990er Jahren, mit denen sie noch einmal gewinnbringend darauf setzten, dass das Neue auch schon das Bessere sei.⁸ Und ebenso unerschütterlich scheint das Prestige des Innovationsprinzips in der Wissenschaft zu sein, so dass mitunter schon die bloße Annonce von Neuem den gewünschten Erfolg einträgt. Wer wollte bestreiten, dass Wissenschaft auf die Produktion von neuem und besserem Wissen angelegt ist, besteht doch eben darin zu weiten Teilen ihre *raison d'être*? Aber weil Innovation so unverzichtbar für wissenschaftliche Exzellenz ist, gerät sie nur allzu leicht zum bloßen Etikett, das exzellente Forschung eher verspricht als verbürgt (wie es ja überhaupt zu den Kuriositäten der jüngeren Wissenschaftsgeschichte zählt, dass das Prädikat „Exzellenz“ in beträchtlichem Ausmaß nicht mehr aufgrund einer Beurteilung durch andere vergeben wird, sondern zu einer Selbstbeschreibung geraten ist). Eine Vorstellung von Fortschritt aber liegt auch jenen beiden Konzepten einer Philosophie der Geschichte zugrunde, auf die im Folgenden ein kurzer Blick geworfen sei: der Geschichtsphilosophie KANTS und HEGELS. Und weil dieser Blick an dieser Stelle nur kurz sein kann, wird es kaum zu vermeiden sein, dass seine Kürze auch eine gewisse Verkürzung mit sich bringt.

Einen konzisen Einblick in KANTS geschichtsphilosophische Vorstellungen bietet sein Aufsatz *Idee zu einer allgemeinen Geschichte in weltbürgerlicher Absicht* aus dem Jahr 1784. Man sieht schon diesem Titel an, wie neu hier noch der Kollektivsingular der Geschichte ist. Denn ausdrücklich spricht KANT von der „allgemeinen Geschichte“. Die Logik des Verlaufs, die er ihr in seiner Schrift bescheinigt, beruht auf der Annahme, dass der einzelne Mensch nicht in der Lage ist, die ihm mitgegebenen Naturanlagen vollständig aus sich selbst heraus zu entwickeln. Um dies zu bewerkstelligen, bedarf es deshalb der *Menschengattung*, die dieses Geschäft erst im Laufe einer langen Zeit zu Ende führen kann. Zu diesem Zweck macht sich die Geschichte die Störungen und Widerstände zu eigen, die sich im Umgang der Menschen miteinander ergeben und mithin einer (vom Planen des einzelnen Menschen unabhängigen) Absicht der Natur folgen. So heißt es ausdrücklich bei KANT:

„Das Mittel, dessen sich die Natur bedient, die Entwicklung aller ihrer Anlagen zu Stande zu bringen, ist der Antagonismus derselben in der Gesellschaft, so fern dieser doch am Ende die Ursache einer gesetzmäßigen Ordnung derselben wird.“⁹

6 Stellvertretend für viele seien zwei prominente Bände genannt, in denen sich eine solche Kritik paradigmatisch zu Wort meldet: MARQUARD 1973, DANTO 1965.

7 Beispielhaft für diese postmoderne Kritik ist LYOTARD 1979.

8 Indessen ist auch für das postmoderne Denken selbst das Festhalten an geschichtsphilosophischen Konzepten zu bemerken, das zu der ausdrücklich vorgetragenen Kritik an dieser Konzeption der Geschichte in einem gleichermaßen eklatanten wie augenscheinlich verkannten Missverhältnis steht. Vgl. hierzu meine soeben erscheinende Monographie KABLITZ 2016.

9 Hier zitiert nach KANT 1983c, Bd. 9, S. 37.

Im Widerstreit der verschiedenen Willensäußerungen der Menschen, die zum Konflikt und deshalb zu steter Neubegründung einer je und je höheren Ordnung zum Zweck einer immer vollständigeren Konfliktregulierung führen, entsteht als Zielpunkt der Menschheitsentwicklung die weltbürgerliche Gesellschaft. Sie garantiert nicht nur dem Einzelnen innerhalb eines Staates, sondern auch den Staaten selbst in einer durch Recht geordneten Weltgemeinschaft, sie garantiert somit jedermann die größtmögliche Freiheit, die gleichbedeutend mit der größtmöglichen Freiheit aller anderen ist. In diesem Sinne spricht KANT der Weltgeschichte einen *Leitfaden a priori* zu.¹⁰

Der besondere Stellenwert, den die Geschichtsphilosophie im Denken HEGELS gewinnt, besteht darin, dass sie im Grunde von der Philosophie selbst gar nicht mehr zu unterscheiden ist. Denn die Vernunft des Menschen ist für ihn wesentlich durch die Entwicklung geprägt, die sie im Laufe der Geschichte des Menschen durchmacht. Indem die Geschichte dadurch mit der Gattungsentwicklung des vernunftbegabten Wesens „Mensch“ zusammenfällt, scheint zugleich garantiert, dass diese Geschichte selbst eine vernünftige ist. Die unvermeidliche Geschichtlichkeit der Vernunft aber besteht für HEGEL darin, dass sie erst durch ihre Entwicklung zu sich selbst kommt. Denn am Beginn steht der Gegensatz von Geist und Natur. Anfänglich findet sich der Geist einer fremden, ihm äußerlichen Natur gegenüber, über die er aufgrund dieser Äußerlichkeit auch keine Macht zu haben scheint. Die Geschichte, die die Vernunft durchläuft, ist deshalb vor allem die Geschichte ihrer Vermittlung, eine Geschichte der Versöhnung von Geist und Natur.

10 „Daß ich mit dieser Idee einer Weltgeschichte, die gewissermaßen einen Leitfaden a priori hat, die Bearbeitung der eigentlich bloß empirisch abgefaßten Historie verdrängen wollte: wäre Mißdeutung meiner Absicht“ (ebenda, S. 49). Deutlich sind in diesem Satz noch einmal die beiden unterschiedlichen Konzeptionen von Geschichte einander gegenübergestellt. Auf der einen Seite steht die traditionelle Vorstellung von der bloß empirisch abgefassten Historie. Sie setzt voraus, dass die *res gestae* der Vergangenheit zur Geschichte erst durch eine *historia rerum gestarum* werden. Dem entgegengesetzt ist ein Konzept von Geschichte, das den *res gestae* selbst ein Ordnungsprinzip, eben einen Leitfaden *a priori* zuspricht. Und wie bereits das vorherige Zitat zu erkennen gab, bedarf dieses Konzept eines Subjekts – einer Instanz, die diesen Leitfaden besitzt und unabhängig von den Handlungsabsichten der einzelnen Menschen und damit auch unabhängig von diesen selbst und gegebenenfalls sogar gegen ihre Absichten durchsetzt. Ich kann der betreffenden Frage hier nicht im Einzelnen nachgehen, will die betreffende Problemstellung indessen kurz andeuten: Im Vergleich zu seiner *Kritik der reinen Vernunft* scheint KANTS Geschichtsphilosophie auf diese Weise eine Annahme über die Natur zu machen, die in einem gewissen Widerspruch zu den dort entwickelten Prinzipien entsteht. Und diese Frage ist umso relevanter, als beide Schriften in etwa gleichzeitig erscheinen. Die erste Auflage der *Kritik der reinen Vernunft* stammt aus dem Jahr 1781 (die zweite von 1787). 1784 erscheint die *Idee zu einer allgemeinen Geschichte in weltbürgerlicher Absicht*. Der angedeutete Widerspruch zwischen beiden Werken aber scheint darin zu bestehen, dass die Annahme von Vernunft als einer Eigenschaft der Natur in der *Kritik der reinen Vernunft* ausschließlich auf unserer Erkenntnis der Natur beruht: Denn sie selbst ist auf vernünftige Prinzipien gegründet, die sie deshalb unweigerlich auch der Natur unterlegen muss. Doch in KANTS geschichtsphilosophischem Entwurf wird die Vernunft zu einer Triebkraft der Natur, die sogar gegen die Absichten des Menschen tätig wird, um ihn unerkannt zur Vervollkommnung seiner Lebensverhältnisse zu lenken. Eine solche Sicht der Vernunft lässt sich indessen nur schwerlich noch mit der Überzeugung verbinden, die Vernunft sei allein ein Mittel der Erkenntnis. Sie wird aus geschichtsphilosophischer Warte unweigerlich zu einem Prädikat der Vernunft selbst, weshalb diese Vernunft hier denn auch zu einem Subjekt des Handelns gerät. Die ansonsten für KANTS kritisches Denken kapitale Unterscheidung zwischen dem Ding an sich und der Erscheinung ist unter solchen Voraussetzungen kaum noch aufrechtzuerhalten. Der Belang dieses Problems besteht nicht zuletzt darin, dass entsprechende Fälle einer latenten Ontologisierung der Vernunft womöglich auch in seinen kritischen Schriften selbst zu bemerken sind, so etwa in der Ästhetik der *Kritik der Urteilskraft*. (Auch darauf kann ich im Rahmen dieses Artikels nicht im Einzelnen eingehen. Vgl. zu der letztgenannten Problematik jedoch KABLITZ 2013.)

Der erste Schritt zu dieser Versöhnung findet mit Hilfe der Kunst statt. Durch seine künstlerische Tätigkeit versieht der Mensch die äußere, materielle Natur mit den Spuren seines Geistes, holt er ihre Materialität durch deren Gestaltung in seinen Geist herein.¹¹ Aber diese Form der Versöhnung von Geist und Natur kann auch nur eine unvollkommene sein.¹² Denn, um sich die Natur anzueignen, ist der Geist noch immer auf Mittel angewiesen, die ihm selbst äußerlich bleiben. So bedarf er zu diesem Zweck etwa der Materie, über die er selbst nicht verfügt. Diese erste Stufe der Vermittlung von Geist und Natur, die in und mit der Kunst stattfindet, wird deshalb zugleich zum Ausgangspunkt ihrer eigenen Überwindung, weil ihre Unvollkommenheit sich nicht übersehen lässt. So weist die Kunst auch den Weg zu der Einsicht, dass der Geist der Natur wahrhaft nur mit seinen eigenen Mitteln habhaft werden kann, nämlich mit dem Begriff. Erst das begriffliche Denken, allem voran die Philosophie selbst, erreicht insofern die vollkommene Versöhnung von Geist und Natur.¹³ Hier ist der Geist bei sich selbst und vermag doch zugleich, die Natur zu erfassen und zu beherrschen.

Beruhet das Selbstverständnis des Geistes also wesentlich auf seiner eigenen Geschichte, die er in der Entwicklung der Menschheit durchläuft, dann ist diese Geschichte zugleich auf Vernunft gegründet. Denn die Selbstfindung des Menschen macht die Geschichte aus. Die Weltgeschichte ist für HEGEL deshalb der Schauplatz der Verwirklichung des Geistes. Dieser Geist ist es deshalb, der ihren Ablauf durch seine Selbstentwicklung in Gang setzt und deren Logik bestimmt. So kann es auch nicht verwundern, dass der Zielpunkt der Geschichte und das Telos der Selbstfindung des Geistes im Grunde identisch sind. Hier wie dort zielt die Geschichte auf Freiheit als ihrem Endzustand. HEGEL sagt ausdrücklich über sie in seinen *Vorlesungen über die Philosophie der Geschichte*: „Die Weltgeschichte stellt nun den *Stufengang* der Entwicklung des Prinzips, dessen *Gehalt* das Bewusstsein der Freiheit ist, dar.“¹⁴

Ein einheitlicher, einem gleichen Prinzip verpflichteter Ablauf ist es also, der aus Sicht der Geschichtsphilosophie die gesamte Geschichte der Menschheit bestimmt.

Eben dagegen wendet sich der sogenannter „Historismus“. Auf den Begriff gebracht hat ihn seinerseits ein berühmter Satz. Er stammt aus der Feder des Historikers Leopold VON RANKE, der selbst zu den maßgeblichen Vertretern des Historismus zählt: „Jede Epoche ist unmittelbar zu Gott, und ihr Wert beruht gar nicht auf dem, was aus ihr hervorgeht, sondern in ihrer Existenz selbst, in ihrem Eigenen selbst.“¹⁵

In der Tat, wenn die Geschichte in der Entwicklung der Menschheit auf ein ihr gestecktes Ziel hin besteht, dann sind alle Epochen, die dem Endzustand vorausgehen, an sich selbst unvollkommen und dienen nur der Vorbereitung dieses idealen Endzustands.

11 So heißt es von dem Geist und seiner Beziehung zur Kunst: „[E]r erzeugt aus sich selbst die Werke der schönen Kunst, als das erste versöhnende Mittelglied zwischen dem bloß Äußerlichen, Sinnlichen und Vergänglichen und dem reinen Gedanken, zwischen der Natur und endlichen Wirklichkeit und der unendlichen Freiheit des begreifenden Geistes.“ (HEGEL 1986b, Bd. 13, S. 21.)

12 „Wenn wir aber der Kunst einerseits diese hohe Stellung geben, so ist andererseits ebensowohl daran zu erinnern, daß die Kunst dennoch weder dem Inhalte noch der Form nach die höchste und absolute Weise sei, dem Geiste seine wahrhaften Interessen zum Bewußtsein zu bringen. Denn eben ihrer Form wegen ist die Kunst auch auf einen bestimmten Inhalt beschränkt.“ (Ebenda, S. 23.)

13 „Der Gedanke und die Reflexion hat die schöne Kunst überflügelt.“ (Ebenda, S. 24.)

14 HEGEL 1986a, Bd. 12, S. 77.

15 VON RANKE 1988, S. 5.

Man könnte, so gesehen, GORBATSCHOWS prominenten Satz auch umkehren: „Wer zu früh kommt, den bestraft das Leben (resp. die Geschichte).“ Denn erst die Spätgeborenen werden in den Genuss einer vollkommen entwickelten Menschheit und ihrer Vorzüge kommen. Genau diesem Prinzip hält der Historismus die Vollgültigkeit und das Eigenrecht einer jeden Epoche entgegen. Geschichte als Wissenschaft nähert sich unter diesen Voraussetzungen in gewisser Weise der Ethnologie an. Denn nicht nur im geographischen Nebeneinander existieren unter dieser Perspektive voneinander unabhängige Kulturen, die jeweils ihre eigenen Ordnungen ausbilden. Gleiches gilt für die Dimension der Zeit. Auch sie ist aus der Sicht des Historismus durch das Nacheinander verschiedener epochaler Ordnungen gekennzeichnet, die jeweils ihren eigenen Prinzipien verpflichtet sind. Es versteht sich, dass in einer solchen Betrachtungsweise der Geschichte für jede Logik einer Evolution kaum ein Platz bleibt.

Auch die Grundprinzipien des Historismus haben bis in die Gegenwart ihre Geltung bewahrt. Zumal in einigen Argumenten der Geschichtskonzeption der sogenannten „Postmoderne“ sind sie neuerdings zu besonderer Aktualität gelangt,¹⁶ wiewohl sich die betreffenden Vertreter eines im Kern historistischen Konzepts der Geschichte dieser Tradition keineswegs immer bewusst waren und sind. Aber auch Michel FOUCAULTS Perspektive auf die Geschichte, wie er sie in seinem Buch *Les mots et les choses*¹⁷ skizziert, ist einem gleichen Prinzip verpflichtet. Halten wir also für den Augenblick fest, dass das Konzept der Geschichte, sobald es als ein solches entsteht, sehr rasch in zwei einander entgegengesetzte und bis auf den heutigen Tag zu keiner Deckung gebrachte Konzepte zerfällt: in die Annahme einer einheitlichen Logik des Verlaufs der Geschichte und die genau gegenteilige Annahme einer Abfolge von miteinander unverbundenen epochalen Kulturen, für die sich keinerlei Logik einer Evolution abzeichnet. Beide Positionen stehen sich deshalb letztlich unversöhnlich gegenüber. Und doch macht erst ihre symmetrische Korrespondenz – und nicht etwa eine der beiden Positionen – das Konzept der Geschichte in der Moderne aus.

3. Konzepte der Kunst

Zu den zahlreichen Attraktionen der österreichischen Hauptstadt gehört eine architektonische Rarität, die zwischen ihren prominentesten Sehenswürdigkeiten – wie dem Stephansdom, Schloss Schönbrunn oder der Karlskirche – fast ein wenig untergeht: das Gebäude der Wiener Secession. Indessen fällt nicht nur das 1897/98 von Joseph Maria OLBRICH errichtete Ausstellungshaus der unter diesem Namen zusammengefassten rebellischen Künstler durch seine avantgardistische Architektur ins Auge. Auch die von Ludwig HEVESI stammende Inschrift über dessen Portal ist bemerkenswert: „Der Zeit ihre Kunst, der Kunst ihre Freiheit“.

„Der Zeit ihre Kunst“, das ist noch einmal ein Zeugnis des Historismus, mit dem wir uns soeben beschäftigt haben. Denn das darin zum Ausdruck gebrachte Prinzip besagt ja, dass jede Zeit ihre, d. h. eine für sie passende, eine ihr gemäße Kunst verdient. Und natürlich ist dieses Prinzip zugleich Programm der Secession, deren Vertreter sich gerade durch eine Abgrenzung gegenüber den Ansprüchen einer – unzeitgemäß gewordenen – Tradition

¹⁶ Vgl. hierzu indessen Anmerkung 8.

¹⁷ FOUCAULT 1966.

auszeichnen, weshalb sie sich um deren Ablösung bemühen. Dass die Angemessenheit der Kunst für ihre (jeweilige) Zeit dabei keinerlei Determinismus unterliegt, gibt der zweite Teil der Inschrift zu Protokoll: „Der Kunst ihre Freiheit“. Aber damit macht diese Formulierung auch genau das namhaft, was weithin als das grundsätzliche Markenzeichen der Kunst in der Moderne gilt: ihre *Autonomie*. Der Moderne, so wird allenthalben angenommen, ist es zu danken, dass sich die Kunst von jeglichen äußeren Bindungen, von der Unterwerfung unter die Macht von Religion und Kirche oder von der Indienstnahme für die Repräsentation der Fürsten, emanzipiert hat, um fortan nur noch ihren eigenen Prinzipien zu gehorchen. Und diese Emanzipation von allen ihr selbst fremden Verpflichtungen findet im Begriff der Autonomie ihren geläufigsten Ausdruck.

Ein Vordenker dieser Autonomie war noch einmal Immanuel KANT. In seiner bereits kursorisch erwähnten dritten Kritik, der *Kritik der Urteilkraft*, hat er einen deutlichen Unterschied zwischen einem logischen Urteil und einem ästhetischen Urteil gemacht. Im Falle eines logischen Urteils wird eine Erscheinung einem Begriff subsumiert. Um es anhand eines höchst simplen Beispiels zu illustrieren: Ein empirisches Urteil lautet etwa: „Dies ist eine Rose.“ Im Falle des ästhetischen Urteils, der Feststellung, dass etwas, also z. B. unsere Rose, schön ist, findet dieses Urteil hingegen ohne Zuhilfenahme eines Begriffs statt. In KANTS eigenen Worten lautet die ebenso ausführliche wie komplexe Definition dieses ästhetischen Urteils wie folgt:

„Also ist ein ästhetisches Urteil dasjenige, dessen Bestimmungsgrund in einer Empfindung liegt, die mit dem Gefühle der Lust und Unlust unmittelbar verbunden ist. Im ästhetischen Sinnes-Urteile ist es diejenige Empfindung, welche von der empirischen Anschauung des Gegenstandes unmittelbar hervorgebracht wird, im ästhetischen Reflexionsurteile aber die, welche das harmonische Spiel der beiden Erkenntnisvermögen der Urteilkraft, Einbildungskraft und Verstand im Subjekte bewirkt, indem in der gegebenen Vorstellung das Auffassungsvermögen der einen und das Darstellungsvermögen der andern einander wechselseitig beförderlich sind, welches Verhältnis in solchem Falle durch diese bloße Form eine Empfindung bewirkt, welche der Bestimmungsgrund eines Urteils ist, das darum ästhetisch heißt und als subjektive Zweckmäßigkeit (ohne Begriff) mit dem Gefühle der Lust verbunden ist.“¹⁸

So umständlich sich diese Definition ausnehmen mag, ihre Ausführlichkeit dient nicht zuletzt ihrer Vollständigkeit und damit vor allem der präzisen Abgrenzung des ästhetischen Urteils gegenüber dem Begriffsurteil. Der entscheidende Unterschied zwischen beiden besteht darin, dass die Beurteilung eines Gegenstandes als „schön“ nicht auf den Merkmalen des schönen Gegenstands beruht, wie dies beim logischen Urteil der Fall ist. Denn hier bestimmen die Eigenschaften des Gegenstands darüber, unter welchen Begriff er fällt. Im Falle der Zuschreibung von Schönheit ist es stattdessen die eigene Empfindung, vorzüglich das Gefühl der Lust, das sich bei der Wahrnehmung des schönen Gegenstands einstellt, welches das ästhetische Urteil zur Grundlage hat. KANT spricht deshalb in den zitierten Worten vom „ästhetischen Reflexionsurteil[e]“; und dies besagt nichts anderes, als dass dieses Urteil selbstbezüglich ist. Im Falle der Feststellung von Schönheit geht der schöne Gegenstand selbst also gänzlich in der Empfindung dessen, der ihn als einen solchen wahrnimmt, auf, ohne dass irgendwelche Merkmale an ihm selbst, die diesen Zustand auslösen, in Betracht kämen. Das Urteil, etwas sei schön, wird auf diese Weise vielmehr zum eben selbstreflexiven Urteil über die eigene Befindlichkeit, die sich infolge der Wahrnehmung eines solchen Objekts einstellt.

18 KANT 1983b, Bd. 8, S. 201 f.

Schon die Grundprinzipien der Erkenntnis des Schönen sind also auf Autonomie, auf die Selbstbezüglichkeit des Menschen angelegt. Sie fußen nicht mehr auf einer Gegenstandsbestimmung, sondern sind selbstbezüglich auf das Erkenntnissubjekt bezogen. Und wenn schon das Naturschöne solchen Bedingungen seiner Erkenntnis unterliegt, gilt eine solche Autonomie *a fortiori* für die Kunst, bei der der Mensch selbst das schöne Erzeugnis hervorbringt. Kunst sagt sich in dieser ästhetischen Theorie demonstrativ von ihrer überkommenen Bestimmung als einer Nachahmung der Natur los. Sie wird eben autonom, ist nur noch den eigenen, von ihr selbst definierten Ansprüchen des Menschen unterworfen. Die Kunst ist diesem Verständnis zufolge ein Reich der Freiheit, diejenige Domäne menschlicher Praxis, in der sie ihre größtmögliche Entfaltung gewinnt. Ja, man könnte sagen, dass die Kunst aus einer solchen Perspektive betrachtet zu jenem Medium wird, in dem die Freiheit des Menschen zum Gegenstand ihres eigenen Genusses gerät.

Es ist dieses Prinzip der Autonomie, das das Verständnis der Kunst und ihres spezifischen Charakters in der Moderne bis auf den heutigen Tag sehr weitgehend bestimmt. Gleichwohl übersieht man bei dieser Verallgemeinerung des betreffenden Kunstverständnisses, dass die Kunst in derselben Moderne ebenso eine genau gegensätzliche Definition erfahren hat. Nirgends ist dies so deutlich wie anhand des, maßgeblich von der marxistischen Ästhetik geprägten, Begriffs der *Widerspiegelung*. „Widerspiegelung“ zeigt eine radikale Abhängigkeit der Kunst von etwas ihr Äußerlichem an. Ihre Aufgabe besteht diesem Konzept zufolge darin, das Gegebene abzubilden. Und wenn eine solche Wiederholung des doch schon Vorhandenen einen Sinn machen soll, dann besteht er darin, dass er das Gegebene, aus marxistischer Sicht: den wahren Zustand der Gesellschaft, als solchen zu Bewusstsein bringen kann und soll. Kunst betreibt insoweit Aufklärung. Aber das gelingt ihr nur, wenn sie sich in die Abhängigkeit von dem jeweils Vorfindlichen begibt, um dabei in einer bloßen, wenn auch nicht wirkungslosen Widerspiegelungsfunktion aufzugehen.

Auch der einzelne Künstler wird auf diesem Weg zu nichts anderem als einem Agenten der je gegebenen Verhältnisse. Vordergründig könnte es den Anschein haben, als sei diese Ästhetik der Widerspiegelung kaum mehr als eine Neuauflage der überkommenen *Mimesis*-Ästhetik. Doch der Schein trügt. Denn das Widerspiegelungskonzept nimmt der Kunst sehr viel mehr Freiheit, als sie selbst unter den Voraussetzungen ihres althergebrachten Verständnisses als einer Nachahmung der Natur besaß. Nachahmung nämlich gründet auf Ähnlichkeit. Sie bedeutet keineswegs Wiederholung desselben. Im Abstand, der zwischen dem Gegenstand der Nachahmung und dieser selbst steckt, lässt sich deshalb manche Veränderung unterbringen, so etwa die Vervollkommnung des Nachgeahmten. In diesem Sinn kann die Nachahmung der Natur die Natur schöner machen, als sie an sich selbst ist, und gerade darauf zielte ja die klassizistische Poetik in der Tradition des ARISTOTELES, die die frühneuzeitliche Literatur weitgehend bestimmte.¹⁹ Doch selbst solche Spielräume

19 Während ARISTOTELES' Konzept der Mimesis auf die Optimierung des Nachgeahmten durch die Mimesis setzt, kennt die Mimesis-Ästhetik freilich auch genau die Gegenposition, für die PLATON steht. In seiner *Politeia* hat er ihr gerade das Gegenteil bescheinigt, einen Seinsverlust, der dadurch zustande kommt, dass sie nur Nachbildungen von Nachbildungen bietet. Denn die Dinge, die die Kunst nachahmt, seien nichts anderes als ihrerseits schon unvollkommene Abbildungen der Ideen, in denen die Fülle des Seins der Dinge aufgehoben ist. Kunst leide deshalb unter einem doppelten Seinsverlust. Beide Positionen aber, die positive wie die negative Bewertung der Differenz zwischen der Nachahmung und ihrem Objekt, belassen der Mimesis einen Abstand und Spielraum zwischen beiden Entitäten, die einer Widerspiegelungstheorie fernliegen.

sind im Falle der Widerspiegelung nicht (mehr) vorhanden. Sie ist, wie dieser Begriff kaum missverständlich anzeigt, auf die bloße (wiewohl nicht unwirksame) Reproduktion des Vorfindlichen festgelegt.

Die *Einführung in die ästhetischen Schriften von Marx und Engels* von Georg LUKÀCS, einem der führenden Repräsentanten, wenn er nicht als der eigentliche Begründer der marxistischen Kunsttheorie gelten kann, lässt in dieser Hinsicht kaum Illusionen aufkommen:

„Es ist bekannt, daß der historische Materialismus im Unterbau das Richtungsprinzip, die bestimmende Gesetzmäßigkeit der historischen Entwicklung sieht. Die Ideologien – darunter Literatur und Kunst – figurieren in diesem Zusammenhang im Entwicklungsprozeß nur als sekundär bestimmender Überbau.“²⁰

Für die Kunst ergibt sich also wie für die Geschichte ein durchaus vergleichbarer Befund. Auch ihr Konzept zerfällt in theoretischen Positionen, die erst gemeinsam, erst in ihrer symmetrischen Korrespondenz den Begriff der Kunst in der Moderne insgesamt ausmachen. Weder die Autonomieästhetik, noch die Widerspiegelungstheorie allein prägt in dieser Epoche das Konzept der Kunst, sondern erst die Konkurrenz von Positionen, deren Gegensätze sich symmetrisch entsprechen, macht die epochale Signatur des Kunstbegriffs in der Moderne aus.

4. Konzepte des Denkens

Eine gleiche konzeptuelle Struktur aber lässt sich in der Moderne auch für die Theorie des Denkens selbst, für die Bestimmung des Verhältnisses zwischen der Erkenntnis und ihrem Gegenstand beobachten. Ich möchte eine solche Symmetrie der Konzeptionen beispielhaft anhand eines kurzen Vergleichs zwischen HEGELS und SCHOPENHAUERS Erkenntnistheorie respektive Ontologie skizzieren, die als maßgebliche Vertreter einander entgegengesetzter Positionen gelten können. Und wenn ein solches Konzept beides, Ontologie und Erkenntnistheorie, zugleich ist, dann deshalb, weil sie sich in der Konsequenz von KANTS Philosophie nicht mehr recht voneinander unterscheiden lassen.

Auf HEGELS Geisttheorie sind wir schon im Rahmen seiner Geschichtsphilosophie eingegangen. HEGEL verordnet der Vernunft eine Geschichte, die Geschichte ihrer Selbstfindung, die zugleich die Geschichte ihrer Versöhnung mit der Natur ist. Am Ende dieses Prozesses ist die Natur im Begriff, den der Geist produziert, aufgehoben, und beide sind solchermaßen vermittelt. HEGELS Philosophie spricht der Vernunft insofern eine ungeheure Macht zu. Sie vermag sich die Natur untertan zu machen und bestimmt auf diese Weise zugleich den Verlauf der Weltgeschichte. SCHOPENHAUER entwickelt hingegen ein genau gegenteiliges Konzept, in dem der Vernunft des Menschen in beträchtlichem Maße jegliche Macht abgesprochen wird.

HEGELS junger Kollege an der Berliner Universität, Arthur SCHOPENHAUER, ließ es sich nicht nehmen, seine Vorlesungen zur gleichen Zeit wie HEGEL zu halten und dafür – ärgerlich, aber unbelehrbar – eine deutlich geringere Hörerzahl in Kauf zu nehmen. Dieser Wettstreit um die Teilnehmer aber ist keineswegs nur eine Frucht von Eitelkeiten, er geht mit einer Konkurrenz der Positionen einher. Denn während HEGEL auf die Vermittlung von

20 LUKÀCS 1961, S. 215.

Geist und Natur setzt, postuliert SCHOPENHAUER im Gegenzug gerade eine radikale Trennung von Vernunft und Wirklichkeit.

Der Titel seines Hauptwerks, *Die Welt als Wille und Vorstellung*, macht ihre Unvereinbarkeit bereits programmatisch kenntlich. Die Welt an sich, an sich selbst wird bestimmt vom Willen. Dieser Wille ist für SCHOPENHAUER eine anonyme, subjektlose Dynamik, ein Wille, der nur sich selbst will und dessen Triebkraft noch über das organische Leben hinausreicht. Ja, das Leben ist selbst nur eine Erscheinungsform des ihm übergeordneten Willens, der im Lebewesen ebenso wie im Kristall wirksam ist. Und so rückt dieser Wille in die Funktionsstelle eines *Dings an sich* ein:

„Da der Wille das Ding an sich, der innere Gehalt, das Wesentliche der Welt ist; das Leben, die sichtbare Welt, die Erscheinung, aber nur der Spiegel des Willens; so wird diese den Willen so unzertrennlich begleiten, wie den Körper sein Schatten: und wenn Wille daist [sic], wird auch Leben, Welt daseyn.“²¹

SCHOPENHAUER übernimmt den Begriff des *Dings an sich* von KANT ebenso, wie er ihn mit gänzlich verändertem Inhalt ausstattet. Denn nun ist das vom Denken separierte Sein in seinem Wesen nicht nur unbestimmt und unbestimmbar, sondern es wird zu einem unaufhaltsamen *Werden*. Das Werden aber bildete nach überkommenen philosophischen Prinzipien gerade das Gegenstück und Gegenteil zu allem Sein, das stets mit der Ruhe verbunden war. KANTS radikaler Revision der Beziehung von Denken und Sein folgen weitere ebenso revolutionäre Veränderungen des tradierten Denkens. Und so steht der unbändigen Dynamik des Willens, die für SCHOPENHAUER das Sein der Dinge ausmacht, eine gänzlich machtlose Vernunft gegenüber. Was sie produziert, sind nichts als eben nur Vorstellungen von der Welt, die mit deren Wesen nichts gemein haben. Was die Vernunft allein hervorzubringen vermag, sind, wenn man so will, selbstgefällige Illusionen, die dem Menschen seine Macht über die Welt mit den Mitteln seines Geistes nur vorgaukeln. Eine entschiedenerere Gegenposition zum Denken des zur gleichen Zeit am gleichen Ort wirkenden HEGEL, der die ganze Welt unter den Begriff subsumiert und auf diese Weise der Vernunft eine immense Macht über die Wirklichkeit verleiht, lässt sich kaum vorstellen.

Auch HEGELS und SCHOPENHAUERS Theorien der Erkenntnis stehen sich also symmetrisch kontrastierend einander gegenüber: HEGELS Überzeugung, dass Geist und Natur sich voneinander nicht trennen lassen, korrespondiert umgekehrt ihre radikale Separation bei SCHOPENHAUER.²² Und selten tritt das auch diesem Gegensatz zugrunde liegende struktu-

21 SCHOPENHAUER 1949, IV, § 54, S. 324.

22 Wie weit diese symmetrische Korrespondenz der einander kontrastierenden Positionen HEGELS und SCHOPENHAUERS reicht, erhellt nicht zuletzt ein Vergleich ihrer jeweiligen Ästhetik. Für HEGEL bildet die Kunst, wie gesehen, den ersten Schritt der Versöhnung von Geist und Natur. Mit seinen Kunstwerken besetzt der Mensch die ihm äußerliche Natur, um sie sich dadurch ein Stück weit anzueignen. Doch eben auch nur ein Stück weit; denn für seine Kunst bleibt der Mensch abhängig von Bedingungen, die außerhalb seiner selbst liegen. So bereitet die Kunst zugleich die Einsicht vor, dass erst der Begriff, das Denken selbst also, ihn die volle Souveränität über die Natur gewinnen lässt. In vergleichbarer Weise besitzt die Kunst bei SCHOPENHAUER eine aufklärerische Funktion, die sich vor allem in der Tonkunst erfüllt. Doch diese Zweckbestimmung ist derjenigen bei HEGEL genau gegenläufig. Wenn *Die Welt als Wille und Vorstellung* der Musik einen besonderen Rang zuspricht, dann deshalb, weil sie, anders als Literatur und bildende Kunst, nicht bestimmte Erscheinungsformen des Willens, sondern diesen selbst nachahmt. Durch diese Unmittelbarkeit seines Ausdrucks gewinnt die Mimesis des Willens eine ganz besondere Prägnanz; sie vor allem führt eindrücklich dessen gewaltige Macht vor. Das solchermaßen zu Bewusstsein gebrachte, immense,

relle Prinzip des Denkens in der Moderne so radikal wie im Verhältnis ihrer beiden Philosophien zueinander zutage. Und auch in diesem Fall gilt: Weder die eine, noch die andere Position machen die Signatur der Erkenntnistheorie (respektive Ontologie) in der Moderne aus. Erst in der symmetrischen Korrespondenz einander entsprechender, gegensätzlicher Positionen kommt diese epochale Signatur zum Vorschein. Charakteristisch für das Denken der Moderne insgesamt ist deshalb eine tiefe Ungewissheit über das Verhältnis von Vernunft und Natur.

Am Eingang dieses Artikels hatte ich angekündigt, dass die Symmetrie einander widersprechender Konzeptionen des Denkens selbst uns einen Hinweis auf die Ursache der von uns beobachteten Affinität des modernen Denkens zur Hervorbringung solcher symmetrisch korrespondierenden Gegensätze im Denken der Moderne bieten kann. In der Tat hat es, wie sich nun rückblickend zeigt, den Anschein, als verhielte es sich so. Denn es ist die letztendliche Ungewissheit über das Verhältnis zwischen der Vernunft des Menschen und der ihr äußerlichen Dingwelt, die uns einen Schlüssel zur Erklärung dieses Sachverhalts bietet. Und in dieser fortdauernden Ungewissheit spiegelt sich zugleich der historische Ausgangspunkt des Denkens der Moderne, den sie im Grunde nie überwunden hat.

Am Anfang steht René DESCARTES. Auch er hat bekanntlich mit einem berühmten Satz Furore gemacht: *Cogito ergo sum. Je pense, donc je suis. Ich denke, also bin ich.* Mit diesem Satz zielt DESCARTES darauf, eine erste und letzte Gewissheit zu finden, an der kein Zweifel mehr möglich ist. Doch soviel Gewissheit in diesem Satz auch stecken mag, für einen Zweck bietet er keinerlei Sicherheit: für die Frage nämlich, wie ich denn die Dinge außerhalb meiner selbst überhaupt zu erkennen mag. Woher kann ich zuverlässig wissen, dass ich sie nicht nur träume, dass sie nicht bloß Produkte meiner Imagination sind? Denn eben dies war ja der Ausgangspunkt von DESCARTES *Méditations*: die bange Frage, ob ich mir die Welt nicht vielleicht nur einbilde. Doch in der Gewissheit, die das *cogito ergo sum* bietet, kreist das Denken in sich selbst, vergewissert es sich seiner selbst und garantiert dadurch die Existenz eines Subjekts dieses Denkens – aber eben auch nicht mehr. Die Sicherheit über das Sein, die dieser Satz bietet, verbürgt allein die Existenz des Denkens selbst: des Prozesses dieses Denkens, sollten wir präzisieren, aber darin steckt keine Garantie für die Existenz seiner Inhalte – mit der einen Ausnahme seiner Selbstvergewisserung.

ja überwältigende Potential des Willens lässt die Vernunft im gleichen Zug ihre eigene Ohnmacht erkennen. Und so setzt die Musik eine Willensverneinung, eine radikale Absage an die nicht minder radikalen Ansprüche des Willens in Gang, die letztlich einer Verneinung der Welt gleichkommt. Während die Kunst bei HEGEL den Weg zu Machtergreifung der Vernunft über die Natur bereitet, führt im Besonderen die Musik bei SCHOPENHAUER zur Erkenntnis, wie machtlos die Vernunft im Umgang mit der Welt ist. Aber nicht nur in diesen einander entgegengesetzten Zweckbestimmungen der Kunst steckt die Symmetrie dieser beiden Konzepte der Ästhetik. Sie zeigt sich vor allem darin, dass die Kunst bei HEGEL wie bei SCHOPENHAUER durch einen parallelen dialektischen Umschlag gekennzeichnet ist. In HEGELS *Vorlesungen über die Ästhetik* stellt sie nicht nur einen ersten Brückenschlag zwischen dem Geist und der Natur her. Sie gibt auch ihre eigene Unzulänglichkeit zu Erfüllung ihrer Zweckbestimmung zu erkennen, weil sie durch einen Rest an Abhängigkeit von der Natur bestimmt wird, deren Überwindung sie doch betreiben soll. Genau umgekehrt steht es um die Musik bei SCHOPENHAUER. Sie bewirkt zum einen die Einsicht in die schlechthinige Ohnmacht der Vernunft gegenüber der Gewalt des Willens. Und doch verleiht sie der Vernunft dabei auch einen Rest an Souveränität gegenüber dem Willen; denn sie ermächtigt die Ratio zur Absage an diesen Willen. Gerade in der parallelen Dialektik der jeweiligen Wirkungsweise der Kunst kommt die Symmetrie der einander konträren Positionen ganz besonders prägnant zum Vorschein.

DESCARTES hat deshalb in einem aufwendigen Gottesbeweis in seinen *Méditations* noch einmal auf einen transzendenten Garanten für die Zuverlässigkeit des Wissens des Menschen zurückgegriffen, um dem Menschen die Möglichkeit zuverlässiger Erkenntnis zu bewahren. Wenn der Mensch in seinem Verstand die Idee Gottes findet, dann kann sie nicht von ihm selbst stammen. Denn wie hätte der Mensch als ein endliches und unvollkommenes Wesen die Idee eines unendlichen und vollkommenen Gottes hervorbringen können? Und zudem müsse dieser Gott existieren. Denn zur Idee eines vollkommenen Gottes gehört es, dass es ihm an nichts mangeln kann. Gäbe es ihn also nicht, so würde ihm eine wesentliche Eigenschaft, nämlich seine Existenz fehlen. Mithin müsse er als ein vollkommenes Wesen auch unweigerlich existieren. Daraus aber folge auch, dass die Erkenntnisse des Menschen zuverlässig sein müssen. Denn wie könnte es sein, dass ein vollkommener, und also auch allgütiger Gott seine Geschöpfe mit mangelhaften, ja täuschenden Werkzeugen der Erkenntnis ausgestattet hätte?²³

23 Es könnte den Anschein haben, als bilde DESCARTES' Rückgriff auf den transzendenten Gott nicht mehr als eine Konzession an den nach wie vor dominanten, von einer soeben gegenreformatorisch erstarkten Kirche machtvoll vertretenen Glauben an den Gott der Christen, ohne von wirklichem systematischen Belang zu sein. Doch dieser Schein trügt. Und er trügt schon allein deshalb, weil die Art und Weise, in der DESCARTES auf diesen Gott Bezug nimmt, aus Sicht der christlichen Orthodoxie ausgesprochen häretisch ausfällt. Denn der in den *Méditations* entwickelte Beweis weicht ja deutlich ab von einem Gottesglauben, der diesen Glauben selbst als transzendentes Geschenk, als gnadenhafte Eröffnung einer Offenbarung versteht. Vielmehr wird die Annahme der Existenz Gottes an ausschließlich rationale Argumente gebunden. Ja, mehr noch, dieser Gott selbst tritt im Grunde ausschließlich in der Funktion eines Lückenbüßers für die an sich selbst irre werdende Vernunft in Erscheinung. Der überkommene Gott wird dadurch zu einem bloßen argumentativen Instrument, zur logischen Problembekämpfung herabgewürdigt, wodurch er seine angestammte theologische Rolle längst eingebüßt hat. Dies ist alles andere als „rechtgläubig“. Gerade diese unverkennbare theologische Entwertung des überkommenen Gottes in DESCARTES' *Méditations* bietet deshalb einen deutlichen Hinweis darauf, dass die Bezugnahme auf ihn andere Gründe als eine der systematischen Argumentation äußerliche Ursache wie die Sorge vor der Macht der Kirche hat. Was dieser Rückgriff hingegen zeigt, ist die für das Denken der Moderne fortbestehende – und letztlich nie gelöste – Schwierigkeit, das Weltverhältnis der Vernunft allein aus der Vernunft selbst heraus zu begründen. Wenn erst und nur der transzendente Gott DESCARTES eine verlässliche Basis für die Annahme bietet, dass die Erkenntnisse der Vernunft die Natur des darin Erkannten auch zu erfassen vermögen, dann steckt darin insgeheim der Fingerzeig, dass die menschliche Vernunft zur Begründung ihres Weltbezugs stets eines ihr Äußerlichen – und sie insoweit stets Transzendierenden – zur Begründung dieses Verhältnisses bedarf. (DESCARTES hat diese Sicherung ihrer Erkenntnismöglichkeiten in den Voraussetzungen der menschlichen Vernunft gesucht, in ihrem göttlichen Ursprung. Daraus ergibt sich indessen eine weitere Frage, die ich hier nur andeuten kann. Womöglich entsteht nämlich das Grundproblem, das DESCARTES beschäftigt, die Frage, ob ich mir die Welt womöglich nur einbilde, ihrerseits erst durch die Aneignung einer epistemischen Position, die letztlich den Erkenntnismodalitäten Gottes nachgebildet ist. Theologischer Tradition zufolge fallen für Gott Denken und Sein zusammen. Die Dinge gewinnen ihr Sein deshalb dadurch, dass und indem Gott sie denkt. Was indessen für den transzendenten Gott einen Ausweis seiner Vollkommenheit bildet, kehrt in DESCARTES' skeptischem Blick auf die Erkenntnismöglichkeiten des Menschen als die Sorge vor der bloßen Fiktion wieder. Auch aus dieser Sicht wird ja die Welt als eine bloß gedachte vorgestellt. Nur ist für den Menschen der Vorbehalt zu machen, dass seine Unvollkommenheit keine Gewähr mehr dafür bietet, dass diesem Denken etwas in der Sache selbst entspricht, weil Denken und Sein unter den Bedingungen humaner Erkenntnis eben nicht zusammenfallen. Dass für DESCARTES diese Differenz zwischen dem vollkommenen Gott und seinem unvollkommenen Geschöpf eine maßgebliche Rolle spielt, zeigt sich in der skizzierten Argumentation seines Gottesbeweises. Denn für dessen Schlüssigkeit spielt es ja eine zentrale Rolle, dass der unvollkommene Mensch nicht der Urheber der Idee eines vollkommenen Gottes sein kann, die er gleichwohl in seinem Denken vorfindet. DESCARTES' Zweifel geht also von einem Menschen aus, der als ein unvollkommener Gott konzipiert ist. Gottes Auszeichnung, ein reines Geistwesen zu sein, wandelt sich auf diese Weise unter der Hand in

Diese transzendente Absicherung der menschlichen Vernunft aber hat im Laufe der Zeit mehr und mehr, nicht zuletzt im Zuge der Aufklärung, an Plausibilität verloren. Und wie schon unsere knappe Rekonstruktion von DESCARTES' Argumentation zu erkennen geben kann, ist Gottes Garantie der menschlichen Erkenntnisfähigkeit zweifelsohne durch einige ausgesprochen riskante Schlussfolgerungen erkaufte. Gleichwohl ist im Grunde im Denken der Moderne keine allgemein akzeptierte, alternative Lösung gefunden worden, die in diese Leerstelle eingetreten wäre. Dies ist die Ursache der Koexistenz widersprüchlicher Positionen über das Verhältnis von Vernunft und Natur, die wir paradigmatisch anhand der symmetrischen Korrespondenz der Philosophie HEGELS und SCHOPENHAUERS beobachten konnten. Es ist und bleibt für das Denken dieser Epoche ungewiss, ob die Vernunft sich der Dinge selbst zu vergewissern vermag oder ob eine bloß vermeintliche Erkenntnis nur den – letztlich narzisstischen – Eindruck der Einsicht in sie vermittelt.

Diese schlussendliche Ungewissheit aber spiegelt sich gleichermaßen in den symmetrisch entgegengesetzten Konzepten von Geschichte und Kunst, die wir in diesem Artikel diskutiert haben. Die historicistische Vorstellung von der Geschichte, die allen Epochen ein gleiches Recht zuspricht und sie alle einer je anderen kulturellen Ordnung verpflichtet weiß, versteht diese Geschichte als das Reich einer nur auf sich selbst verwiesenen und insofern freien Vernunft. Denn in der Fülle der unterschiedlichen epochalen Ordnungen kommt das Spiel der Möglichkeiten einer sich selbst überlassenen Vernunft zum Ausdruck, die sich aufgrund ihrer Freiheit ihre verschiedenen kulturellen Formationen nach Belieben entwerfen kann.²⁴ Der Historismus steht insoweit einer Konzeption der Kunst nahe, die das Prinzip der Autonomie als ihre ureigenes Merkmal erkennt und sie als jene Domäne menschlicher Praxis begreift, in der sich die Freiheit der Vernunft am vollkommensten realisieren kann. Kaum zufällig vereint die Inschrift über dem Portal des Gebäudes der Wiener Secession deshalb ein historisches Konzept der Kunst mit ihrer Bestimmung als dem Reich der Autonomie. Die Geschichtsphilosophie steht stattdessen im Bund mit einem Verständnis der Vernunft, das ihren Zusammenhang mit der Natur reflektiert.

einen Mangel des Menschen: in den Verlust einer verlässlichen Beziehung zu allem Körperlichen. Denn für den Menschen fällt die Möglichkeit einer Produktion von Materie durch Schöpfung aus. Aber auch dieser Modus der Herstellung von Materie kehrt in DESCARTES' erkenntnistheoretischem Zweifel wieder, und zwar in Gestalt der Sorge vor der Fiktion, vor dem Fingieren, also der Produktion eines – bloßen – Scheins. Den Ausgangspunkt DESCARTES' bildet mithin eine Vorstellung vom Menschen als einem unvollkommenen Gott. Von hierher stammt die Verabsolutierung des Intellekts, zu deren Konsequenzen der Verlust eines Weltverhältnisses der Vernunft zählt. Der vermeintlich empirische Befund der Selbstbefragung des an sich selbst zweifelnden Verstands erweist sich insofern bei näherem Zusehen als ein Effekt spezifischer theoretischer Annahmen. DESCARTES' Zweifel selbst aber erscheint im gleichen Zug als nicht mehr so unvermeidlich, wie er sich darbietet und wie das ihm folgende Denken der Moderne ihn aufgenommen fortgeführt hat.)

- 24 Dieser Sachverhalt ist nicht ohne Belang für das Selbstverständnis des Historismus. Üblicherweise versteht er sich als eine empirische Alternative zur spekulativen Geschichtsphilosophie. Während diese die immense Vielfalt und Komplexität der Geschichte in den Rahmen einer logischen Ordnung zwingt, trage der Historismus den je und je zu beobachtenden historischen Besonderheiten Rechnung. Aber diese Sicht der Dinge erkennt, dass auch das historicistische Konzept der Geschichte seinerseits einem bestimmten Konzept von Vernunft verpflichtet ist. Denn die für das Geschichtsbild des Historismus ebenso charakteristische wie essentielle Formation der Epoche (Antike, Mittelalter, Renaissance etc.) erscheint hier als ein individuelles Subjekt der Geschichte, das sich seine je eigene Ordnung schafft. Im Grunde stehen sich im Nebeneinander von Historismus und Geschichtsphilosophie zwei verschiedene Aspekte der Vernunft einander gegenüber. Der Historismus akzentuiert ihre Freiheit in der Möglichkeit ungehinderter Wahl von Alternativen. Die Geschichtsphilosophie betont hingegen die Ordnung ihrer Logik.

Bei HEGEL ist die Versöhnung des Geistes mit der Natur das Telos der Geschichte. Bei KANT folgt die Geschichte einer Naturabsicht, die die vollständige Entfaltung der Vernunft bewirkt und ohne deren Mitwirkung sie dazu nicht in der Lage wäre.²⁵ In der Ästhetik der Widerspiegelung, dem symmetrischen Gegenstück der Autonomieästhetik, gerät die Kunst sogar in die Abhängigkeit von den materiellen Verhältnissen, die sie nur zu repräsentieren vermag. Der radikalen Ungebundenheit durch irgendeine externe Welt steht hier die ebenso entschiedene Determination durch die äußeren Verhältnisse gegenüber.

Symmetrie als strukturelles Prinzip des Denkens in der Moderne: Diese Eigenheit ihres Denkens bildet einen Reflex von dessen tiefer Ungewissheit über die Beziehung der menschlichen Vernunft zu der außerhalb ihrer liegenden materiellen Welt. Deshalb tendiert dieses im Grunde zutiefst skeptische Denken zur Konstruktion einander symmetrisch korrespondierender Konzeptionen für dieselben Phänomene, um in deren Nebeneinander diese Ungewissheit zu spiegeln.

Eine solche Struktur des Denkens in der Moderne weist interessanterweise eine bemerkenswerte Parallele mit den Verfahrensweisen der sogenannten pyrrhonischen Skepsis, der wohl einflussreichsten antiken Schule der Skepsis, auf. Ihr grundsätzlicher Vorbehalt gegenüber den Erkenntnismöglichkeiten der Vernunft gründet darauf, dass sich, ihrem Postulat zufolge, für jeden beobachtbaren Sachverhalt eine genau gegenteilige Aussage mit gleichem Wahrheitsanspruch bilden lässt. Und für diese konkurrierenden Sätze haben die Pyrrhoneer den Ausdruck der *Isosthenie* geprägt.²⁶ Die Struktur des modernen Denkens, die wir in diesem Artikel verfolgt haben, ähnelt deshalb in nicht unerheblichem Maß einer Produktion von Isosthenien, wie sie die Pyrrhoneer zum Beweis ihrer Skepsis gegenüber den Möglichkeiten des Denkens entwickelt haben. Doch ebenso aufschlussreich wie diese Parallele ist ein fundamentaler Unterschied zwischen den Verfahrensweisen des Denkens der Moderne und denen der Pyrrhoneer. Denn das Denken der Moderne ist anderes als eine bloße Wiederauflage der antiken Skepsis. Seine epochale Signatur gewinnt es gerade aus der Abgrenzung gegenüber ihr. Und dieser Unterschied beruht in den je verschiedenen Konsequenzen, die aus der Skepsis jeweils gezogen werden.

Die pyrrhonischen Skeptiker haben den Befund der grundsätzlichen Möglichkeit von einander widersprechenden Beschreibungen desselben Sachverhalts zum Anlass einer generellen Absage an alle *theoria* genommen. *Epoché* lautet deshalb ihre Schlussfolgerung: Urteilsenthaltung. An die Stelle philosophischer Reflexion tritt in der Konsequenz dieser theoretischen Enthaltensamkeit ein Rückzug auf konventionelle Praktiken der Lebensführung. Genau diesen Ausstieg aus dem Denken hat die Philosophie der Moderne, ihrer gleichfalls skeptischen Grundierung zum Trotz, indessen gerade nicht nachvollzogen. Und vielleicht tritt in dem damit einhergehenden Funktionswechsel der Skepsis einer der signifikantesten Unterschiede zwischen modernem und prämodernem Denken zutage.

25 Auch zwischen der Geschichtsphilosophie KANTS und derjenigen HEGELS lässt sich eine gewisse Symmetrie beobachten, und zwar aufgrund ihrer komplementären Definition des Verhältnisses von Vernunft und Natur. KANT unterstellt der Natur die Absicht, die Vernunft des Menschen zu ihrer vollkommenen Entfaltung gelangen zu lassen, welche sie ohne die Mithilfe der Natur nicht erreichen könnte. HEGEL hingegen nutzt die Selbstentfaltung der Vernunft, um die Macht des Menschen über die Natur zu Bewusstsein zu bringen. Aber dieser Gegensatz ist letztlich ein scheinbarer. Denn hier wie dort tritt die Natur als ein Instrument zur Entwicklung der Vernunft auf, nur tut sie dies in verschiedener Weise: als Widerlager der Vernunft oder als deren Entwicklungsprinzip.

26 Zu den Grundprinzipien dieser philosophischen Schule vgl. SEXTUS EMPIRICUS 1993.

Die Antike kennt die Skepsis als ein Ende der Philosophie und geht deshalb mit dem Verzicht auf die *theoria* einher. Für die Moderne bildet die Skepsis stattdessen einen Ausgangspunkt aller Philosophie. Die Produktion von Isosthenien, die wir auch für ihre Konstruktion von je einander symmetrisch korrespondierenden Gegensätzen bemerken konnten,²⁷ wird deshalb nun zu einem Prinzip des Denkens, das dessen Fortgang bestimmt, statt eine Absage an das Denken zu begründen. Die Symmetrie stellt unter diesen Bedingungen das Bewegungsgesetz des Denkens dar, das die Produktion seiner eigenen Entwürfe angesichts ihres ungewissen Grundes bestimmt, um in deren symmetrischer Korrespondenz die Spielräume des Denkbaren auszuloten. Statt den Ausstieg aus dem Denken herbeizuführen, wird die Konstruktion symmetrisch entsprechender gegensätzlicher Positionen zu einer gedanklichen Erkundung des Möglichen – anders gesagt: des Denkbaren, von dem nicht gewiss ist, ob es nicht auch ein Wirkliches ist.²⁸

27 Bei dieser Übertragung des Begriffs der Isosthenie auf die Strukturen des Denkens in der Moderne gilt es freilich, den jeweils unterschiedlichen Status des damit bezeichneten Phänomens in Rechnung zu stellen. Für die Pyrrhoneer stellt die grundsätzliche Koexistenz von einander ausschließenden Isosthenien zur Beschreibung desselben Sachverhaltes einen Beleg für die unüberwindlichen Defizite aller menschlichen Erkenntnisse dar. Dieser Befund wird für die pyrrhonischen Skeptiker deshalb zugleich zu einem methodischen Programm. Die konsequente Produktion von Isosthenien dient auch zum Beleg für die Berechtigung ihrer Zweifel am Erkenntnisvermögen des Menschen. Ich bediene mich hier des betreffenden Begriffs hingegen zur Charakteristik eines philosophiehistorischen empirischen Befunds. Die Skepsis steckt insofern in der Struktur des modernen Denkens und seiner Entwicklung, wiewohl die darin vertretenen Positionen selbst keineswegs ihrerseits skeptisch sein müssen. (Letzteres gilt übrigens auch für SCHOPENHAUERS Denken. Er ist zwar skeptisch im Hinblick auf das Leistungsvermögen der menschlichen Vernunft, aber er ist dies offenkundig nicht im Hinblick auf die Möglichkeiten der Philosophie. Denn sie versteht es noch immer, den illusionären Charakter aller rationalen Erkenntnis sehr genau zu erfassen, und vermag selbst das *Ding an sich* des Willens, über das die Vernunft keine Macht besitzt, gleichwohl sehr genau zu charakterisieren.) In der Moderne wandelt sich die Skepsis insofern von einem philosophischen Konzept respektive Programm zu einem strukturellen Prinzip, zum Bewegungsgesetz des Denkens. (Dies schließt im Übrigen keineswegs aus, dass es nicht auch in der Moderne skeptische Positionen gäbe. Ein prominentes Beispiel dafür bietet die Sprachphilosophie des späten WITTGENSTEIN. Aber selbst die in seinen *Philosophischen Untersuchungen* entwickelten Konzepte bieten einen Beleg für das im vorliegenden Artikel charakterisierte Prinzip der Konstruktion symmetrischer Gegensätze im Denken der Moderne. Denn die *Philosophischen Untersuchungen* des späten WITTGENSTEIN antworten zugleich auf den *Tractatus logico-philosophicus* aus seinem frühen Werk. Und in der Tat verhalten sich beide Schriften in vielfacher Hinsicht komplementär zueinander. Während der *Tractatus* der Sprache ein mehr als 100 Jahre nach KANTS *Kritik der reinen Vernunft* fast erstaunliches ontologisches Potential zubilligt, bestreiten die *Philosophischen Untersuchungen* ihr jegliche Welthaltigkeit, um die Sprache im (bloßen) *Sprachspiel* aufgehen zu lassen. Ihrem Selbstverständnis nach verstehen sich die *Philosophischen Untersuchungen* als eine Korrektur des – auch ausdrücklich – kritisierten *Tractatus*. Aus Sicht der allgemeinen Struktur wie der Entwicklung des Denkens der Moderne stellt sich das Nebeneinander beider Texte indessen wie ein Spiegel jener Grundproblematik dar, an dem es seit DESCARTES' *Méditations* arbeitet, ohne das ihm zugrunde liegende Problem je gelöst zu haben.)

28 Damit ist natürlich auch die Frage nach den Ursachen dieses Funktionswandels einer Konstruktion von Isosthenien wie der Skepsis im Allgemeinen aufgeworfen. Warum mündet die skeptische Grundhaltung gegenüber dem Denken in der Moderne nicht wie bei den antiken Pyrrhoneern in die *epoché*, in den Ausstieg aus dem Denken als solchem, sondern verwandelt sie in ein Prinzip dieses Denkens? In gewisser Weise erscheint die pyrrhonische Lösung ja als die schlüssigere. Denn auch die Konstruktion von Symmetrien im Denken der Moderne vermag ja den Grundzweifel, der ihre Produktion in Gang setzt, nicht aus der Welt zu schaffen. Insofern erschiene es auch in diesem Fall nur folgerichtig, einem Denken, das seine eigenen Defizite nicht zu überwinden vermag, eine Absage zu erteilen. Doch dem Denken der Moderne ist zugleich der Ausweg der Pyrrhoneer, der Rückzug in die Lebenswelt, verschlossen. Denn ein solches Ausweichen auf die Konventionen der Lebenspraxis setzt letztlich ein vorthoretisches „Urvertrauen“ in die Wirklichkeit vor-

Literatur

- DANTO, A. C.: *Analytical Philosophy of History*. Cambridge: Cambridge University Press 1965
- DESCARTES, R.: *Les méditations métaphysiques*. Paris: Bordas 1991
- DIEKMANN, C.: *Volk bleibt Volk*. Deutsche Geschichten. Berlin: Links 2001
- FIGES, O.: *Rußland. Die Tragödie eines Volkes*. Berlin: Berlin-Verlag 2014
- FOUCAULT, M.: *Les mots et les choses*. Paris: Gallimard 1966
- HEGEL, G. W. F.: *Vorlesungen über die Philosophie der Geschichte*. In: HEGEL, G. W. F.: *Werke*. Auf der Grundlage der Werke von 1832–1845. 20 Bde. und Register. Bd. 12. Hrsg. von E. MOLDENHAUER und K. M. MICHEL. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1986a
- HEGEL, G. W. F.: *Vorlesungen über die Ästhetik*. In: HEGEL, G. W. F.: *Werke*. Auf der Grundlage der Werke von 1832–1845. 20 Bde. und Register. Bd. 13. Hrsg. von E. MOLDENHAUER und K. M. MICHEL. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1986b
- KABLITZ, A.: *Montaignes „Skeptizismus“*. Zur *Apologie de Raimond Sebond (Essais*; II, 12). In: NEUMANN, G.: *Poststrukturalismus. Herausforderung an die Literaturwissenschaft*. S. 504–539. Stuttgart u. a.: Metzler 1997
- KABLITZ, A.: *Kunst des Möglichen. Theorie der Literatur*. Freiburg (im Breisgau): Rombach 2013
- KABLITZ, A.: *Zwischen Rhetorik und Ontologie. Struktur und Geschichte der Allegorie im Spiegel der jüngeren Literaturwissenschaft*. Heidelberg: Winter 2016
- KANT, I.: *Kritik der reinen Vernunft*. In: KANT, I.: *Werke in zehn Bänden*. Bd. 3, *Kritik der reinen Vernunft*. Teil 1, Bd. 4, *Kritik der reinen Vernunft*. Teil 2. Hrsg. von W. WEISCHDEL. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1983a
- KANT, I.: *Kritik der Urteilskraft* [Einleitung, VIII. Von der Ästhetik des Beurteilungsvermögens]. In: KANT, I.: *Werke in zehn Bänden*. Bd. 8, *Kritik der Urteilskraft und Schriften zur Naturphilosophie*. Hrsg. von W. WEISCHDEL. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1983b
- KANT, I.: *Idee zu einer allgemeinen Geschichte in weltbürgerlicher Absicht*. In: KANT, I.: *Werke in zehn Bänden*. Bd. 9, *Schriften zur Anthropologie, Geschichtsphilosophie, Politik und Pädagogik*. S. 31–61. Hrsg. von W. WEISCHDEL. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1983c
- KOSELLECK, R.: *Historia Magistra Vitae. Über die Auflösung des Topos im Horizont neuzeitlich bewegter Geschichte*. In: KOSELLECK, R.: *Vergangene Zukunft. Zur Semantik geschichtlicher Zeiten*. S. 38–66. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1992
- LUKÁCS, G.: *Einführung in die ästhetischen Schriften von Marx und Engels*. *Schriften zur Literatursoziologie*. S. 213–240. Neuwied: Luchterhand 1961
- LYOTARD, J.-F.: *La condition postmoderne. Rapport sur le savoir*. Paris: Ed. de Minuit 1979
- MARQUARD, O.: *Schwierigkeiten mit der Geschichtsphilosophie*. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1973
- PARZINGER, H.: *Die Kinder des Prometheus. Eine Geschichte der Menschheit vor der Erfindung der Schrift*. München: C. H. Beck 2015
- PAULUS DIACONUS: *Geschichte der Langobarden*. Hrsg. und übers. von W. F. SCHWARZ. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 2009
- PLATON: *Politeia*. Hrsg. von O. HÖFFE. 3. Aufl. Berlin: Akademie-Verlag 2011
- RANKE, L. VON: *Über die Epochen der neueren Geschichte. Weltgeschichte*, 9. Teil, 2. Abteilung. Hrsg. von A. DOVE. Leipzig: Duncker & Humblot 1988

aus, dem keine Skepsis etwas anhaben kann. Doch eben dies scheint dem Denken der Moderne abhandengekommen zu sein. Deren Skepsis erweist sich insofern als ungleich radikaler denn deren antike Vorläuferin. Diese Radikalisierung aber ergibt sich aus der Verabsolutierung der Vernunft als der einzigen Zugangsweise des Menschen zur Welt. Sie untergräbt konsequenterweise auch alle praktischen Formen des Umgangs mit der Welt, weil diese ebenso unter den Vorbehalt eines bloßen Jonglierens mit Illusionen geraten können. Und so bleibt nur die theoretische Arbeit an einem Paradoxon, dem sich ungeachtet seiner theoretischen Unlösbarkeit nur theoretisch begegnen lässt. Eine Ursache dieser Radikalisierung aber bildet möglicherweise die christlich-monotheistische Reinterpretation des antiken Denkens, die auch für ihre Skepsis nicht ohne Folgen blieb. Die Identifikation des *logos* mit der Person des transzendenten Gottes, als dessen *imago* der Mensch geschaffen wurde, ließ schließlich auch für ihn ein nur noch rationales Verhältnis zur Welt zurück. Und diese theoretische Reduktion auf das reine Verstandeswesen erfolgt bezeichnenderweise erst in dem Augenblick, in dem dieser Gott seinerseits nichts anders als in Gestalt eines Postulats der Vernunft in Erscheinung tritt. (Vgl. zu den Bedingungen der Veränderung der antiken Skepsis KABLITZ 1997.)

- SCHOPENHAUER, A.: Die Welt als Wille und Vorstellung. Hrsg. von A. HÜBSCHER. Wiesbaden: Brockhaus 1949
- SEXTUS EMPIRICUS: Grundriß der pyrrhonischen Skepsis, eingeleitet und übersetzt von M. HOSSENFELDER. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1993
- THUKYDIDES: Geschichte des Peloponnesischen Krieges. Übers. und hrsg. von G. P. LANDMANN. Düsseldorf u. a.: Artemis & Winkler 2014
- VOLTAIRE: Die Zeiten Ludwigs des Vierzehnten. Berlin 1752
- WITTGENSTEIN, L.: Tractatus logico-philosophicus. In: WITTGENSTEIN, L.: Werkausgabe in 8 Bde. Bd. 1. Frankfurt (Main): Suhrkamp 2014a
- WITTGENSTEIN, L.: Philosophische Untersuchungen. In: WITTGENSTEIN, L.: Werkausgabe in 8 Bde. Bd. 1. Frankfurt (Main): Suhrkamp 2014b

Prof. Dr. Andreas KABLITZ
Petrarca-Institut der Universität zu Köln
Richard-Strauss-Straße 2
50931 Köln
Deutschland
Tel.: +49 221 4702833
E-Mail: amr10@uni-koeln.de

Geometrie durch Symmetrie

Anna WIENHARD (Heidelberg)



Zusammenfassung

Symmetrien spielen eine zentrale Rolle in der Mathematik. Durch die Betrachtung der inhärenten Symmetrien eines mathematischen Objektes kann die Komplexität einer mathematischen Fragestellung reduziert werden. Zudem ergeben sich dadurch oftmals spannende Beziehungen zwischen geometrischen Strukturen auf der einen und algebraischen Strukturen auf der anderen Seite. Dies werde ich an klassischen Beispielen sowie an aktuellen Forschungsfragen veranschaulichen.

Abstract

Symmetries play a central role in mathematics. Considering the inherent symmetries of a mathematical object allows to reduce the complexity of mathematical research problems. Furthermore, this often leads to an interesting interplay between geometric structures on one hand and algebraic structures on the other. I will illustrate this in classical examples and in current research challenges.

Symmetrie ist ein zentrales Prinzip in der Mathematik. Durch das Aufdecken von Symmetrien können verborgene Strukturen sichtbar werden sowie Probleme auf das Wesentliche reduziert und so vereinfacht werden. Diese grundlegende Idee lässt sich gut an einem elementaren Beispiel aufzeigen. Betrachten wir einen Kreis. Der Kreis wird bei einer Drehung um seinen Mittelpunkt wieder in sich selbst überführt, egal um welchen Winkel wir drehen. Ein Kreis lässt sich somit auf zwei Punkte reduzieren, seinen Mittelpunkt und einen weiteren Punkt. Der Kreis entsteht dadurch, dass man verfolgt, wie sich der zweite Punkt unter der Drehung um den Mittelpunkt bewegt. Dies machen wir uns jedes Mal zunutze, wenn wir einen Zirkel benutzen, um einen Kreis zu zeichnen (Abb. 1).

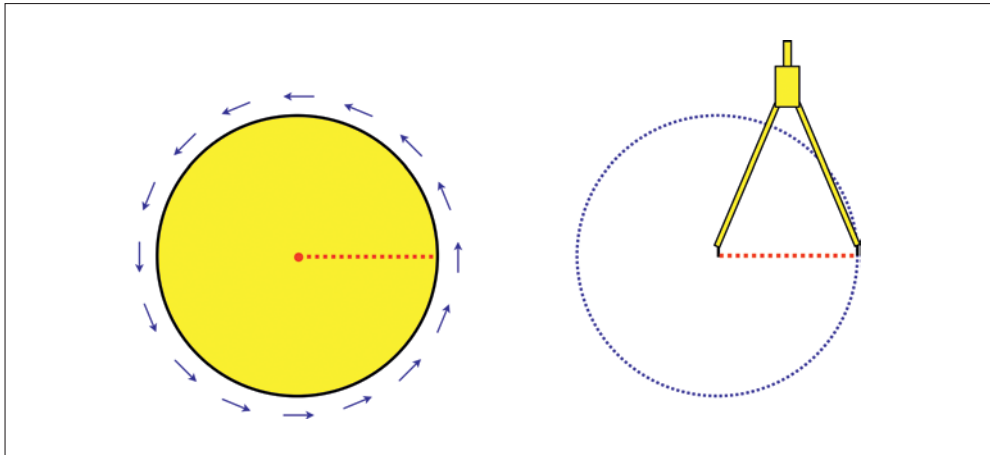


Abb. 1 Der Kreis lässt sich auf zwei Punkte reduzieren. Dies nutzen wir aus, wenn wir einen Kreis mit dem Zirkel zeichnen. (Gye-Seon LEE)

So wie in diesem Beispiel sind in unserem alltäglichen Leben Symmetrien oftmals mit geometrischen Objekten verbunden. Auch in diesem Beitrag wird es um die Bedeutung der Symmetrie für die Geometrie gehen. Für Mathematiker ist Symmetrie allerdings ein abstraktes Konzept, das nicht unbedingt etwas mit Geometrie zu tun hat. Mathematiker suchen und untersuchen Symmetrien überall. Zum Beispiel betrachten Mathematiker die Symmetrien einer polynomialen Gleichung, wie z. B. $(x^2 - 5)^2 - 24$. Die im 19. Jahrhundert von dem damals zwanzigjährigen Mathematiker Evariste GALOIS (1812–1832) entwickelte Galoistheorie basiert hierauf und gehört zu den Glanzstücken der Mathematik.

1. Euklidische Symmetrien

Wir widmen uns nun der Geometrie, und insbesondere der Euklidischen Geometrie. Euklidische Geometrie haben wir alle in der Schule kennengelernt, und dies ist wohl auch der Kontext, in dem uns Symmetrien am bekanntesten sind.

Die einfachsten Symmetrien sind die *Spiegelung*, die *Drehung* und die *Verschiebung* oder *Translation*. Spiegelungen, Drehungen und Verschiebungen sind Transformationen des Euklidischen Raumes, die alle Größen, die wir in der Euklidischen Geometrie messen, wie z. B. Abstände, Winkel oder den Flächeninhalt, erhalten. Eine beliebige Transforma-

tion, die den Euklidischen Raum und alle Euklidischen Größen erhält, nennt man auch eine Euklidische Symmetrie. Wir sehen den Effekt einer solchen Transformation (oder Symmetrie) nur, wenn wir ein Objekt, z. B. ein Dreieck, betrachten und verfolgen, wohin dieses unter der Spiegelung, Drehung oder Translation abgebildet wird (Abb. 2).

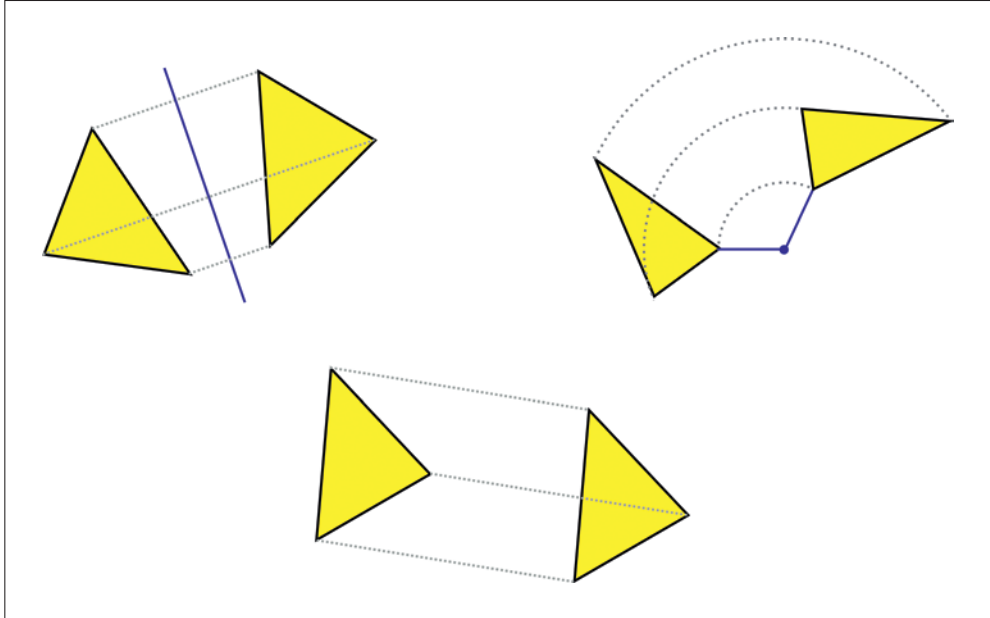


Abb. 2 Spiegelung, Drehung und Translation eines Dreiecks in der Euklidischen Ebene

Spiegelung, Drehung und Verschiebung. Transformationen eines Raumes können miteinander verknüpft werden, d. h., zwei oder mehrere Transformationen können hintereinander ausgeführt werden. Daher bilden die Transformationen eine Gruppe. Jede Euklidische Symmetrie ist die Verknüpfung von Spiegelungen, Drehungen und Translationen. Man sagt auch, die Gruppe der Euklidischen Symmetrien wird von Spiegelungen, Drehungen und Verschiebungen erzeugt.

2. Euklidische Pflasterungen

Pflasterungen sind ein Inbegriff von Symmetrie. Wir sprechen von einer Pflasterung der Euklidischen Ebene, wenn die Ebene ohne Lücken und ohne Überlappungen durch unendlich viele Teile ausgefüllt wird. Hierbei verlangt man in der Regel, dass nur endlich viele verschiedene Arten von Modellteilen benutzt werden und jedes der unendlichen Teile die Kopie eines dieser Modellteile ist. Wir kennen viele Pflasterungen und begegnen ihnen täglich, seien es die Kacheln im Badezimmer, das Teppichmuster, das Straßenpflaster, eine Wandtapete oder Ornamente in der Kunst und Architektur. Pflasterungen kommen in unendlich vielen Varianten vor. Das Leben wäre ja auch langweilig, wenn wir nur aus endlich vielen Tapetenmustern auswählen könnten. Mathematiker haben jedoch gezeigt, dass

es im Wesentlichen nur 17 verschiedene Tapetenmuster gibt. Um alle Tapetenmuster zu klassifizieren, haben sich Mathematiker auf das Wesentliche einer Pflasterung, nämlich auf ihre Symmetrien, genauer auf ihre Symmetriegruppe, konzentriert.

2.1 Symmetriegruppe einer Pflasterung

Die Symmetriegruppe besteht aus allen Euklidischen Symmetrien, die die gegebene Pflasterung wieder in sich selbst überführen. Nehmen wir beispielsweise die Pflasterung der Euklidischen Ebene durch Quadrate, wie bei einem unendlich ausgedehnten karierten Papier. Wir können das Papier um 90° drehen und erhalten die gleiche Pflasterung durch Quadrate. Wir können an einer Gerade durch die Seite eines Quadrates oder durch eine Diagonale spiegeln und erhalten wieder die gleichen Pflasterungen. Und wir können das unendliche Papier um ein Kästchen nach links oder rechts oder nach oben oder nach unten verschieben und erhalten die gleiche Pflasterung. Nun können wir alle diese Symmetrien miteinander verknüpfen und erhalten die Symmetriegruppe der Pflasterungen. Diese Symmetriegruppe ist unendlich. Sie enthält insbesondere die Gruppe aller Verschiebungen, die die Pflasterung in sich selbst überführen. Diese Gruppe von Verschiebungen können wir mit der Gruppe von Paaren ganzer Zahlen identifizieren, die Mathematiker \mathbb{Z}^2 nennen. Ein Paar ganzer Zahlen (i, j) steht für die Verschiebung um i Kästchen nach rechts, wenn i positiv ist, bzw. i Kästchen nach links, falls i negativ ist, und j Kästchen nach oben, wenn j positiv ist, bzw. j Kästchen nach unten, falls j negativ ist. Und die Verknüpfung von zwei Transformationen (i, j) und (k, l) ist einfach $(i, j) + (k, l) = (i + k, j + l)$. Mit Hilfe dieser Symmetrien lässt sich die Pflasterung durch Quadrate auf ein einziges Quadrat reduzieren. Durch Verschiebung dieses einen Quadrates lässt sich die gesamte Pflasterung erzeugen (Abb. 3).

Die Pflasterungen durch Quadrate wie auf einem unendlichen karierten Papier ist ein Beispiel einer periodischen Pflasterung. Eine Pflasterung nennt man periodisch, wenn sie sich (durch sukzessives Anwenden von Symmetrien) aus einem endlichen Teil erzeugen lässt. Da die Euklidische Ebene unendlich ausgedehnt ist, ist die Symmetriegruppe einer periodischen Pflasterung immer unendlich. Die Symmetriegruppe einer periodischen Pflasterung der Euklidischen Ebene nennt man eine Tapetenmustergruppe. Die Symmetriegruppe einer periodischen Pflasterung des dreidimensional (oder n -dimensional) Euklidischen Raumes nennt man eine kristallographische Gruppe. Diese Terminologie kommt von dem Zusammenhang zwischen Pflasterungen des dreidimensionalen Raumes und den Strukturen von Kristallen.

2.2 Klassifikation periodischer Euklidischer Pflasterungen

Die Klassifikation periodischer Pflasterungen der Euklidischen Ebene (Abb. 4) und des Euklidischen Raumes wurde Ende des 19. Jahrhunderts durch Evgraf FEDOROV (1853–1919), Arthur SCHOENFISH (1853–1928) und William BARLOW (1845–1934) abgeschlossen, die dabei auf Arbeiten verschiedener anderer Mathematiker aufbauten. Sie zeigten, dass es 17 verschiedene Tapetenmustergruppen und 230 dreidimensionale kristallographische Gruppen gibt.

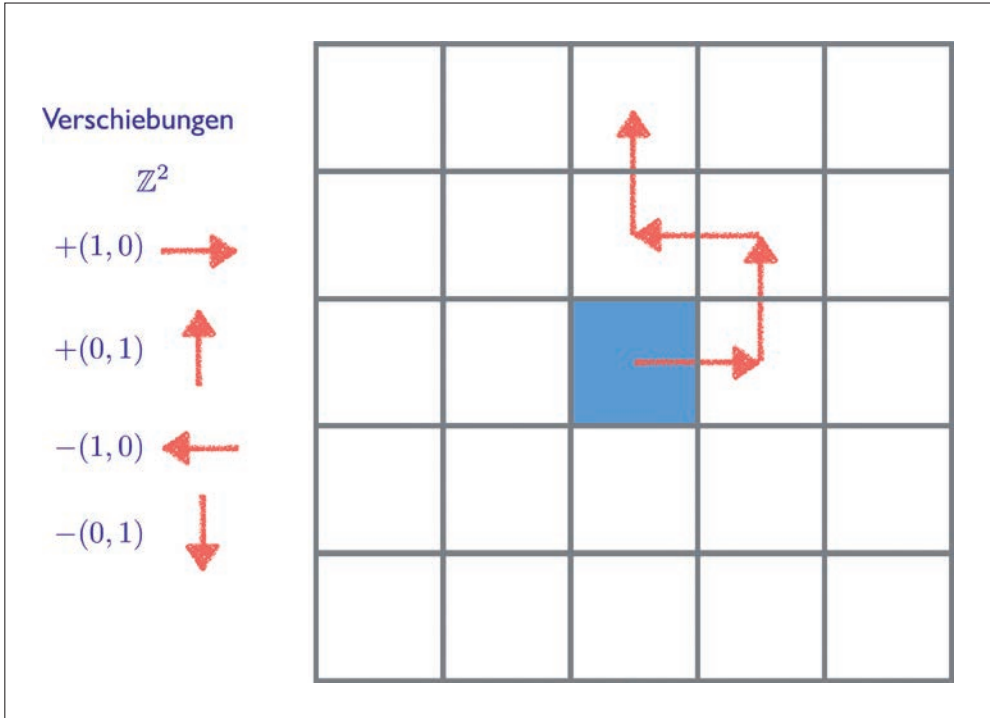


Abb. 3 Die Pflasterung der Ebene durch Quadrate lässt sich durch Anwendung der Verschiebungen aus einem Quadrat erzeugen. (Anna WIENHARD)

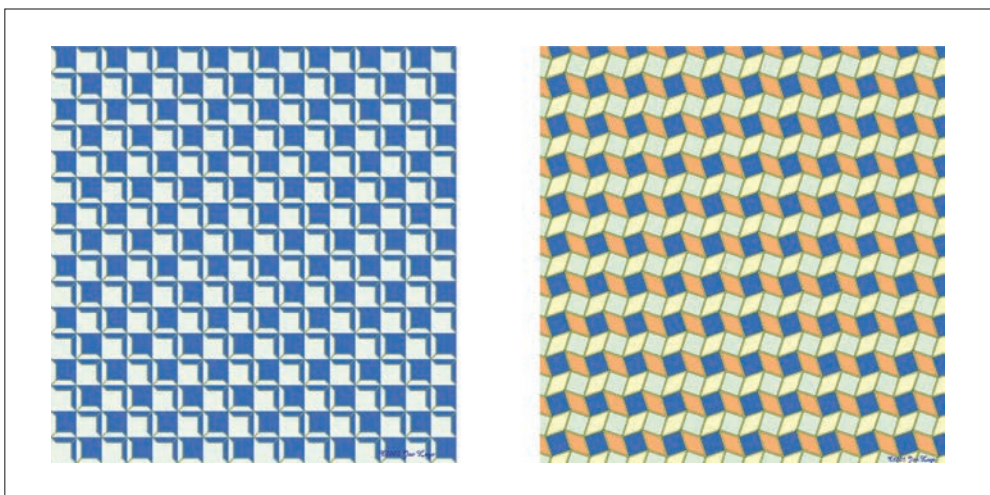


Abb. 4 Pflasterungen der Euklidischen Ebene (Jos LEYS)

Auf dem internationalen Kongress der Mathematiker im Jahre 1900 in Paris stellte David HILBERT (1862–1943) eine Liste von 23 mathematischen Problemen vor. Das 18. Problem in HILBERTS Liste betraf u. a. die Klassifikation kristallographischer Gruppen in beliebiger Dimension. HILBERT fragte, ob es in jeder Dimension n nur endlich viele Symmetriegruppen periodischer Pflasterungen des n -dimensionalen Euklidischen Raumes gäbe.

Nur wenige Jahre später wurde dieses Problem vollständig von Ludwig BIEBERBACH (1886–1982) gelöst. BIEBERBACH zeigte, dass die Symmetriegruppe einer periodischen Pflasterung des n -dimensionalen Euklidischen Raumes immer n verschiedene (d. h. linear unabhängige) Translationen enthalten muss. Und wie wir es für die Pflasterung der Ebene durch Quadrate gesehen haben, lassen sich die periodische Pflasterungen durch diese Verschiebungen bereits aus einem endlichen Teil erzeugen. Darüber hinaus bewies er, dass es in jeder Dimension nur endlich viele verschiedene kristallographische Gruppen gibt. BIEBERBACHS Theoreme bilden den Ausgangspunkt für viele aktuelle Forschungsfragen zur Klassifikation von Pflasterungen in anderen – nicht-Euklidischen – Geometrien, in denen jedoch oft ganz andere Phänomene zu Tage treten.

2.3 Aperiodische Pflasterungen

Nicht jede Pflasterung ist periodisch. Manchmal ist die Symmetriegruppe einer Pflasterung sogar endlich. Solche Pflasterungen nennt man aperiodisch. Für diese aperiodischen Pflasterungen gibt es keine Verschiebung, die die Pflasterung in sich selbst überführt. Und obwohl die Symmetriegruppe endlich ist, haben aperiodische Pflasterungen sehr bemerkenswerte Eigenschaften. Die bekanntesten aperiodischen Pflasterungen der Euklidischen Ebene sind die sogenannten Penrose-Pflasterungen (Abb. 5) des britischen Mathematikers Sir Roger PENROSE (*1931).

Die Penrose-Pflasterungen sind selbstähnlich, das bedeutet, dass sich endliche Teilmuster der Pflasterungen in größer und größer werdenden Stücken wiederfinden. Manche

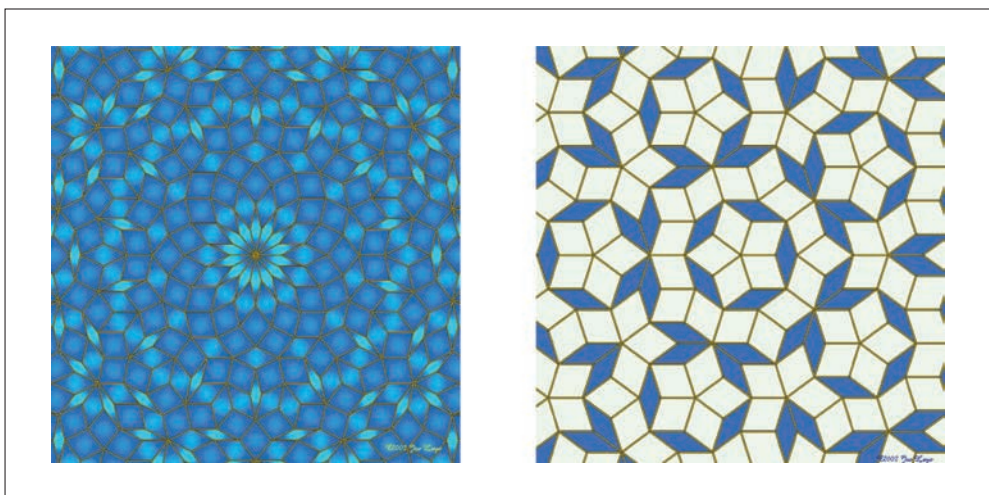


Abb. 5 Penrose-Pflasterungen (Jos LEYS)

Penrose-Pflasterungen lassen sich global durch eine Drehung um 72° in sich selbst überführen. Sie haben eine fünffache Rotationssymmetrie, wie sie auch bei Quasikristallen auftritt. Die einfachste Penrose-Pflasterung wird aus zwei konvexen Puzzleteilen konstruiert. Wenn man bestimmte Regeln zum Anlegen der Puzzleteile befolgt, ist sogar jede Pflasterung, die man mit diesen Puzzleteilen erhält, aperiodisch. Es ist ein offenes Problem, ob es ein konvexes Puzzleteil gibt, das die Euklidische Ebene nur aperiodisch pflastern kann.

3. Felix Kleins Programm: Geometrie ist Symmetrie

Das 19. Jahrhundert war ein wichtiges Jahrhundert für die Geometrie. In seinem *Erlanger Programm* stellte Felix KLEIN (1849–1925) im Jahre 1872 ein neues Konzept vor, das unser Verständnis von Geometrie in der Mathematik und der Theoretischen Physik bis zum heutigen Tag prägt. Felix KLEIN definierte Geometrie durch Symmetrie. In seinen eigenen Worten: „Geometrische Eigenschaften sind durch ihre Unveränderlichkeit gegenüber den Transformationen der Hauptgruppe charakterisiert.“¹ Das heißt, die geometrischen Eigenschaften eines Raumes sind bestimmt durch eine Gruppe von Transformationen, die wir als Symmetrien des Raumes auffassen. Diese Symmetriegruppe bestimmt dann, welche geometrischen Eigenschaften der Raum hat – es sind alle Eigenschaften, die unter der Symmetriegruppe erhalten bleiben. Eine Geometrie nach Felix KLEIN ist also bestimmt durch einen Raum X und eine Gruppe G von Transformationen dieses Raumes.

In der Euklidischen Geometrie ist unser Raum \mathbb{R}^n . Statt nun aber die Euklidische Geometrie durch das Messen von Abständen, Winkeln usw. zu bestimmen, legen wir in KLEINS Konzept die Gruppe der Symmetrien fest. Es ist die Gruppe von Transformationen, die durch Verschiebungen, Drehungen und Spiegelungen erzeugt wird. Die geometrischen Größen der Euklidischen Geometrie sind nun alle Größen, die unter diesen Transformationen unverändert bleiben, wie z. B. Abstände oder Winkel.

Wenn wir nun den gleichen Raum beibehalten, aber eine größere Gruppe von Transformation betrachten, werden weniger geometrische Größen erhalten. In KLEINS Worten: „Ersetzt man die Hauptgruppe durch eine umfassendere Gruppe, so bleibt nur ein Theil der geometrischen Eigenschaften erhalten.“²

Ein Beispiel hierfür ist die *affine Geometrie*. Hier ist der Raum der gleiche wie in der Euklidischen Geometrie. Als Transformationen lassen wir aber nun neben den Verschiebungen nicht nur Drehungen und Spiegelungen zu, sondern auch Streckungen. Alle invertierbaren (umkehrbaren) linearen Abbildungen des \mathbb{R}^n gehören hier zu unserer Transformationsgruppe.

Da wir Streckungen als Symmetrien zulassen, ist in der affinen Geometrie der Abstand zwischen zwei Punkten keine geometrische Größe. Er ist nicht invariant unter den affinen Transformationen. Parallelität ist hingegen eine affine Größe. Zwei parallele Geraden werden unter einer affinen Transformation wieder in zwei parallelen Geraden abgebildet. Das Bild eines Quadrats unter einer affinen Transformation ist daher immer ein Parallelogramm, aber im Allgemeinen kein Quadrat mehr. Unser Auge ist sehr an die Symmetrien

1 KLEIN 1872, S. 7.

2 KLEIN 1872, S. 9.

der Euklidischen Geometrie gewöhnt und erfasst affine Symmetrien nicht direkt. Für unser „Euklidisches“ Auge sehen zwei Objekte, die in der affinen Geometrie kongruent sind, sehr verschieden aus.

Felix KLEINS neuer Zugang erlaubte es, unterschiedliche neue Entwicklungen im Bereich der Geometrie in einem einheitlichen Konzept zu beschreiben. Wichtig waren hier insbesondere die hyperbolische Geometrie sowie die projektive Geometrie.

3.1 Hyperbolische Geometrie

EUKLID hatte in seinem Buch *Elemente* die Grundlagen der Geometrie geschaffen. Die Euklidische Geometrie beruht auf seinen fünf Axiomen. Das fünfte Axiom ist das sogenannte Parallelenaxiom, es war lange umstritten. Das Parallelenaxiom besagt, dass, wenn eine Gerade und ein Punkt, der nicht auf der Gerade liegt, gegeben sind, genau eine Gerade existiert, die durch diesen Punkt geht und parallel zu der gegebenen Gerade ist. Für viele Jahrhunderte war nicht klar, ob es wirklich nötig ist, das Parallelenaxiom als Axiom anzunehmen, oder ob es bereits aus den anderen vier Axiomen hergeleitet werden kann. Erst im 19. Jahrhundert wurde diese Frage endgültig beantwortet. János BOLYAI (1802–1860) und Nikolai LOBACHEVSKY (1792–1856) zeigten, dass es eine zweidimensionale Geometrie gibt, die die ersten vier Axiome von EUKLID erfüllt, nicht aber das Parallelenaxiom. Diese nicht-Euklidische Geometrie wird hyperbolische Geometrie genannt. In der hyperbolischen Geometrie gilt Folgendes: Für eine gegebene Gerade und einen Punkt, der nicht auf dieser Gerade liegt, gibt es unendlich viele Geraden durch diesen Punkt, die alle „parallel“ zu der gegebenen Gerade sind, d. h. dass sie diese Gerade nicht schneiden.

Eine andere nicht-Euklidische Geometrie ist die sphärische Geometrie. Sie ist die Geometrie auf der Oberfläche einer Kugel. Geraden in der sphärischen Geometrie sind Großkreise, sie sind die kürzesten Verbindungen zwischen zwei Punkten. Da sich zwei beliebige Großkreise immer schneiden, gibt es in der sphärischen Geometrie gar keine parallelen Geraden. Die Sphäre lässt sich nicht getreu in die Euklidische Ebene abbilden. Jede solche Abbildung verzerrt entweder Abstände oder Winkel oder Flächeninhalte – es gibt also keine getreue Landkarte der Erde.

Genauso lässt sich die hyperbolische Ebene nicht getreu in der Euklidischen Ebene abbilden. Ein Modell der hyperbolischen Ebene, in dem die Abstände verzerrt, aber die Winkel getreu abzubilden sind, ist das Poincaré-Kreisscheiben-Modell (Abb. 6).

In diesem Modell wird die hyperbolische Ebene als das Innere der Kreisscheibe vom Radius 1 beschrieben. Die Geraden durch den Nullpunkt sind genau Euklidische Geraden. Die Abstände sind jedoch nicht die Abstände, die wir in der Euklidischen Geometrie messen würden. Sie werden relativ zum Abstand zum Rand der Kreisscheibe skaliert. Je näher die Punkte zum Rand der Kreisscheibe sind, desto größer ist der hyperbolische Abstand relativ zum Euklidischen Abstand, den wir messen. Der Rand der Kreisscheibe ist nicht mehr Teil der hyperbolischen Ebene, sondern hat unendlichen Abstand von jedem Punkt im Inneren der Kreisscheibe.

Die kürzesten Verbindungen zwischen zwei Punkten in der hyperbolischen Geometrie sind Halbkreise, die den Rand der Kreisscheibe senkrecht schneiden. Geraden durch den Nullpunkt sind Kreise mit unendlichem Radius, also Geraden.

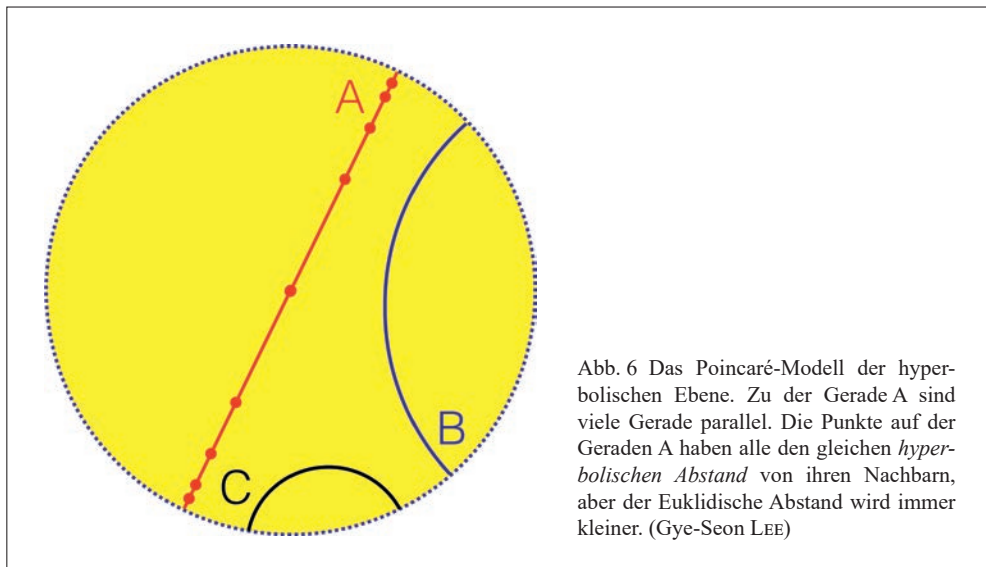


Abb. 6 Das Poincaré-Modell der hyperbolischen Ebene. Zu der Gerade A sind viele Gerade parallel. Die Punkte auf der Geraden A haben alle den gleichen *hyperbolischen Abstand* von ihren Nachbarn, aber der Euklidische Abstand wird immer kleiner. (Gye-Seon LEE)

Mit seinem neuen Zugang konnte Felix KLEIN die Euklidische Geometrie, die sphärische Geometrie und die hyperbolische Geometrie in einer universellen Weise beschreiben und zudem alle drei als Untergeometrien der projektiven Geometrie verstehen.

3.2 Projektive Geometrie

Die projektive Geometrie ist die Geometrie des perspektivischen Zeichnens. Die Euklidische Ebene wird durch Punkte im Unendlichen erweitert. Zwei parallelen Geraden schneiden sich in der projektiven Ebene in solch einem unendlichen Punkt. In der projektiven Ebene schneiden sich also je zwei Geraden immer. Mathematisch kann die projektive Ebene als die Geometrie aller Geraden durch den Ursprung bzw. Nullpunkt im Euklidischen dreidimensionalen Raum beschrieben werden (Abb. 7). Betrachtet man nun eine zweidimensionale Ebene im dreidimensionalen Euklidischen Raum, die den Nullpunkt nicht enthält, z. B. die Ebene $E = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid z = 1\}$, so bestimmt jeder Punkt in dieser Ebene eine Gerade durch den Nullpunkt. Für jeden Punkt $(x, y, 1)$ gibt es eine eindeutige Gerade, die durch die Punkte $(0, 0, 0)$ und $(x, y, 1)$ geht, und jede Gerade durch Null, deren z -Koordinate nicht konstant 0 ist, schneidet diese Ebene in genau einem Punkt. Die Geraden durch den Nullpunkt, deren z -Koordinate konstant (gleich 0) ist, korrespondieren zu den Punkten im Unendlichen.

Jede invertierbare lineare Abbildung des dreidimensionalen Euklidischen Raumes sendet Geraden durch den Nullpunkt auf Geraden durch den Nullpunkt und induziert somit eine Transformation der projektiven Ebene. Die projektive Ebene ist eng verwandt mit der zweidimensionalen Sphäre. Jede Gerade durch den Nullpunkt im dreidimensionalen Raum schneidet die Sphäre $S = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 + z^2 = 1\}$ in genau zwei Punkten, die einander gegenüberliegen. Die projektive Ebene kann also mit einer Sphäre, bei der jeder Punkt mit seinem gegenüberliegenden Punkt verklebt ist, identifiziert werden.

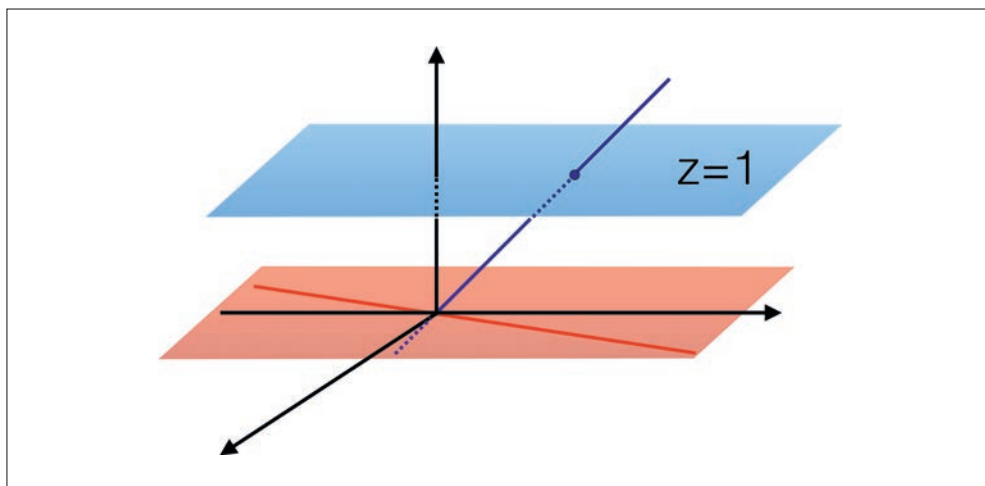


Abb. 7 Die projektive Ebene: Geraden durch den Nullpunkt im dreidimensionalen Euklidischen Raum (Gye-Seon LEE)

Die Euklidische Ebene und die hyperbolische Ebene lassen sich als Teilmengen der projektiven Ebene realisieren. Die Ebene E lässt sich mit der Euklidischen Ebene identifizieren. Die projektiven Transformationen, die die Ebene E auf sich selbst abbilden, wirken als affine Transformationen auf E . Euklidischen Symmetrien der Ebene E sind also Einschränkungen von speziellen projektiven Transformationen auf E .

Um die hyperbolische Ebene als Teilmenge der projektiven Ebene zu realisieren, betrachten wir das Hyperboloid

$$H = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid -x^2 - y^2 + z^2 = 1\}$$

im dreidimensionalen Euklidischen Raum.

Betrachtet man nun alle Geraden durch den Nullpunkt, die das Hyperboloid schneiden, so erhält man eine Teilmenge der projektiven Ebene. Diese Konstruktion gibt ein weiteres Modell der hyperbolischen Ebene, das sogenannte Kleinsche Modell. Im Gegensatz zum Poincaré-Kreisscheiben-Modell werden die Winkel im Kleinschen Modell nicht treu abgebildet. Der gemessene Euklidische Winkel entspricht nicht dem hyperbolischen Winkel. Die projektiven Transformationen, die das Hyperboloid bzw. die dadurch definierte Teilmenge der projektiven Ebene invariant lassen, wirken als Transformationen der hyperbolischen Ebene, also als hyperbolische Symmetrien. Euklidische, sphärische und hyperbolische Geometrie können so alle als Untergeometrien der projektiven Geometrie realisiert werden (Abb. 8).

4. Pflasterungen in anderen Geometrien

Kehren wir nun zurück zu Pflasterungen und deren Symmetriegruppen und betrachten diese auch für andere Geometrien.

Wir sprechen von einer Pflasterung, wenn ein Raum, z. B. die hyperbolische Ebene, durch unendliche viele Kopien von endlich vielen verschiedenen Puzzleteilen lückenlos

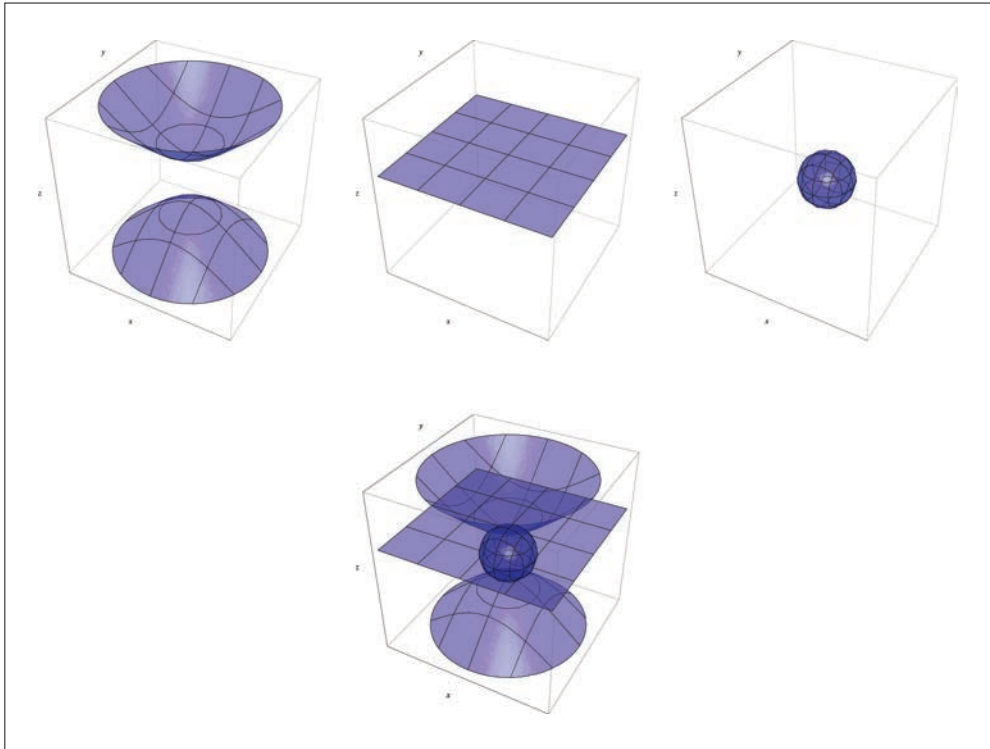


Abb. 8 Die hyperbolische Ebene, die Euklidische Ebene und die Sphäre lassen sich alle in den dreidimensionalen Euklidischen Raum einbetten. Dadurch können hyperbolische, Euklidische und sphärische Geometrie als Untergeometrien der projektiven Geometrie realisiert werden. Dies führt zu interessanten Forschungsfragen. Beispielsweise können kontinuierliche Übergänge zwischen sphärischen und hyperbolischen Geometrien zur Euklidischen Geometrie untersucht werden. (Gye-Seon LEE)

ausgefüllt wird (Abb. 9). Eine Kopie ist nun jedoch nicht mehr das Bild des Puzzleteils unter einer Euklidischen Symmetrie, sondern das Bild des Puzzleteils unter einer Symmetrie/Transformation des gegebenen Raumes, also z. B. das Bild unter einer hyperbolischen Symmetrie oder das Bild unter einer affinen oder projektiven Transformation. Für unser „Euklidisches Auge“ sehen die Kopien ein und desselben Puzzleteils daher recht verschieden aus.

Besonders schöne künstlerische Pflasterungen der hyperbolischen Ebene sind uns aus den Bildern von Maurits Cornelis ESCHER (1898–1972) wohlbekannt. In dem Poincaré-Kreisscheiben-Modell sehen die Kopien des einen Motivs immer kleiner aus, je näher das Motiv an den Rand rückt. Für ein „hyperbolisches Auge“ sind die unterschiedlichen Kopien aber alle identisch.

Das Studium der Symmetriegruppen periodischer Pflasterungen der hyperbolischen Ebene spielt in vielen Bereichen der Mathematik als auch in Gebieten der Theoretischen Physik eine wichtige Rolle. Ist die Situation in der hyperbolischen Geometrie einerseits komplexer, so lassen sich manche Probleme einfacher lösen. Es ist z. B. einfacher, aperiodische Pflasterungen der hyperbolischen Ebene zu konstruieren. Insbesondere lässt sich das

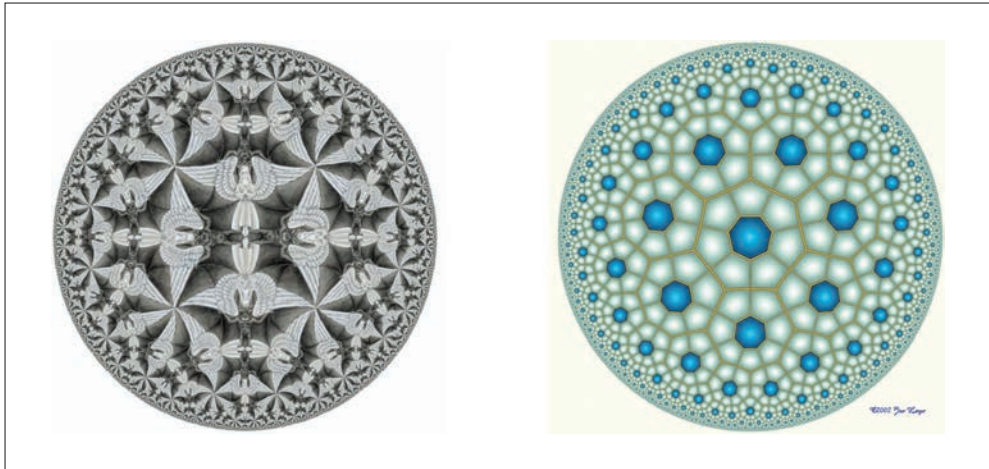


Abb. 9 Pflasterungen der hyperbolischen Ebene. Hyperbolische Pflasterungen sehen für unser Auge nicht nur anders aus als Euklidische Pflasterungen, sondern sie verhalten sich auch ganz anders. Während es, wie beschrieben, in der Euklidischen Geometrie nur endlich viele verschiedene Symmetriegruppen periodischer Pflasterungen gibt, sind es in der hyperbolischen Geometrie unendlich viele. Für jede ganze Zahl n größer gleich 3 gibt es eine periodische Pflasterung der hyperbolischen Ebene durch ein konvexes Polygon mit n -Ecken. (Jos LEYS)

in der Euklidischen Geometrie noch ungelöste Problem in der hyperbolischen Geometrie recht einfach lösen. In der hyperbolischen Ebene gibt es ein einzelnes konvexes Puzzleteil, das die hyperbolische Ebene nur aperiodisch pflastern kann.³

Affine Pflasterungen (Abb. 10) und ihre Symmetriegruppen bilden ebenfalls ein klassisches Forschungsgebiet, in dem es in den letzten Jahren viele interessante Fortschritte gab.

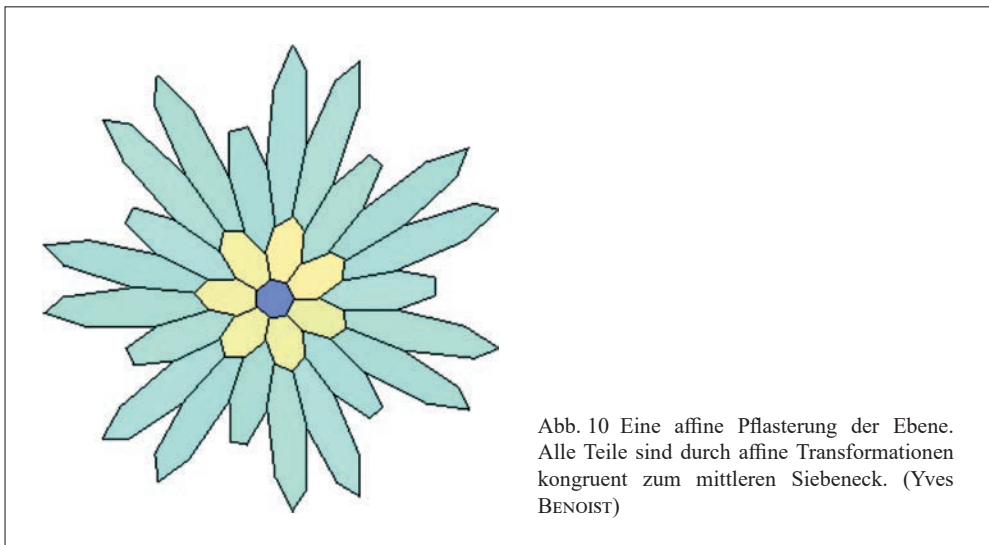


Abb. 10 Eine affine Pflasterung der Ebene. Alle Teile sind durch affine Transformationen kongruent zum mittleren Siebeneck. (Yves BENOIST)

³ Siehe MARGULIS und MOZES 1998.

Da affine Transformationen nicht die Abstände erhalten, erweisen sich viele Fragen hier als deutlich komplizierter als in der Euklidischen oder hyperbolischen Ebene.

Das Studium von Pflasterungen in der sphärischen sowie in der projektiven Geometrie hat einen anderen Charakter, da hier der zu pflasternde Raum bereits endlich ist (Abb. 11).

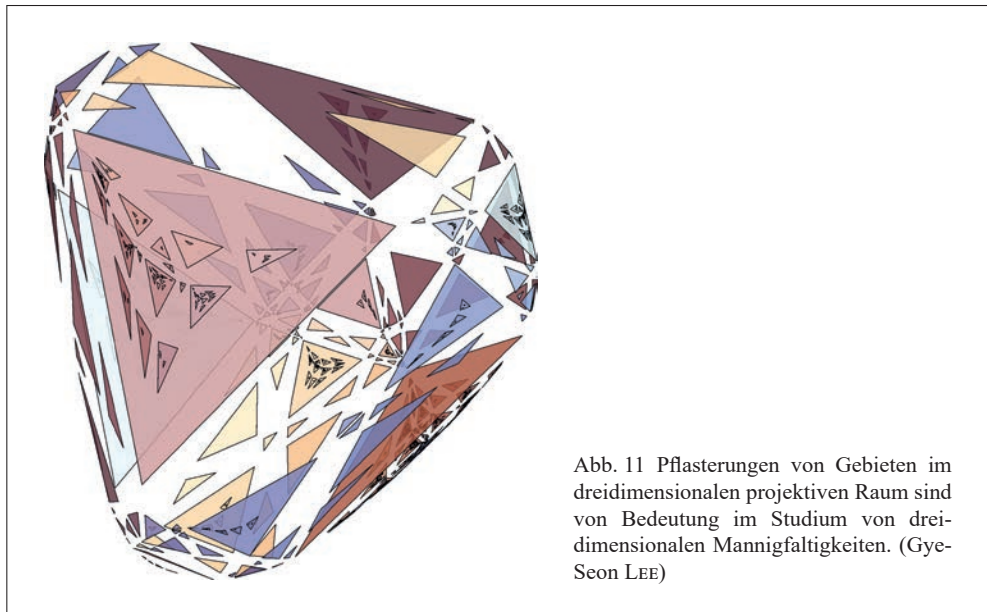


Abb. 11 Pflasterungen von Gebieten im dreidimensionalen projektiven Raum sind von Bedeutung im Studium von dreidimensionalen Mannigfaltigkeiten. (Gye-Seon LEE)

Aus diesem Grunde untersucht man in der projektiven Geometrie oftmals nicht Pflasterungen des gesamten Raumes, sondern gewisser Teilmengen. Pflasterungen spezieller Gebiete des projektiven Raumes und deren Symmetriegruppen haben sich in den letzten Jahren zu einem interessanten Forschungsfeld entwickelt.

5. Fazit

Symmetrien und Symmetriebrüche spielen in der Mathematik nicht nur in der Geometrie, sondern in allen mathematischen Bereichen eine wichtige Rolle. Sie bilden ein zentrales Prinzip bei der Suche nach Struktur. Wichtig ist insbesondere das Konzept der Symmetriegruppe, mit der die den Symmetrien zugrundeliegende algebraische Struktur effizient beschrieben wird. Das Entdecken von Symmetrien erlaubt es, komplexe Probleme auf die ihnen wesentliche Struktur zu reduzieren. So gelingt es manchmal, *a priori* unlösbar erscheinende Probleme zu lösen. Illustriert wurde dies hier an der Klassifikation aller Tapetenmustergruppen, die Mathematikern Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts gelang.

Die Konzentration auf die Symmetriegruppe liegt dem von Felix KLEIN im 19. Jahrhundert entwickelten Zugang zur Geometrie zugrunde. Felix KLEIN definierte Geometrie

im Wesentlichen als Symmetrie. Sein neues Verständnis von Geometrie ermöglichte nicht nur eine universale Beschreibung der damals bekannten Geometrien, sondern ist bis zum heutigen Tag für die Mathematik prägend. In anderen Geometrien (Abb. 12) als der uns wohl bekannten Euklidischen Geometrie sieht die Welt ganz anders aus. Hier gibt es noch viel zu entdecken!

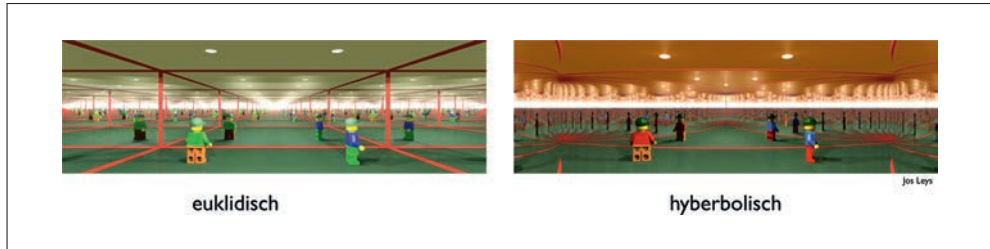



Abb. 12 In anderen Geometrien sieht die Welt ganz anders aus. Hier gibt es noch viel zu entdecken. (Jos LEYS)

Literatur

- EUKLID: Die Elemente. Bücher I–XIII. Aus dem Griechischen übers. und hrsg. von C. THAER. Einleitung von P. SCHREIBER. Frankfurt (Main): Deutsch 2003
- KLEIN, F.: Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen. Programm zum Eintritt in die philosophische Facultät und den Senat der k. Friedrich-Alexanders-Universität zu Erlangen. Erlangen: Deichert 1872
- MARGULIS, G. A., and MOZES, S.: Aperiodic tilings of the hyperbolic plane by convex polygons, Israel J. Math. 107/1, 319–325 (1998)

Prof. Dr. Anna WIENHARD
Mathematisches Institut
Universität Heidelberg
Mathematikon
Im Neuenheimer Feld 205
69120 Heidelberg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 6221 5414206
Fax: +49 6221 548312
E-Mail: wienhard@mathi.uni-heidelberg.de



Symmetrien und Asymmetrien gibt es in allen Bereichen der Wirklichkeit. Das Bestreben, ihr Wechselspiel zu erfassen, verbindet die Wissenschaften mit den Künsten. Symmetrie und Asymmetrie sind Strukturprinzipien, die sich in Mathematik und Philosophie abstrakt definieren lassen, aber auch in den empirischen Wissenschaften eine Vielzahl von Phänomenen in Natur und Kultur erklären können. Doch auch die Kunst – von der Musik bis zur Architektur – beschäftigt sich in jeweils eigener Weise mit Symmetrie und Symmetriebrüchen. Der Band liefert Beispiele, die von der Physik, insbesondere der Teilchenphysik, über die Astronomie, die Chemie (z.B. Spiegelbildsymmetrie und Chiralität) und die Biologie (z.B. Fortbewegung) bis in das Gebiet der Medizin (z.B. Krebsentstehung und Wundheilung) reichen. Außerdem werden Symmetriebrüche in der Moral, die Rolle von Symmetrie und Asymmetrie in der bildenden Kunst und die Symmetrie als strukturelles Prinzip des Denkens in der Moderne untersucht.

Die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften setzte sich auf ihrer Jahresversammlung am 18. und 19. September 2015 in Halle (Saale) mit dem Thema „Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst“ auseinander. Hervorragende Vertreter der unterschiedlichsten Disziplinen erörterten natur-, lebens- und verhaltenswissenschaftliche, physikalisch-chemische, medizinische, philosophische und ästhetische Facetten und Fragen des Wechselspiels von Symmetrie und Asymmetrie.

ISSN: 0369-5034

ISBN: 978-3-8047-3610-8