



Lars Jaeger  
Michel Dacorogna

# Wohin führt uns die Wissenschaft?

Und was wir tun können,  
um sie zu lenken

SACHBUCH



Springer

Wohin führt uns die Wissenschaft?

Lars Jaeger · Michel Dacorogna

# Wohin führt uns die Wissenschaft?

Und was wir tun können, um sie zu  
lenken

 Springer

Lars Jaeger  
Baar, Zug, Schweiz

Michel Dacorogna  
Zürich, Zürich, Schweiz

ISBN 978-3-662-69262-2      ISBN 978-3-662-69263-9 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-69263-9>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber\*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor\*innen und die Herausgeber\*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor\*innen oder die Herausgeber\*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

[https://stock.adobe.com/de/images/a-woman-s-eye-with-a-bright-light-shining-through-it-generative-ai/765246361?prev\\_url=detail](https://stock.adobe.com/de/images/a-woman-s-eye-with-a-bright-light-shining-through-it-generative-ai/765246361?prev_url=detail)

Planung/Lektorat: Caroline Strunz

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

## Zum Gedenken an Lars Jäger

*Wir haben dieses Buch fieberhaft zusammen mit Lars Jaeger in vierzehn Monaten geschrieben, während er mutig gegen seine Krankheit kämpfte. Dieses Buch erscheint nach seinem Tod. Er hat uns viel zu früh verlassen! Ich möchte hier der Gedankenwelt meines Freundes Tribut zollen, die sich durch das gesamte Buch zieht. Wenige Tage vor seinem Tod sagte ich zu ihm: „Lars, sei glücklich, du hinterlässt uns mit diesem Buch deine Gedanken und eine Lektion fürs Leben.“ Dieses Buch symbolisiert für mich Freundschaft und Überzeugung. Die Freundschaft, die uns während dieses gesamten Werks in einem ständigen Ideenaustausch begleitet hat. Die Überzeugung, die uns antreibt, dass Wissenschaft und Philosophie heute zusammenkommen müssen, damit wissenschaftliche Fortschritte der Menschheit bestmöglich dienen. Lars' Gedanken, seine umfassende Bildung und seine Willensstärke haben wesentlich zur Qualität dieses Buches beigetragen. Möge sein Andenken stets bei uns bleiben.*

# Einleitung

Vom Ende des 19. bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts, einer Zeitspanne, hat die Wissenschaft Fortschritte gemacht, die zur größten Revolution des menschlichen Denkens aller Zeiten geführt haben, radikaler als die Revolutionen der Renaissance und der Aufklärung, und dies ungefähr während der Lebenszeit eines einzelnen Menschen. In jeder wissenschaftlichen Disziplin kam es zunächst zu den grundlegendsten Krisen ihrer Geschichte, die Wissenschaftler wie nie zuvor frustrierten (und bei einem der führenden Wissenschaftler sogar zum Selbstmord führten). Dann kam das Wirken wissenschaftlicher Genies von atemberaubender Kreativität, die schließlich alle Wissenschaften auf ebenso aufregende wie bizarre Weise aus ihren Krisen herausführten. In diesem Prozess der völligen Umgestaltung aller ihrer Disziplinen stieß die Wissenschaft selbst an vielen Stellen an die Grenzen ihrer Vernunft und Kohärenz, da diese Entwicklungen auch die vor mehr als 2000 Jahren in der abendländischen Philosophie aufgestellten Grundsätze infrage stellten.<sup>1</sup>

In diesem Prozess erfuhr die Wissenschaft auch einen bedeutenden Wandel ihrer Grundlagen, der von ebenso großer philosophischer Bedeutung ist. Die Wissenschaftler waren gezwungen, ein Paradigma, auf dem ihre Überzeugungen bis dahin beruhten, radikal zu ändern: Sie mussten die Vorstellung aufgeben, dass ihre Aufgabe in der Suche nach ewigen Wahrheiten

---

<sup>1</sup> Für weitere Einzelheiten über die wissenschaftlichen Revolutionen zwischen 1870 und 1950 siehe: Lars Jäger, *Die Neuentdeckung der Welt – Wie Genies die Wissenschaften aus ihren tiefsten Krisen in die Moderne führten* Springer (2023).

besteht, eine wissenschaftliche Überzeugung, die tief in der abendländischen Philosophie verwurzelt war – und oft sogar religiöse Wurzeln hatte. Heute begnügt sich die Wissenschaft mit relativen Wahrheiten, d. h. mit Wahrheiten, die sich ändern können, sobald es empirische Beweise für eine bessere Wahrheit gibt, ohne dabei ihre Fähigkeit zu verlieren, unsere Realität zu verändern, ganz im Gegenteil. Darauf wird in Kap. 3 näher eingegangen.

Diese Entwicklungen in den Wissenschaften und vor allem die darauf basierenden technologischen Anwendungen haben die menschliche Gesellschaft seit 1950 bis heute tiefgreifend verändert. Verantwortlich dafür sind die folgenden drei Entwicklungen:

- *Die Zahl der Wissenschaftler* ist weltweit exponentiell gestiegen und hat sich mehr als verzwanzigfacht. Sie liegt heute bei etwa 9 Mio.
- Im gleichen Zeitraum hat sich die *Zahl der wissenschaftlichen Artikel* alle neun Jahre verdoppelt, d. h., sie ist von 1950 bis heute um das 250-Fache gestiegen.<sup>2</sup> In der Physik gibt es einen Witz, der besagt, dass etwas schneller als mit Lichtgeschwindigkeit wachsen kann und damit Einsteins Gesetze bricht: die Liste der Forschungsartikel, da die Anzahl der Forschungsartikel heute das einzige Kriterium für wissenschaftlichen Erfolg ist (die ironische Antwort der Physiker lautet, dass dieses Ereignis Einsteins Gesetze gar nicht bricht, da keine Information mehr übertragen wird).
- Auch die *reine Anzahl der wissenschaftlichen Bereiche* (Universitäten, Institute usw.) ist seit 1960 exponentiell gewachsen.

Eine Folge dieser „Explosion“ der wissenschaftlichen Forschung und der schiereren Zahl der seit etwa 1950 in diesem Bereich tätigen Personen und ihrer Publikationen ist, dass im Vergleich zu den 70 Jahren davor heute kein einzelner Wissenschaftler mehr so bekannt ist wie Albert Einstein, Max Planck oder Charles Darwin in der revolutionären Periode zwischen 1870 und 1950. Ab den 1960er-Jahren wurden auch die größten Wissenschaftler immer mehr zu Experten auf Spezialgebieten, deren Zahl nicht weniger schnell wuchs. Die Zeit der universellen wissenschaftlichen Genies war damit vorbei. Dies erklärt, warum die Namen der jährlich ausgezeichneten Nobelpreisträger der breiten Öffentlichkeit heute so gut wie unbekannt

---

<sup>2</sup>Für weitere Einzelheiten siehe: Lutz Bornmann, Ruediger Mutz, *Growth rates of modern science: Eine bibliometrische Analyse auf der Grundlage der Anzahl der Publikationen und der zitierten Referenzen*, Zeitschrift der Gesellschaft für Informationswissenschaft und Informationstechnik, 65, 11 (2015).

sind. Das macht es schwieriger, ein für Nichtwissenschaftler unterhaltsames Buch über diese Zeit zu schreiben als über die Zeit davor. Hinzu kommt, dass die verschiedenen Wissenschaften heute viel stärker miteinander vernetzt sind als früher, sodass sie kaum noch getrennt voneinander behandelt werden können. Dementsprechend verweisen wir gelegentlich mit entsprechenden Anmerkungen auf andere Kapitel. Manchmal behandeln wir auch in zwei Kapiteln das gleiche Thema aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

Dennoch sind es die Prozesse in den (Natur-)Wissenschaften und die durch sie ermöglichten Technologien, welche die heutige moderne menschliche Gesellschaft geschaffen haben. Neben den Wissenschaftlern, die immer tiefer in Bereiche wie die Teilchen(quanten)physik, die Funktion einzelner Gene oder das Verständnis des menschlichen Gehirns vordringen, sind es vor allem die dadurch möglich gewordenen technologischen Anwendungen, die unsere moderne Gesellschaft geformt haben und weiter formen – immer tiefer und immer schneller als je zuvor.

Dieses Buch gibt einen Überblick über den wissenschaftlichen Fortschritt seit 1960. Es wird aber auch erörtern, wie diese Technologien *das Leben der Menschen und der menschlichen Gesellschaften in Zukunft* gestalten könnten. Wir bewerten einige der wichtigsten Probleme der Gegenwart und der nahen Zukunft (wie den Klimawandel, den wahrscheinlichen Verlust des Schutzes persönlicher Daten, die mögliche genetische Veränderung unseres Körpers, virtuelle Realität) und Chancen (wie die Bewältigung des Klimawandels<sup>3</sup>). Dazu diskutieren wir auch einen philosophischen Kontext, der von der modernen Wissenschaft fast aufgegeben wurde. Diese Kombination aus historischem Kontext nach der wissenschaftlichen Revolution in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis heute, einer Diskussion der möglichen Auswirkungen auf unsere Gesellschaft in den nächsten 30 Jahren und einer philosophischen Perspektive darauf, ist unseres Wissens die erste veröffentlichte Diskussion dieser Art. Die grundlegende Frage lautet hier: Was sind diese dramatischen Veränderungen und wie sollen (und können) wir sie aus gesellschaftlicher und sozialer Sicht gestalten?

Bereits in den letzten 250 Jahren hat der Mensch seine Umwelt und seine Lebensbedingungen durch neue Wissenschaften und Technologien tiefgreifend verändert (die Entwicklung im 19. Jahrhundert bezeichnen wir bereits als „industrielle Revolution“). Die biologischen und geistig-seelischen

---

<sup>3</sup> Zur Diskussion von Fragen des Klimawandels und möglicher Wege zu dessen Bewältigung: Lars Jaeger, *Wege aus der Klimakatastrophe – Wie eine nachhaltige Energie- und Klimapolitik gelingt*, Springer (2021).

Grundlagen des Menschen sind dabei bisher weitgehend unangetastet geblieben. Nun aber wird der Mensch erstmals in der Geschichte selbst zum Gegenstand technologischer Entwicklungen. In der Dynamik des wissenschaftlich-technischen Fortschritts sind wir an einem Punkt angelangt, an dem Bio-, Gen-, Quanten- und Neurotechnologie und ihre Verknüpfungen untereinander den Menschen und die menschliche Zivilisation in bisher unvorstellbarer Weise verändern werden, und dies im Verlaufe eines Bruchteils eines Menschenlebens. Was uns also bevorsteht, ist nicht nur eine weitere industrielle Revolution, von denen es schon einige gegeben hat, sondern wir müssen uns auf eine erste *revolutionem humanam* vorbereiten, eine Revolution des Menschseins selbst, eine „Umkehrung“ dessen, was uns im Innersten zum Menschen macht, also dessen, was uns ausmacht.

Die technologischen Entwicklungen könnten alles Mögliche bewirken, von immer mehr Reichtum und einem immer besseren Leben (unwahrscheinlich) bis hin zu einer *Veränderung oder gar Neuprogrammierung des Menschen selbst* (viel wahrscheinlicher). In jedem Fall werden technologische Entwicklungen die Gesellschaft weitaus stärker prägen, als wir es bisher erlebt haben. Deshalb sollten nicht nur Naturwissenschaftlerinnen und Technologinnen diesen Wandel gestalten, sondern – neben Ökonominnen – auch Politikerinnen, Sozialarbeiterinnen und viele andere Menschen kritisch und nicht zuletzt steuernd mitwirken – dies nicht im Hinblick auf die Bereiche der Grundlagenwissenschaften, sondern auf die daraus resultierenden Technologien. Nicht zuletzt erfordert auch die Höhe der öffentlichen und privaten Mittel, die in die wissenschaftliche Forschung fließen, eine – bessere als die bisherige – Kontrolle ihrer Verwendung für technologische Entwicklungen.

Angesichts der Entwicklung der Wissenschaften und insbesondere der Technologien sind vor allem die Philosophen aufgerufen, die Entwicklung der Wissenschaften und Technologien kritisch zu beurteilen, auch wenn sie in den letzten 85 Jahren weit davon entfernt waren. Dabei ist die philosophische Auseinandersetzung mit den Wissenschaften nichts Neues: In der Geschichte der neuzeitlichen Wissenschaften hat die Philosophie seit ihren Anfängen mit Galilei, Kepler und Newton immer eine Schlüsselrolle gespielt. Allerdings befasste sie sich in der Vergangenheit fast ausschließlich mit dem, was Philosophen als *Erkenntnistheorie* (Epistemologie) bezeichnen, d. h. mit der Frage, inwieweit wissenschaftliche Ergebnisse von unserer eigenen, gegebenen Fähigkeit beeinflusst werden, Naturvorgänge zu beobachten und zu beurteilen. Ein für die Technik heute wichtigerer philosophischer Bereich ist die *Ethik*, also die Frage, was man tun kann, ohne gegen moralische Werte zu verstoßen. Was aber sind ethische Werte? Die Frage,

wie wissenschaftliche Forschung ethisch durchgeführt werden kann, ist eine philosophische und keine wissenschaftliche. Vielleicht kann der Einsatz von Atombomben durch die USA gegen Japan am Ende des Zweiten Weltkrieges als erstes Ereignis einer ethisch kritisch gewordenen Wissenschaft angesehen werden (mit einem nicht sehr ethischen Ergebnis).

Bei all diesen Diskussionen ist es wichtig, zwischen zwei Arten von Wissenschaft zu unterscheiden: die etablierten wissenschaftlichen Grundmodelle und Theorien einerseits und die aktuelle wissenschaftliche Forschung andererseits. Erstere stellen einen Wissensbestand dar, über den sich (fast) alle Wissenschaftler einig sind und an dem es derzeit keine ernsthaften Zweifel gibt. Klassische Beispiele hierfür sind die Tatsache, dass die Erde rund ist, dass alles Leben eine Evolution durchlaufen hat oder dass die Physik im atomaren Bereich anders ist als im Bereich, den wir Menschen wahrnehmen. Bei der anderen geht es um die Behandlung einer Reihe offener Forschungsfragen, die sich innerhalb der Wissenschaft oder aufgrund neuer gesellschaftlicher Probleme wie Klimawandel oder Pandemien stellen. Zweifel, Debatten und Kontroversen über aktuelle Forschungsfragen sind inhärenter Bestandteil wissenschaftlicher Forschung. Leider gibt es in nichtwissenschaftlichen Kreisen eine weit verbreitete Tendenz, diese beiden Aspekte der Wissenschaft zu verwechseln. So werden anerkannte Erkenntnisse, wie z. B., dass der Mensch dem Affen genetisch sehr ähnlich ist oder dass die Quantenphysik sehr, sehr gut mit Experimenten übereinstimmt, oft infrage gestellt, weil sie nicht mit unserer Alltagswahrnehmung übereinstimmen. Deshalb wird von Nichtwissenschaftlern oft pauschal verallgemeinert, dass Wissenschaft insgesamt relativ sei. Aber um es klar zu sagen: Unsere alltägliche Forschung ist relativ, d. h. Wissenschaftler haben verschiedene Meinungen, nicht aber das gesammelte wissenschaftliche Wissen. Diese beiden Bereiche müssen klar voneinander getrennt und unterschiedlich behandelt werden (wie wir in Kap. 14 ausführlicher diskutieren werden)!

Ein wichtiger Punkt der heutigen technologischen Entwicklungen ist: Während es in der Vergangenheit einzelne Technologien gab, die sich über Zeiträume von mehreren Generationen entwickelten, gibt es heute *eine ganze Liste von Schlüsseltechnologien*, die alle einen ähnlich massiven Einfluss auf unser Leben haben werden wie die technischen Revolutionen der Vergangenheit (und höchstwahrscheinlich einen noch größeren). Die Liste ist ebenso lang und faszinierend wie beängstigend: Die Transformationen kommen aus mehr als einem Dutzend verschiedener Richtungen, wobei jede Technologie einen grundlegenden Wandel für die Menschheit selbst mit sich bringen wird. Und jede von ihnen entwickelt sich mit einer Geschwindigkeit, die in weniger als einem Bruchteil einer Generation massive

Auswirkungen auf das Leben der Menschen haben wird. Alle zusammen bringen eine Tiefe des Wandels mit sich, die das menschliche Leben in heute noch unvorstellbarer, unkontrollierbarer und möglicherweise von den meisten Menschen nicht gewünschter Weise verändern wird. Es ist daher notwendig, dass eine *breite Öffentlichkeit* diese dramatischen Veränderungen versteht. Das wollen wir mit diesem Buch erreichen.

Bevor wir damit beginnen, möchten wir noch einen letzten Aspekt der modernen Wissenschaft erwähnen. Es handelt sich um die durch sie hervorgerufenen neuartigen Risiken, die – anders als etwa bei einzelnen Völkern nach der europäischen Invasion Südamerikas – zum Aussterben der *gesamten Menschheit* führen können. Beispiele sind Atombomben, aber heute auch biotechnologisch erzeugte Pandemien, genetische Manipulationen, Superintelligenzen und andere. Risikomanagement ist daher ein neues Instrument, das auch in der Wissenschaft angewendet werden muss, auch und gerade bei der Bewertung solcher Extremrisiken. Die Schlüsselfrage lautet hier: Wie bewerten wir wissenschaftliche Projekte mit ihren hochkomplexen Fragestellungen und Erkenntnissen hinsichtlich ihrer Verheißungen und Gewinne für die Menschen, aber auch die riskanten und gefährlichen Folgen der daraus entstehenden Technologien? Bei der Beschreibung der Wissenschafts- und Technikgeschichte der letzten 60 Jahre kommen wir also an der wichtigen Frage, wohin wir mit ihr gehen wollen, nicht vorbei – eine Frage, die philosophischer Natur ist und zugleich wichtiger, als sie es je in der Geschichte war.

Zum Aufbau des Buches: In den ersten beiden Kapiteln geht es um die allgemeine Entwicklung der Naturwissenschaften seit etwa 1960. Nachdem sich ihr Zentrum nach dem Zweiten Weltkrieg in die USA verlagert hatte (Kap. 1), nahm die Ausdifferenzierung der Naturwissenschaften stark zu und – parallel dazu – ihre finanzielle Abhängigkeit von Drittmitteln (Kap. 2). In Kap. 3 wird die Abkoppelung der amerikanisch geprägten Wissenschaften von der Philosophie und deren notwendige Rückkehr in die Wissenschaft, diesmal auch und insbesondere für die Ethik, dargestellt. In Kap. 4 werden dann die wichtigsten Technologien der Zukunft vorgestellt, von denen jede einen ähnlich tiefgreifenden gesellschaftlichen Wandel mit sich bringen dürfte wie die einzelnen technologischen Revolutionen der Vergangenheit (von der Mechanik und Thermodynamik in der ersten über die Elektrodynamik in der zweiten bis hin zur Quantenphysik in der dritten industriellen Revolution). Ab Kap. 5 werden dann die einzelnen Wissenschaftsbereiche – Physik (einschließlich der neueren Astrophysik), Chemie (die einerseits von der Physik impliziert wird und andererseits die Grundlage der Biologie bildet), Biologie (insbesondere die neue Genetik) und

Mathematik sowie zwei aus ihnen hervorgegangene Schlüsseltechnologien – näher beleuchtet:

- Kap. 5 und 6: Physik
- Kap. 7: Genetik und Biologie
- Kap. 8: Hirnforschung
- Kap. 9: Künstliche Intelligenz
- Kap. 10: Mathematik
- Kap. 11: Astronomie

Kap. 12 skizziert dann Szenarien, welche möglicherweise unvorstellbaren gesellschaftlichen Umwälzungen Wissenschaft und Technik in (naher) Zukunft mit sich bringen könnten, bevor es in Kap. 13 um die gesellschaftliche Gestaltung zukünftiger Wissenschaften und insbesondere der aus ihnen hervorgehenden Technologien geht. Ziel ist es dabei, den technologischen Wandel zum Nutzen aller Menschen zu gestalten.

Tauchen wir nun ein in das faszinierendste und für die Zukunft der menschlichen Kultur einflussreichste Gebiet, das uns mehr als alles andere bestimmen wird. Es ist faszinierend und beängstigend zugleich: Wir leben in einer Zeit großer Chancen, aber auch großer Risiken. Nur mit Vernunft und Wissen können wir eine bereichernde Zukunft gestalten.

Zug  
Zürich  
im Juni 2023

Lars Jaeger  
Michel Dacorogna

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                                                                                                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Die Übernahme der Führung in den Wissenschaften. Wie sich das Zentrum der Wissenschaft in nur wenigen Jahren von Europa in die USA verlagerte – und wie dies die Wissenschaft selbst veränderte</b> | <b>1</b>  |
|          | Genies erschaffen eine neue Welt                                                                                                                                                                       | 2         |
|          | Das Zentrum der Wissenschaft wandert von Europa in die USA                                                                                                                                             | 4         |
|          | Philosophische Implikationen der Quantentheorie – keine Realität mehr                                                                                                                                  | 7         |
|          | Äußerst kontroverse philosophische Diskussionen der Physiker der 1930er-Jahre                                                                                                                          | 9         |
|          | Wie Europa und die Philosophie ihre Vorherrschaft in der Wissenschaft verloren                                                                                                                         | 12        |
|          | Pragmatismus regiert jetzt die Wissenschaft – mit Konsequenzen                                                                                                                                         | 16        |
|          | Philosophie für die Quantenphysik – immer noch bedeutend                                                                                                                                               | 19        |
|          | Wissenschaftliche Revolutionen jenseits der Physik                                                                                                                                                     | 22        |
| <b>2</b> | <b>Öffentlich geförderte Wissenschaft im Wettbewerb mit privaten Unternehmen. Wissenschaft als Teil des Kapitalismus</b>                                                                               | <b>25</b> |
|          | Der Übergang von der wissenschaftlichen Grundlagenforschung zu technologischen Anwendungen                                                                                                             | 25        |
|          | Beziehung der Wissenschaften zu technologischen Anwendungen heute                                                                                                                                      | 28        |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Wer die moderne Wissenschaft finanziert                                                                                                               | 30 |
| Wie beurteilt man die Qualität wissenschaftlicher Arbeiten heute?                                                                                     | 34 |
| Wohin sollten wir in der Wissenschaft gehen?                                                                                                          | 36 |
| Drei Beispiele aus der Vergangenheit – von der Grundlagenforschung zur revolutionären Technologie: Penicillin, PCR und die Atombombe                  | 38 |
| Penicillin                                                                                                                                            | 38 |
| Die Atombombe                                                                                                                                         | 40 |
| Polymerase-Kettenreaktion PCR                                                                                                                         | 41 |
| Die wichtigsten technologischen Bestrebungen heute – und die der Zukunft                                                                              | 43 |
| <b>3 Philosophie in der Wissenschaft ist vorbei. Und warum wir sie wieder einführen müssen</b>                                                        | 49 |
| Die Tradition des Zusammenspiels von Wissenschaft und Philosophie                                                                                     | 49 |
| Der Zusammenbruch des absoluten Wissens in der Wissenschaft – auch eine tiefgreifende philosophische Herausforderung                                  | 55 |
| Wissenschaft und Philosophie – ist letztere auf erstere heute nicht mehr anwendbar?                                                                   | 58 |
| Offene Fragen in der Wissenschaft heute sind auch philosophische Fragen                                                                               | 63 |
| Wie der Einfluss der Philosophie auf die Wissenschaft bei aller Notwendigkeit auch heute noch kaum vorhanden ist                                      | 68 |
| Ein gutes Beispiel für die Interaktion von Philosophie und Wissenschaft: Die Forschung über die Natur des menschlichen Ich-Bewusstseins               | 74 |
| Immer wichtiger: Die Beziehung zwischen Wissenschaft und Ethik                                                                                        | 77 |
| <b>4 Vielversprechende und unheimliche Entwicklungen in zukünftigen Technologien. Ein Überblick</b>                                                   | 81 |
| Zukünftige technologische Anwendungen, die die Welt und den Menschen verändern                                                                        | 82 |
| I. Künstliche Intelligenz – Verbesserung oder Kontrolle unseres Lebens?                                                                               | 82 |
| II. Quantencomputer – millionenfach schnellere Berechnungen oder nur ein Traum der Physiker?                                                          | 84 |
| III. CO <sub>2</sub> -Neutralität – können wir in den nächsten Jahren genügend alternative Energien schaffen, um eine Klimakatastrophe zu verhindern? | 85 |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV. Kernfusion – die Lösung unserer Energieprobleme oder nur ein Thema der Jahrhundertträume?                                             | 88  |
| V. Die Genetik – Sieg über den Krebs oder Manipulation des Menschen?                                                                      | 88  |
| VI. Internet der Dinge – neue industrielle Technologien und intelligente Fabrikationen oder ein umfassender Eingriff in die Privatsphäre? | 90  |
| VII. Neuro-Erweiterungen – Verbesserung unseres Denkens und Handelns oder Abkehr von der heutigen Realität?                               | 91  |
| VIII. Unseren Geist verstehen – finden wir unser Ich oder ist es für Wissenschaftler prinzipiell unauffindbar?                            | 93  |
| IX. Digitale Algorithmen und Big Data – neue Profile für unser Leben oder Kontrolle des menschlichen Denkens und Handelns?                | 94  |
| X. Blockchain-Technologie – eine neues Zeichen oder nur eine temporäre Erscheinung?                                                       | 95  |
| XI. Cybersicherheit: Eine explizite große Gefahr?                                                                                         | 95  |
| XII. Nanotechnologie – Erschaffung von Dingen aus dem „Nichts“ oder nur ein Traum?                                                        | 95  |
| XIII. Stammzellen – Zellen, die alles können, auch für unseren gesamten Körper und Geist?                                                 | 96  |
| XIV. Biotechnologie – vom Frosch für den Apotheker bis zum Nano-Roboter im Körper, medizinischer Traum oder zukünftige Realität?          | 97  |
| XV. Neue Lebensmitteltechnologien – wie wir zehn Milliarden Menschen ernähren werden, oder nur eine wissenschaftliche Traumgeschichte?    | 98  |
| XVI. Synthetisches Leben – wenn der Mensch Gott spielt: Teil I                                                                            | 100 |
| XVII. Lebensverlängerung – wenn der Mensch Gott spielt, Teil II                                                                           | 101 |
| Sind dies alles die Technologien, die unsere Zukunft prägen werden?                                                                       | 102 |
| <b>5 Die Physik von 1960 bis heute. Und was wir noch nicht wissen</b>                                                                     | 103 |
| Die neue Quantenwelt – wie man mit einer unüberschaubaren Zahl neuer Teilchen umgeht                                                      | 103 |
| Eine erste Theorie, die verschiedene Teilchen und die starke Kraft integriert                                                             | 106 |

|          |                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|          | Das Standardmodell der Elementarteilchen                                                                                                                                                                                         | 112 |
|          | „Chaos“-Theorie und Emergenzmuster in der heutigen Physik                                                                                                                                                                        | 115 |
|          | Die heutige Situation im Makrokosmos – werden wir bald<br>Antworten auf die grundlegenden Fragen über das Universum<br>erhalten?                                                                                                 | 121 |
|          | Wie realistisch ist eine vereinheitlichende Theorie der Physik?                                                                                                                                                                  | 123 |
|          | Forschung in der Physik heute                                                                                                                                                                                                    | 124 |
|          | Die Philosophie der heutigen Physik                                                                                                                                                                                              | 126 |
| <b>6</b> | <b>Computer, Nanotechnologie, Internet und viele andere<br/>Technologien. Welche Vorteile und Herausforderungen<br/>hat uns die Physik gebracht und was wird sie uns in<br/>Zukunft bringen?</b>                                 | 131 |
|          | Welche neuen Technologien die Physik uns gebracht hat:<br>Eine enorme Menge an Lebensverbesserungen und ein paar<br>wichtige Fragen                                                                                              | 131 |
| <b>7</b> | <b>Biologie von 1953 bis 2023: Die großen Durchbrüche<br/>und ihre ethischen Fragen. Wie die Biologie zum Zent-<br/>rum der Wissenschaft wurde und heute auch im Zentrum<br/>der ethischen Fragen steht</b>                      | 153 |
|          | Die zweite Grundlage der Biologie: Die Genetik                                                                                                                                                                                   | 153 |
|          | Erste Schritte in der Gentechnik                                                                                                                                                                                                 | 157 |
|          | Die Entwicklung des Lebens auf der Erde                                                                                                                                                                                          | 161 |
|          | Ursprung des Lebens – das Wiederauftauchen von Emil Du<br>Bois-Reymond                                                                                                                                                           | 163 |
|          | Die Genetik seit den 1970er-Jahren                                                                                                                                                                                               | 170 |
|          | Revolution der Genetik im Jahr 2012 – dramatische wie<br>beängstigende neue Möglichkeiten                                                                                                                                        | 173 |
|          | Synthetisches Leben                                                                                                                                                                                                              | 175 |
|          | Lebensverlängerung                                                                                                                                                                                                               | 178 |
|          | Ethik für die heutige Biologie                                                                                                                                                                                                   | 181 |
| <b>8</b> | <b>Hirnforschung seit den 1990er-Jahren: Ein bedeutender<br/>Fortschritt im Verständnis des menschlichen (Selbst-)<br/>Bewusstseins oder ein wissenschaftlicher Angriff auf<br/>etwas, das außerhalb der Wissenschaft liegt?</b> | 187 |
|          | Die Geschichte der Hirnforschung bis zu den 1990er-<br>Jahren – eine eher kurze Geschichte im Vergleich zu dem, was<br>danach geschah                                                                                            | 187 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Frühe Hirnforschung ab 1990 – erste Erkenntnisse und noch viele Probleme                                                                                                                                                                                                     | 191 |
| Forschung über unser Bewusstsein – wie das Gehirn möglicherweise unseren Geist erzeugt                                                                                                                                                                                       | 193 |
| Über unser (Selbst-)Bewusstsein – grundlegende offene Probleme                                                                                                                                                                                                               | 196 |
| Weitere Methoden und Ergebnisse der Forschung über unser Bewusstsein                                                                                                                                                                                                         | 199 |
| Und ja, es verändert sich – die Plastizität unseres Gehirns                                                                                                                                                                                                                  | 202 |
| Schlüsseltechnologien – „Verbesserung“ unseres Verstandes durch Neuro-Enhancements                                                                                                                                                                                           | 204 |
| Weitere philosophische Fragen                                                                                                                                                                                                                                                | 207 |
| Unser Geist und unser Selbstbewusstsein – weitere empirische Studien, dramatische angewandte Technologien und – auch hier – ethische Fragen                                                                                                                                  | 213 |
| Zusammenfassung: Wissenschaftliche Erkenntnisse, philosophische und ethische Fragen und verbleibende Offenheit                                                                                                                                                               | 218 |
| Neue Fragen zu sozialen Beziehungen                                                                                                                                                                                                                                          | 220 |
| Was ist der Mensch? Und was sollte er sein?                                                                                                                                                                                                                                  | 221 |
| <b>9 Künstliche Intelligenz von den Anfängen über die Gegenwart zur Zukunft: Bedeutende Fortschritte beim Verstehen, Nachbilden und Verändern von uns Menschen oder lediglich technologische Fortschritte, die sich auf die Optimierung bestimmter Prozesse beschränken?</b> | 223 |
| Geschichte der künstlichen Intelligenz                                                                                                                                                                                                                                       | 225 |
| Geschichte von Computern und Computerwissenschaft                                                                                                                                                                                                                            | 227 |
| Wo die KI heute steht                                                                                                                                                                                                                                                        | 231 |
| Das derzeitige Zusammenspiel von KI und unserem Gehirn – führt das letztendlich zu übermenschlicher Intelligenz?                                                                                                                                                             | 236 |
| Wie KI – mit Big Data – unsere Gesellschaft schon heute prägt – auf beiden Seiten                                                                                                                                                                                            | 240 |
| Wer soll mit dem Niedergang unserer Privatsphäre umgehen?                                                                                                                                                                                                                    | 245 |
| Die Entwicklung von Big Data                                                                                                                                                                                                                                                 | 248 |
| Das mögliche Bewusstsein der (starken) künstlichen Intelligenz                                                                                                                                                                                                               | 253 |

|           |                                                                                                                                               |     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>10</b> | <b>Der Weg zur modernen Mathematik: Immer mehr Abstraktion, aber auch immer mehr konkrete Anwendungen</b>                                     | 257 |
|           | Mathematik vor 1920                                                                                                                           | 258 |
|           | Die Krise der Mathematik                                                                                                                      | 260 |
|           | Die Revolution                                                                                                                                | 264 |
|           | Der Weg zur modernen Mathematik – immer mehr Abstraktion                                                                                      | 267 |
|           | Konkrete Probleme mit <i>numerischen</i> Methoden angehen                                                                                     | 274 |
|           | Mathematik heute und in der Zukunft                                                                                                           | 278 |
| <b>11</b> | <b>Astronomische Forschung. Die älteste Wissenschaft der Geschichte mit den neuesten Ergebnissen über alle Wissenschaften hinweg</b>          | 283 |
|           | Eine (sehr) kurze Geschichte der Astronomie vor 1960                                                                                          | 283 |
|           | Revolution in der Beobachtung des Universums                                                                                                  | 286 |
|           | Neue Entdeckungen in den letzten 25 Jahren                                                                                                    | 290 |
|           | Kosmologie – wie das Universum entstanden ist                                                                                                 | 294 |
|           | Kosmologie – wie sich das Universum entwickelt hat                                                                                            | 296 |
|           | Kosmologie – die (derzeitige) einheitliche Theorie des Universums                                                                             | 299 |
| <b>12</b> | <b>Die Zukunft der Wissenschaften/Technologien? Vom utopischen Optimismus zum dystopischen Pessimismus (und möglicherweise wieder zurück)</b> | 307 |
|           | Weitere vielversprechende wie herausfordernde Aspekte in Wissenschaft und Technologie                                                         | 307 |
|           | CO <sub>2</sub> -Neutralität                                                                                                                  | 307 |
|           | Kernfusion                                                                                                                                    | 310 |
|           | Lebensmitteltechnologie                                                                                                                       | 314 |
|           | Synthetisches Leben und Lebensverlängerung                                                                                                    | 315 |
|           | Historische Fragen                                                                                                                            | 319 |
|           | „We go under“ gegen „Yes, we can“ – dystopischer Pessimismus versus utopischer Optimismus                                                     | 324 |
|           | Soziale Triebkräfte                                                                                                                           | 328 |
|           | An uns                                                                                                                                        | 330 |

|           |                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>13</b> | <b>Der Mythos von der optimal funktionierenden unsichtbaren Hand. Warum wissenschaftliche Erkenntnisse <i>und</i> mögliche Zukunftstechnologien in erster Linie öffentlich diskutiert und reguliert werden sollten</b>                    | 331 |
|           | Der Mythos von der unsichtbaren Hand                                                                                                                                                                                                      | 331 |
|           | Wer kann die Zukunft der Wissenschaft am besten gestalten? – I. Die Nebendarsteller: Kulturschaffende, Journalisten oder die Kirche?                                                                                                      | 337 |
|           | Wer kann die wissenschaftliche Zukunft am besten gestalten? – II. Die – demokratisch gewählte – Regierung?                                                                                                                                | 339 |
|           | Wer kann die Zukunft der Wissenschaft am besten gestalten? – III. Die Wissenschaftler selbst?                                                                                                                                             | 343 |
|           | Wer kann die wissenschaftliche Zukunft am besten gestalten? – IV. Wir alle                                                                                                                                                                | 343 |
| <b>14</b> | <b>Wissenschaft, Technologie und Spiritualität. Was die Wissenschaft für die Gesellschaft tun kann, wie die Gesellschaft die Technologie gestalten muss – und wie die Spiritualität diesem Gestaltungsprozess einen Rahmen geben kann</b> | 351 |
|           | Wie neue Technologien die Wirtschaft beeinflussen – in die richtige Richtung?                                                                                                                                                             | 351 |
|           | Mehr Offenheit, weniger Dogmatismus                                                                                                                                                                                                       | 354 |
|           | Rational irrational                                                                                                                                                                                                                       | 355 |
|           | Wie ein breites Wissen über Wissenschaft und Technologie und der rationale und demokratische Umgang mit ihnen die Welt sicherer und besser machen                                                                                         | 359 |
|           | Eine neue Sicht der „Spiritualität“                                                                                                                                                                                                       | 362 |
|           | Zusammenfassung: Ideen statt Ideologien                                                                                                                                                                                                   | 366 |
|           | <b>Namen Index</b>                                                                                                                                                                                                                        | 369 |

# 1

## Die Übernahme der Führung in den Wissenschaften. Wie sich das Zentrum der Wissenschaft in nur wenigen Jahren von Europa in die USA verlagerte – und wie dies die Wissenschaft selbst veränderte

Wie wir schon in der Einleitung sahen: Die 80 Jahre von 1870 bis 1950, ein Wimpernschlag in der Geschichte der Menschheit, waren die Zeit der größten Revolution im Denken aller Zeiten. Die Triebkraft dieser Revolutionen waren die Entwicklungen in den Naturwissenschaften, und am dramatischsten darunter die Umwälzungen in der Physik. Aber auch in allen anderen Wissenschaften gab es Umstürze, in der Biologie, der organischen Chemie, der Genetik, der Hirnforschung, der künstlichen Intelligenz usw., gar in der Mathematik.

Die Zeit von etwa 1960 bis heute brachte dann noch größere, dramatische Fortschritte, die nun Technologien hervorbrachten und immer mehr von diesen bestimmt wurden, die die Menschheit selbst wie in keiner Periode zuvor geprägt haben und die moderne Gesellschaft nicht nur ausmachen, sondern diese in der Zukunft auch noch viel stärker prägen werden. Schon bald werden sie wohl das Menschsein in seiner biologischen Basis selbst verwandeln.

In diesem ersten Kapitel werden wir einige der wichtigsten wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen in der Zeit ab den 1960er-Jahren beschreiben. Um diese tiefer zu erfassen, braucht es einen kurzen Rückblick auf die Entwicklung der Periode davor, d. h. die Jahre von ca. 1900–1950.<sup>1</sup> Der Schwerpunkt liegt dabei zunächst in der Physik, doch werden

---

<sup>1</sup> Für Details dieser revolutionären Entwicklungen siehe: Lars Jaeger, *Die Neuentdeckung der Welt – Wie Genies die Wissenschaften aus ihren tiefsten Krisen in die Moderne führten*, Springer (2022).

wir dramatische Veränderungen auch in anderen Bereichen erwähnen, um sie dann ab Kap. 6 ausführlicher zu behandeln.

## Genies erschaffen eine neue Welt

Genies zeichnen sich in der Regel durch mehr als nur eine besonders hohe Begabung auf einem Gebiet oder durch reine Intelligenz aus. Als Schöpfer von etwas völlig Neuem sind Genies besonders kreativ im eigentlichen Sinne des Wortes Kreativität. Dazu kommt viel Durchhaltewillen, um sich mit einem schwierigerem Problem über längere Zeit herumzuschlagen und dann mit geistiger Flexibilität etwas Fundamentales kognitiv zu drehen und zu wenden. Sie dringen so in Bereiche vor, die nicht nur jenseits des bereits Erforschten und Erreichten liegen, sondern von denen ihre Zeitgenossen nicht einmal wissen, dass sie existieren. Auf diese Weise erweitern die Genies die Grenzen des Bekannten und vergrößern den Bereich, der der Menschheit zur Verfügung steht.

In ihrer Geschichte haben die Wissenschaften immer wieder einzelne geniale Geister hervorgebracht. Kepler, Galilei, Newton und Leibniz waren solche Persönlichkeiten ihrer Zeit, ebenso wie James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann und Sofja Kowalewskaja in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Doch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts arbeitete in jeder wissenschaftlichen Disziplin eine erstaunlich hohe Zahl herausragender genialer Köpfe zusammen und tauschte sich rege aus, um schließlich (und nach vielen Krisen) die bedeutendsten Revolutionen in der Geschichte ihrer jeweiligen Wissenschaft zu schaffen. In der Physik und der Mathematik, der Chemie und der Biologie, aber auch in der Philosophie oder der Anthropologie sowie der Psychologie oder der Geschichte, eröffneten herausragende Denker und Forscherinnen ihren Disziplinen die Möglichkeiten, mit den Widersprüchen, die in vielen Feldern zutage getreten waren, umzugehen und sie teils gar technologisch auszunutzen. In einigen Fällen gelang es ihnen sogar, Widersprüche zu beseitigen, die schon den antiken Denkern bekannt waren. Ihr Mut und ihre Leistungen können daher nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Den Anfang machten Physiker wie Max Planck, Albert Einstein und Niels Bohr, als sie mit der Relativitätstheorie (Verbindung von Zeit und Ort zu einer vierdimensionalen Raumzeit) und ersten Schritten zur Quantentheorie (Verhalten kleinster Teilchen) die klassische Physik des 17. bis 19. Jahrhunderts hinter sich ließen und sich zuletzt gar außerhalb der westlichen Philosophie bewegten, die 2500 Jahre lang nie infrage gestellt worden war.

Tatsächlich hatten bis dahin alle Wissenschaften historisch auf Gedanken beruht, die von antiken Philosophen, insbesondere von Platon und Aristoteles, sowie dem christlichen Glauben an einen Gott geprägt wurden.<sup>2</sup>

In der Mathematik wiederum waren es Genies wie Cantor, Hilbert, Poincaré, Lebesgue, Borel, Emmy Noether, von Neumann, Kolmogorov und Gödel, die die sicheren und vertrauten Ufer der klassischen – eher konkreten – Version ihres Faches verließen und sich in neue, viel tiefere Gewässer vorwagten. Die ersten Akte der Genialität bestanden darin, die für viele frühere Mathematiker beängstigenden Eigenschaften unzähliger Unendlichkeiten mathematisch in Angriff zu nehmen und zudem nach Wegen zu suchen, mit Zufälligkeiten wahrscheinlichkeitstheoretisch umzugehen. Sie mussten die Klarheit und klassische Logik, die den Mathematikern bis zum späten 19. Jahrhundert Halt und Rahmen gegeben hatten, hinter sich lassen und entwickelten bzw. eroberten damit Bereiche der Mathematik, deren scheinbare Absurdität und hoher Abstraktionsgrad sich jeder Alltagserfahrung und Anschaulichkeit entziehen – die aber oft (manchmal erst viele Jahre später) für die Wissenschaft, insbesondere die Physik, von großer Bedeutung wurden. Es gelang ihnen sogar, den Zufall zu „beherrschen“, indem sie viele Ungewissheiten in messbare Größen, z. B. Risiken, umwandelten und damit unter anderem den Grundstein für ein quantitatives Risikomanagement legten.

Darüber hinaus erhielt ab dem frühen 20. Jahrhundert auch die Wissenschaft vom Leben, die Biologie, entscheidende Impulse. Es waren nicht zuletzt zahlreiche Physiker, wie Max Delbrück und sogar Erwin Schrödinger in seinem späten Leben, die sich der Biologie zuwandten. Mit ihrer Mathematik und Physik lösten sie die Rätsel, die die Forscher des 19. Jahrhunderts, Darwin und Mendel, in der Biologie hinterlassen hatten, und trieben die Entschlüsselung der Vererbung durch die Entdeckung des genetischen Codes voran. Der entscheidende Durchbruch in der Erfassung der molekularen Genstrukturen gelang 1953 mit der Entschlüsselung des DNA-Codes durch den Physiker Francis Crick und den Biologen James Watson – sowie durch die Chemikerin und Röntgenkristallografin Rosalind Franklin, die ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Entschlüsselung der Helix-Struktur des DNA-Moleküls spielte, dafür aber nicht die verdiente Anerkennung erhielt. Die sich daraus ergebenden Anwendungsmöglichkeiten in der Gentechnik sind heute wichtiger als je zuvor.

---

<sup>2</sup> Siehe Lars Jaeger, *Sternstunden der Wissenschaften*, Südverlag (2020).

Ein weiteres Beispiel für eine laufende Revolution in der heutigen Wissenschaft mit potenziell ebenso einflussreichen technologischen Folgen, die ihren Ursprung in der Entdeckung von Neuronen und Synapsen in unserem Gehirn vor mehr als 100 Jahren hat, ist das erst seit Kurzem (in den 1990er- und 2000er-Jahren) stark wachsende Verständnis der menschlichen Gehirnstruktur und unseres Denkens, in Zukunft möglicherweise sogar unseres Geistes (siehe Kap. 8). Neben der wissenschaftlichen Motivation, die wohl komplexeste Struktur, die wir heute im Universum kennen, zu verstehen, treiben zwei Hauptfaktoren den Ausbau der Neurowissenschaften voran. Der eine ist das wachsende Bewusstsein für die soziale und wirtschaftliche Belastung durch Hirnerkrankungen, aber auch Depressionen, die in den meisten Industrieländern mit zunehmendem Alter der Bevölkerung zunimmt. Der zweite Faktor ist die wachsende Zuversicht der Forschungsgemeinschaft, dass Hirnerkrankungen heute ein lösbares Problem darstellen. Krankheiten wie Depression, Schizophrenie, Schlaganfall und altersbedingter kognitiver Verfall, die früher als unvermeidliche Merkmale des menschlichen Daseins angesehen wurden, werden heute als spezifische Krankheiten betrachtet, deren Ursachen identifiziert werden können, und eines Tages wird es möglich sein, sie zu verhindern oder zu heilen. So gibt es z. B. bei der Behandlung von Hirntumoren (Glioblastomen), bis heute nicht behandelbar, seit einigen Jahren Fortschritte.

Mit der Differenzierung der Wissenschaft in spezialisierte Disziplinen wurde die Liste der laufenden wissenschaftlichen Revolutionen länger und länger. Zudem hat die Geschwindigkeit dieser Entwicklung ständig zugenommen – und nimmt weiterhin zu, sodass wir eine ständige Beschleunigung der sich daraus ergebenden Veränderungen in unseren Gesellschaften erleben.

## **Das Zentrum der Wissenschaft wandert von Europa in die USA**

Ein wichtiges Ereignis für die Entwicklung der modernen Wissenschaften war die Vertreibung wichtiger Wissenschaftler aus Deutschland durch die Nazis und den Ausbruch des Zweiten Weltkriegs in Europa in den späten 1930er- und frühen 1940er-Jahren. Dies führte zu einer erheblichen geografischen Verlagerung des wissenschaftlichen Schwerpunkts, von Europa, insbesondere Deutschland, in die USA (was unten in Details dargestellt wird). Dort entfaltete sich gerade eine weitere Gruppe von Genies, wie u. a. Ri-

Richard Feynman, der die erste kohärente Quantenfeldtheorie entwickelte, Robert Oppenheimer, (wissenschaftlicher) Leiter des Manhattan-Projekts, in dem die erste Atombombe gebaut wurde, John Bardeen, der mit seiner Halbleitertheorie die Miniaturisierung von Computern einleitete und dafür den Physik-Nobelpreis erhielt und der später auch die Supraleitung erklärte, wofür er einen zweiten Nobelpreis für Physik erhielt, und nicht zuletzt Linus Pauling, der ebenfalls zwei Nobelpreise erhielt, einen für Frieden (1961), den anderen 1954 für Chemie für seine Arbeit über die Natur chemischer Bindungen.

Die Übernahme der wissenschaftlichen Führungsrolle durch die USA hatte eine tiefgreifende Folge, auf die wir im weiteren Verlauf dieses Kapitels näher eingehen werden: Durch sie verwandelte sich das Verständnis von Wissenschaft selbst. Der Wandel, der in der Physik begann, der sich dann aber in allen anderen Wissenschaften durchsetzte, prägt die Wissenschaft bis heute: Die Wissenschaftler verließen den Bereich der philosophischen Reflexion, der in der europäischen Wissenschaft von ihrem Ursprung an eine so herausragende Rolle gespielt hatte. Das amerikanische wissenschaftliche Bildungssystem räumte der Allgemeinbildung (im Sinne Alexander von Humboldts) eine viel geringere Bedeutung ein als das europäische System. Es legte viel mehr Gewicht auf die Naturwissenschaften und ihre Fähigkeit, praktische Probleme zu lösen, als auf philosophische Fragen. So widmeten sich die Forscher nun viel mehr konkreten Anwendungsmöglichkeiten der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse, während in Europa die technologische Anwendung eher die Aufgabe von Ingenieuren denn von Wissenschaftlern gewesen war. Der Siegeszug der Technologien, die auf wissenschaftliche Entdeckungen folgten und unsere Welt noch immer bestimmen, ging somit hauptsächlich von den USA aus. Um nur einige (wichtige) davon zu nennen:

- die Elektronik in Verbindung mit der Miniaturisierung von Prozessoren (die durch die Quantenphysik ermöglicht wurde) führte zur Entwicklung der heutigen schnellen Computer,
- digitale Technologien,
- Laser,
- Handys,
- Satelliten außerhalb der Atmosphäre,
- Fernsehapparate,
- Nukleartechnologie,
- medizinische Diagnostik und Technologien zur Heilung von Krankheiten,

- neue Materialien mit neuen Funktionen, die in der Natur nicht vorkommen (bestes Beispiel: Kunststoff),
- gentechnische Verfahren,
- Neurotechnologien,
- eine neue Mathematik, deren Berechnungsmethoden (durch immer leistungsfähigere Computer) derart leistungsfähig ist, dass sogar weltweite hyperkomplexe Klimamodelle realistisch geworden sind.

Das erste Produkt der weltweit dominierenden US-Wissenschaft und ihrer Anwendungen entstand schnell: die Atombombe (während die deutschen Wissenschaftler, die ebenfalls an einer solchen Bombe arbeiteten, noch in der Denkphase darüber waren). Sie verwandelte die Welt in grundlegender Weise, indem sie die praktischen Konsequenzen globaler Kriege veränderte: Zum ersten Mal wurde das Aussterben der gesamten Menschheit mit einem Schlag möglich. Als Stalin nach dem Krieg die Bedeutung des technologischen Fortschritts für das Militär erkannte, erhöhte er den Stellenwert der wissenschaftlichen Akademien in seinem Land stark. Nur vier Jahre nach den USA hatte seine UdSSR die Atombombe selbst konstruiert, mithilfe sowjetischer Spione in den USA und Großbritannien (insbesondere Klaus Fuchs, der von Deutschland nach Großbritannien ausgewandert war und in den USA ab 1944 am Atombombenprojekt mitwirkte), die mit der marxistischen Ideologie sympathisierten.

Sowohl in den USA als auch in der UdSSR wurde der technischen Fortschritt durch Wissenschaften zunächst in Richtung militärischer Zwecke genutzt. Anders als in den USA blieb der wissenschaftliche Schwerpunkt in der UdSSR auch längerfristig im militärischen Bereich, während im Westen der Siegeszug der Technologien die gesamte Gesellschaft prägte. Er verbesserte das Leben aller Menschen. Neben der Schaffung eines breiten Wohlstands gab es eine weitere Folge der Trennung zwischen der Wissenschaft einerseits und der Philosophie und der klassischen Bildung<sup>3</sup> andererseits: die Öffnung der Naturwissenschaften für breitere Schichten. Es fand sozusagen eine Demokratisierung des Zugangs zur Wissenschaft statt, und durch die Schaffung eines breiteren Wohlstandes und besseren Lebensstils ergaben sich Möglichkeiten, dass auch begabte junge Menschen aus bescheidenen Verhältnissen als Wissenschaftler auf der sozialen Leiter aufsteigen konnten.

---

<sup>3</sup>Für die Trennung von Wissenschaft und Philosophie mit den Konsequenzen siehe: *The Origin of the Separation between Science and Philosophy*, Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, Vol. 80, No. 2 (May, 1952), pp. 115–139.

Die zunehmende Trennung von Wissenschaft und Philosophie hatte noch eine weitere Konsequenz: Wurden philosophische Kernfragen von der Wissenschaft nicht behandelt, geschweige denn beantwortet, so blieben Fragen nach den Grenzen der Vernunft, nach der Bedeutung des Zufalls in der Natur, nach der Existenz einer Realität außerhalb des Beobachters und ganz grundsätzlich nach dem Wesen des Lebens und des Bewusstseins einfach liegen. Das menschliche Ego bleibt heute weitgehend Terra incognita in den Wissenschaften. Dies führte zu seltsamen Situationen, wie etwa der Tatsache, dass wir, obwohl wir nicht konkret verstehen, was genau und warum etwas in der subatomaren Welt passiert, es genauer denn je zuvor berechnen können und dementsprechend auch technologisch steuern können. Betrachten wir im Folgenden also zunächst die philosophische Diskussionen in der Quantenphysik.

## Philosophische Implikationen der Quantentheorie – keine Realität mehr

Die Philosophie ist immer noch von großer Bedeutung für die Physik (und umgekehrt). Mehr als dreihundert Jahre lang, bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts, waren in der westlichen Welt die klassische Physik und die klassische Philosophie untrennbar miteinander verwoben. Letztere geht auf die antike hellenistische Tradition zurück, ergänzt durch moderne Philosophien, wie beispielsweise die von Immanuel Kant. In dieser Zeit war es für Physiker und andere Naturwissenschaftler selbstverständlich, sich an philosophischen Diskussionen zu beteiligen, waren doch deren Gesetze als absolut gültig angesehen, womit sie eine solide Grundlage auch für philosophische Fragen bildeten. Umgekehrt konnten viele Philosophen auch in den Naturwissenschaften tiefe Zusammenhänge erörtern; Kant beispielsweise lehrte an seiner Universität auch Newtons Physik. Erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts wurden die mathematischen Berechnungen in der Physik so komplex, dass nur noch wenige Philosophen die wissenschaftlichen Fortschritte nachvollziehen konnten. Die Physiker hingegen kannten und nutzten die Philosophie weiterhin sehr gut. Heisenberg zum Beispiel beschäftigte sich intensiv mit Platon, Einstein mit Spinoza, Leibniz, Berkeley<sup>4</sup> und Mach, Langevin mit Marx. Eine bestimmte Facette des von Platon und Aristoteles gepräg-

---

<sup>4</sup>In seinem Buch *De Motu* argumentierte Berkeley gegen Newtons Lehre von absolutem Raum, Zeit und Bewegung.

ten abendländischen philosophischen Denkens sollte den Physikern in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts jedoch viel zu schaffen machen: der Dualismus, der die Welt in zwei Teile trennt, die objektive Natur und das subjektive Erleben und Denken des Menschen. Dieser Dualismus war sogar die Grundlage der klassischen Physik. Denn genau das sind ihre wissenschaftlichen Ziele:

- die materiellen, unveränderlichen Bausteine der Welt zu finden,
- die Substanz der Dinge aus dem Wirrwarr subjektiver Eindrücke in Form ewig gültiger Gesetze zu extrahieren, dies mithilfe objektiver, wiederholbarer Experimente, die uns diese Naturgesetze liefern.

In den 1920er-Jahren wurde dann jedoch bekannt, dass in der Quantenwelt merkwürdige Zustände herrschen, insbesondere die eigenartige Eigenschaft von Elektronen und anderen kleinsten Teilchen sowie der elektromagnetischen Wellen, *Teilchen wie auch Welle* zu sein (allerdings nie beides zugleich), was in der klassischen Physik – wie auch unserer alltäglicher Vorstellung – unmöglich ist. Was es ist, welche Eigenschaft man erhält, hängt von der subjektiven Entscheidung ab, ein spezifisches Experiment durchzuführen. Angesichts der 2500 Jahre alten Tradition einer klaren Trennung von Objekten und Subjekten war dies eine seltsame Sache. Die Eigenschaften von Quantenobjekten, Elektronen, Photonen usw. sind vor der Messung nicht nur unbestimmt, *sie existieren überhaupt nicht!* Um es ganz klar zu sagen: Ein Quantenobjekt hat vor der Messung keine unabhängigen Eigenschaften! Erst die Messung verleiht ihm solche. Es hat keine Realität, sondern „nur“ eine Potenzialität, wie die Physiker sagen.

Mit der Quantentheorie verschwanden zentrale Begriffe des klassischen Denkens aus der mentalen Landkarte der Physik (wie auch der unsrigen im Alltag):<sup>5</sup>

1. Realität
2. Kausalität
3. Identität

Der letzte Punkt, die Ununterscheidbarkeit von Quantenteilchen, widerspricht dem klassischen philosophischen Prinzip, das Gottfried Wilhelm Leibniz 250 Jahre zuvor formuliert hatte, das aber bereits Aristoteles kannte:

---

<sup>5</sup> Für weitere Details siehe: Lars Jaeger, *Die zweite Quantenrevolution*, Springer (2018).

das *principium identitatis indiscernibilium* (*pii*). Dieses „Theorem der Identität des Ununterscheidbaren“ besagt, dass zwei getrennte Dinge, die in jeder Hinsicht völlig gleich sind, nicht existieren können. Für Immanuel Kant ist es vor allem der Faktor „Ort“, der für jedes Teilchen von Bedeutung ist: Selbst wenn die Eigenschaften zweier Teile aus demselben Material sind und von demselben Mechanismus beherrscht werden und somit sehr gleich erscheinen, müssen sie sich zumindest an verschiedenen Orten befinden. Die Tatsache, dass *pii* in der Mikrowelt nicht gilt, ist keine theoretische Spielerei, sondern der eigentliche Grund, warum in der Quantentheorie grundsätzlich andere Gesetze gelten als in der klassischen Physik.

## Äußerst kontroverse philosophische Diskussionen der Physiker der 1930er-Jahre

Wenn aber für die Mikro- und die Makrowelt sehr unterschiedliche Gesetze gelten, muss es einen Bereich dazwischen geben, in dem sich die Gesetze von einem Bereich in den anderen übertragen. Dies führte Mitte der 1930er-Jahre zu einer spitzfindigen philosophischen Diskussion unter den Physikern. Wir wollen diese kurz betrachten.<sup>6</sup> Bohr hatte pragmatisch festgestellt, dass die Gesetze der klassischen Physik für „ausreichend große“ Systeme gelten und die Gesetze der Quantenwelt für „ausreichend kleine Systeme“. Wo genau auf der Größenskala sich der Übergang jedoch befindet, musste er völlig offen lassen. Allerdings mussten er und seine Anhänger davon ausgehen, dass der Übergang nicht allmählich erfolgt, sondern dass es eine scharfe Trennung geben muss (der sog. „Heisenberg-Schnitt“). Die Alternative wäre gewesen, dass es einen Bereich gibt, in dem zwei verschiedene Typen von Gesetzen gleichzeitig gelten.

Schrödinger und Einstein erkannten, dass der Begriff des Heisenberg'schen Schnitts nur eine zentrale logische Lücke in der Bohr'schen Interpretation verdeckte: Irgendwo auf der Größenskala müssen sich die Quantenwelt und die makroskopische Welt, in denen jeweils ganz andere Gesetze gelten, berühren. An diesem Punkt gehen die Gesetze der Quantenwelt in die Gesetze der Makrowelt über und umgekehrt. Dabei muss auch sichergestellt werden, dass die für uns bizarren Gesetze der Quantenwelt nicht in die Makrowelt „einsi-

---

<sup>6</sup>Für weitere Details siehe: Lars Jaeger, *Die Neuentdeckung der Welt – Wie Genies die Wissenschaften aus ihren tiefsten Krisen in die Moderne führte*, Springer (2022).

ckern“. Wie soll das bei diesen Unterschieden funktionieren? Und wo genau auf der Größenskala soll der Heisenberg-Schnitt liegen?

In seinem Aufsatz „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“<sup>7</sup> von 1935 beschrieb Schrödinger, um das Problem noch einmal genau zu illustrieren, sein berühmtes Gedankenexperiment mit der Katze. Damit wollte er die Absurdität des Heisenberg’schen Schnitts aufzeigen: In einer verschlossenen Stahlkammer befinden sich eine Katze und eine so berechnete Menge einer radioaktiven Substanz, dass statistisch gesehen eines ihrer Atome pro Stunde zerfällt. Da nur ein Mittelwert zu steuern ist, kann es sein, dass in einer Stunde ein, zwei, drei oder gar kein Atom zerfällt. Jeder Zerfall eines Atoms wird von einem feinen Messgerät erfasst; kommt es zu einem Zerfall, so zerschellt ein Behälter mit tödlicher Blausäure. Nach einer Stunde weiß ein Beobachter nicht, ob eines der Atome zerfallen ist und damit, ob die Katze noch lebt oder nicht. Das Geniale an Schrödingers Gedankenexperiment ist, dass es die Quanten- und Makrowelt kausal direkt miteinander koppelt und damit die von Bohr und Heisenberg postulierte strikte Trennung durchlässig macht: Es muss nur ein Atomkern, also ein Quantenteilchen, zerfallen, damit ein makroskopisches Objekt, die Katze, direkt betroffen (hier: getötet) wird.

- Solange am Atomkern keine Messung stattfindet, befindet dieser sich in einem Zustand der Überlagerung von „zerfallen“ und „nicht zerfallen“. Das ist quantenphysikalisch möglich.
- In Schrödingers Versuchsanordnung ist nun auch der Zustand der Katze in der Stahlkammer unbestimmt. Sie soll also nun aus einer Überlagerung von „tot“ und „lebendig“ bestehen: Solange die Tür zur Box nicht geöffnet wird, befindet sich die Katze objektiv in beiden Zuständen gleichzeitig! Dies ist makroskopisch nicht möglich.

Dieses Paradoxon war genau Schrödingers Absicht. Niemand bezweifelte, dass die Quantengesetze in der Mikrowelt gültig waren. Die Frage war: Wie weit reicht ihre Kraft in die Makrowelt hinein? Wo in der Kette Atomkern – Messgerät – Blausäureampulle – Katze – Beobachter muss man den Übergang von der Quantenwelt zur Makrowelt ansetzen, in der wir unseren gewohnten Anschauungen trauen dürfen und Objekte klar definierte und unabhängige Eigenschaften haben?

---

<sup>7</sup> Erwin Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, Naturwissenschaften. Volume 23 (1935), S. 844–849.

Die Wissenschaftler gaben alle recht unterschiedliche Antworten. Und Schrödinger selbst? Wo machte er den Schnitt? Er fand seinen eigenen Weg, sich dieser Frage zu nähern: Er betrachtete den Messprozess als zentralen Level, denn genau dort kommt ein Gerät aus der Makrowelt mit einem Quantenobjekt in Berührung. Während andere Physiker die makroskopische Welt strikt von der Quantenwelt trennten, wendete Schrödinger das Prinzip der gemeinsamen Wellenfunktion konsequent auch auf makroskopische Messungen an, d. h. auf den Moment, in dem das makroskopische Messsystem mit dem zu messenden Quantenobjekt in Kontakt kommt. Etwas beiläufig bemerkte er dazu:

*„Sie [die  $\Psi$ -Funktion des Messobjektes] hat sich, nach dem zwangsläufigen Gesetz der Gesamt- $\Psi$ -Funktion, mit der des Messinstrumentes verheddert [...]“*

Damit gab Schrödinger seiner Interpretation einen eigenen Namen, der heute an Bedeutung kaum zu überbieten ist: „Verschränkung“:

*„Diese Eigenschaft [Verschränkung] ist nicht **eine**, sondern **die** Eigenschaft der Quantenmechanik, die eine, in der sich die gesamte Abweichung von der klassischen Denkweise manifestiert.“<sup>8</sup>*

Der erbittertste Gegner der Quanten-Unschärferrelation war jedoch Albert Einstein. Im Jahr 1935 veröffentlichten er und seine amerikanischen Assistenten Boris Podolsky und Nathan Rosen den Artikel: „Can the quantum mechanical description of physical reality be considered complete?“<sup>9</sup> Das Gedankenexperiment, das später als Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon (EPR) bezeichnet wurde, war ebenso genial wie einfach: Zwei Quanten-Teilchen, die sich in Überlagerung zueinander befinden, sind Teil einer gemeinsamen Wellenfunktion. Ihr Impuls kann nicht genau bestimmt werden, aber es ist bekannt, dass der Impuls des einen Teilchens direkt mit dem Impuls des anderen Teilchens zusammenhängt. Nun werden die beiden Teilchen voneinander getrennt und an zwei verschiedene Orte gebracht. Dann wird der Impuls eines dieser Teilchen gemessen, sodass die gemeinsame Wellenfunktion kollabiert und der Impuls des Partnerteilchens nun ebenfalls (sofort) definiert ist. Das kann aber nicht sofort geschehen, da es gegen Ein-

<sup>8</sup>E. Schrödinger, Discussion of Probability Relations between separate systems. *Proceedings of the Cambridge Physical Society*, 31, (1935) S. 555.

<sup>9</sup>Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?, *Physical Review*, 47, 10 (1935) Pages 777–780.