ISSN 1865-8032

19

Juli 2017
Sonderheft
Interdisziplinäre
Entfremdung?

Briefe zur Interdisziplinarität

Eine Publikation der
Andrea von Braun Stiftung

voneinander wissen

Impressum
Briefe zur Interdisziplinarität
ISSN 1865–8032

Herausgeber:
Andrea von Braun Stiftung
Mauerkircherstraße 12,
D-81679 München
office@avbstiftung.de

Redaktion (Adresse wie Herausgeber):
Isabella Weinberger, M.A. (verantwortlich)
Dr. Christoph-Friedrich von Braun, M.Sc.

Verlag: oekom verlag, Gesellschaft für Kommunikation mbH
Waltherstraße 29, D-80337 München
Tel. + 49 (0) 89 54 41 84 - 0
Fax + 49 (0) 89 54 41 84 - 49
E-Mail kontakt@oekom.de, www.oekom.de

Gestaltung & Satz:
Grafik·Design Weinberger-May, München
www.weinberger-may.de

Anzeigen:
Stefanie Ott
(verantwortlich, Adresse wie Verlag)
Tel. + 49 (0) 89 54 41 84 - 35
anzeigen@oekom.de

Druck: Kessler Druck + Medien
Michael-Schäffer-Straße 1,
D-86399 Bobingen

Erscheinungsweise: zweimal im Jahr

Bezugsbedingungen:
Jahresabonnement 30 EUR,
Einzelheft 19,80 EUR.
Alle Preise inkl. MwSt., zzgl. Porto- und Versandkosten.

Abbestellungen sechs Wochen vor Ablauf des Abonnementjahres. Zahlungen im Voraus.

Abonnementverwaltung:
InTime Media Services GmbH
Zeitschriften oekom
Postfach 1363
82034 Deisenhofen
Tel.: +49 (0)89 - 85853570
E-Mail: oekom@intime-media-services.de

Die Autoren sind für ihre Beiträge selbst verantwortlich, ihre Meinung entspricht nicht immer der Ansicht des Herausgebers. Nachdruck nur nach Absprache mit dem Herausgeber. Alle Rechte vorbehalten.

ClimatePartner°
klimaneutral

Verlag | ID: 128-50040-1010-1082

Gedruckt auf Circleoffset White 100% Recycling von Arjo Wiggins/Igepagroup.

Andrea von Braun Stiftung

voneinander wissen

Selbstverständnis

Die Zeitschrift „Briefe zur Interdisziplinarität“ lädt ein zum Denken und zum Dialog über Disziplingrenzen hinweg. Ihr Anliegen ist das gleiche wie das der Andrea von Braun Stiftung: die gegenseitige Anregung und der Austausch zwischen allen Gebieten der Geistes-, Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften, der Kunst, des Handwerks, traditionellen Wissens und sonstiger Fähigkeiten sowie die Entwicklung und Umsetzung neuer, interdisziplinär geprägter Methoden. Sie ist geleitet von der Überzeugung, dass die wichtigsten und interessantesten Entwicklungen an den Rändern der Wissensgebiete oder zwischen ihnen stattfinden. Diese zu ermöglichen und erfahrbar zu machen, ist das vorrangige Ziel der Stiftung.

Inhaltlich beruht die Zeitschrift auf der Publikation so genannter Lernpapiere. Hierbei handelt es sich um Erfahrungsberichte, deren Erstellung zu den Förderbedingungen der Andrea von Braun Stiftung gehören. In ihnen werden nach Abschluss eines Förderprojekts dessen interdisziplinäre Aspekte gezielt ausgewertet und dargestellt. Soweit sinnvoll enthält jede Ausgabe der „Briefe zur Interdisziplinarität“ einen breit definierten Schwerpunkt, in dem die Lernpapiere zu thematischen Gruppen zusammengefasst werden. Wir wollen mit den Briefen die spezifischen interdisziplinären Erfahrungen der Stiftungsstipendiaten sowohl einschlägig tätigen oder betroffenen Organisationen als auch interessierten Einzelpersonen zur Verfügung stellen.

Vorwort

Die vorliegende Nr. 19 unseres newsletters Briefe zur Interdisziplinarität ist zugleich auch eine Sondernummer. Sie enthält nicht wie sonst zwischen 5 und 10 Lernpapieren zu Projekten, die die Andrea von Braun Stiftung gefördert hat, sondern nur einziges Papier *Irena Doicescu* („Gibt es interdisziplinäre Entfremdung? Das Beispiel von Physik und Philosophie"), das zum einen nicht auf einem von uns geförderten Projekt beruht, sondern selber ein „Projekt" darstellt, und das man zum anderen nicht als ein LERNpapier bezeichnen kann.

Die Entstehung dieses Papiers hatte eine gewisse Vorgeschichte. Im Herbst 2015 erhielten wir von der Autorin einen Antrag auf Förderung ihrer Zweitdissertation. Sie ist Physikerin und zugleich Philosophin. Gegenstand ihrer Forschung sollte die Zusammenfassung der verschiedenen philosophischen Lehrmeinungen zum Modellbegriff sein und deren Anwendbarkeit auf die heutige physikalische Arbeit untersuchen. Ziel war die Erstellung einer gemeinsamen Rezeption des Modellbegriffs in Physik und Philosophie.

Unsere Stiftung empfand dies als einen grundsätzlich sehr interessanten Ansatz. Es gab jedoch vor allem ein Bedenken: Bei der Beurteilung von Anträgen erwarten wir u.a. stets, dass die jeweils in einem Projekt berührten Disziplinen möglichst weit von einander entfernt liegen, d.h. verschiedenen Wissenschaftsfamilien wie z.B. Humanwissenschaften, Geisteswissenschaften, Sozialwissenschaften etc. angehören, und dass sie in der Vergangenheit möglichst wenig, am liebsten sogar keinen Kontakt miteinander gehabt haben sollen. Bei der Kombination von Physik und Philosophie war zwar das erste dieser beiden Kriterien erfüllt, das zweite jedoch unserer Ansicht nach nur sehr eingeschränkt. Im Laufe des letzten Jahrhunderts oder – wenn man noch weiter zurückgeht – des letzten halben Jahrtausends hat es eine ungeheure Vielzahl von Kontakten und Kooperationen zwischen beiden Gebieten gegeben. Die großen Denker wie Descartes, Newton, Leibniz und andere wurden mangels eines besseren Begriffs sogar als „Naturphilosophen" bezeichnet. Auch im 20. Jahrhundert griffen Physiker wie Rutherford, Plank, Einstein, Heisenberg, Bohr, Weizsäcker auf philosophische Arbeiten zurück, typischerweise um Denkmodelle zu prüfen, die jenseits der Experimentbarkeit lagen. Physik und Philosophie, so erschien es uns in der Stiftung, waren alte Freunde, die sich gegenseitig gut kannten und auf eine erfolgreiche Tradition der Kooperation zurückblicken konnten. Eine Förderung kam also nicht in Betracht. Entsprechend schrieben wir an die Antragstellerin und dachten, die Sache habe sich damit erledigt.

Es kam jedoch eine Antwort, aus der sich eine Korrespondenz entwickelte, die hier nur kondensiert und damit in meinen Worten wiedergegeben werden kann. Grundsätzlich, lautete die Antwort, sei es schon richtig, dass die beiden Fächer Philosophie (die erste aller

Wissenschaften) und Physik (die Königin aller Wissenschaften) auf eine lange Periode gegenseitiger Beziehungen zurückblicken könnten, auch wenn es natürlich bei beiden Feldern Untergebiete gebe, die nichts mit dem anderen Feld zu tun hätten. Richtig sei auch, dass die Beziehung sehr fruchtbar gewesen sei, eine Ehe also, wie es Frau Doicescu in ihrem Aufsatz umschreibt, die „im Himmel geschlossen wurde". Allerdings, merkte sie weiter an, sei es in dieser Ehe wie in vielen anderen Ehen auch: Man gewöhne sich aneinander, die Flitterwochen und die Leidenschaft seien vorbei. Nicht, dass es nicht genug zu tun gäbe, aber die Luft sei etwas heraus aus dem Verhältnis, die Kooperation würde zur Routine und die allgemeinen Umstände (Budgets, Studienreformen, Drittmitteldruck etc.) würden bei der Wiederbelebung auch nicht helfen. Man könne sogar ein gewisses Auseinanderdriften beider Felder beobachten.

Diese letzte Anmerkung fand dann wieder unsere Aufmerksamkeit. Unser implizit unterstelltes Mentalmodell vom Entstehen von Disziplinen und interdisziplinärer Arbeit fußte stets auf der Beobachtung, dass einer von mehreren Mechanismen zur Entstehung neuer Fächer auf einer zunächst nur tentativen Kooperation von zwei oder mehr Mutterfächern beruht, aus der sich im Erfolgsfall und über die Zeit eigenständige Fachgebiete entwickeln, so wie etwa aus gemeinsamen Fragestellungen von Biologie und Chemie die Biochemie entstand. Ist einmal ein solches neues Fachgebiet aber geboren, so blieb es nach unserem bis dahin herrschenden Verständnis auch dabei. Die beiden Mutterfächer trennen sich nicht wieder. Hier jedoch wurde genau dies behauptet.

Der Gedanke hat uns derart angeregt, dass wir Frau Doicescu fragten, ob sie nicht bereit sei, hierzu ein Essay zu schreiben, das wir als eine Sondernummer der Briefe zur Interdisziplinarität veröffentlichen würden. Erfreulicherweise hat sie dem zugestimmt und das Ergebnis dürfen wir Ihnen nachfolgend zur Lektüre anbieten. Es ist in unseren Augen sehr gelungen. Neben einem geschichtlichen Überblick über die parallele Entwicklung beider Gebiete, die vom frühen Griechenland bis heute und darüber hinaus reicht, beleuchtet es auch die Vorfront der gegenwärtigen Forschung zu Kosmologie, Quantenphysik, Dunkler Materie und Stringtheorie. Frau Doicescu weist nach, dass es noch eine Vielzahl von Aufgaben gibt, deren sich Physiker und Philosophen gemeinsam annehmen können und vergisst dabei nicht, auf die vielen kleinen Schwierigkeiten, die im forscherischen und universitären Alltag herrschen, hinzuweisen. In der Wissenschaft „menschelt" es eben auch, sogar bei der Ehrwürdigen Ersten und der Königin der Wissenschaften. Auch wenn Sie nicht vom Fach sind, lesen Sie es. Es lohnt sich.

Dr. Christoph-Friedrich v. Braun, M.Sc.
Vorstand, Andrea von Braun Stiftung

München, im Juli 2017

In diesem Beitrag soll das aktuelle Verhältnis von Physik und Philosophie beleuchtet sowie dessen Entwicklungsmöglichkeiten anhand konkreter physikphilosophischer Problemstellungen nachvollzogen werden. Obwohl beide Disziplinen in der antiken Naturphilosophie wurzeln, entwickeln sie sich derzeit in Lehre und Forschung weitgehend unabhängig voneinander. Ein systematischer Dialog der zwei Communities wird von beiden Seiten zwar als wichtig erachtet und gegenwärtig vermehrt gefordert. Aufgrund der Informationsfülle und der hohen Spezialisierung jeweiliger Fachdebatten kann dieser praktisch aber nur punktuell stattfinden. Dadurch verlieren die einschlägigen Debatten an inhaltlicher Stringenz, da ein stetiger Austausch und der damit verbundene Input in beiden Richtungen und auf allen Ebenen fehlen. Eine echte Interdisziplinarität ist deshalb nicht mehr gegeben. In der Außenwahrnehmung erscheinen die zwei Gebiete weiterhin als zusammengehörig, doch in den Fachgemeinschaften selbst ist eine faktische Entfremdung spürbar. Dennoch verbleiben Physik und Philosophie innig verbunden, sowohl in ihrem gemeinsamen Anspruch, positives Wissen respektive Erkenntnis über die Welt zu generieren, als auch auf der Ebene konkreter Fragestellungen. Anhand mehrerer Beispiele soll der Wandel physikalischer Konzepte – welche stets einen naturphilosophischen Kern besitzen – illustriert werden. Dabei spielt die Rolle der Mathematik in der Naturerkenntnis eine tragende Rolle, weshalb man korrekterweise nicht nur Physik und Philosophie betrachten, sondern auch die Mathematik und deren Philosophie miteinbeziehen sollte. Die heutige Physik hat viele Facetten: Je nach Perspektive präsentiert sie sich als mathematisch extrem ausgefeiltes, schwer zugängliches Theoriengebäude, als paradigmatisches Beispiel einer empirischen Wissenschaft mit verblüffendem Anwendungserfolg oder eher als weltbildgebend und damit zumindest implizit normativ wirkend. Faktisch erlaubt erst das Ineinandergreifen von Theorie, Experiment und Interpretation ein tiefergehendes Verständnis und die damit verbundenen erfolgreichen Voraussagen. Spätestens an diesem Punkt offenbart sich die intrinsische Verbundenheit von Physik und Philosophie. In der philosophisch-historischen Perspektive wird gleichsam die zeitlich invariante Komponente der Physik – deren tragende Innenstruktur – sowohl für die Physiker selbst als auch für Fachfremde sichtbar, z.B. im beständigen Auftreten bestimmter begrifflicher Leitmotive und Erklärungsstrategien, wenn auch in abgewandelter Form. Als effektives und nachhaltiges Korrektiv des jetzigen – von beiden Seiten als unbefriedigend empfundenen – Zustandes wird die Aufnahme logisch-wissenschaftstheoretischer Grundlagen sowie physikphilosophischer Inhalte in die Physikerausbildung vorgeschlagen.

Gibt es interdisziplinäre Entfremdung? Das Beispiel von Physik und Philosophie

Autorin: *Dr. Irena Doicescu, Fachrichtung Physik, Technische Universität Dresden* /
Projekt: *Gibt es interdisziplinäre Entfremdung? Das Beispiel von Physik und Philosophie* / Art des Projektes: *Essay*

Für Uwe Scheffler

Physics and Philosophy today: The Strange Case of Interdisciplinary Estrangement

KEYWORDS

Physics and Philosophy, Interdisciplinarity, Philosophy of Physics, Mathematics

In this paper the current relationship between physics and its philosophy is examined as well as its possibilities of development. The study is largely based on case studies. Although both disciplines have joint roots in pre-christian philosophy, today their teachings and research occur independently from one another. Both communities consider their systematic dialogue as important for each side. Nevertheless, the huge amount of information and the high degree of specialization of these debates renders the mutual dialogue rare events. As a result, associated inputs are missing in both directions and at all levels and debates lose the content stringency required for a continuous exchange. True interdisciplinarity is therefore no longer given. In the external perception, the two territories appear to belong together, but within the professional communities factual alienation is quite noticeable. Nevertheless, physics and philosophy remain intimately connected, both in their common claim to generate positive knowledge of the world, and at the level of concrete questions. In this essay, the transformation of physical concepts - which always have a philosophical core – is illustrated on the basis of several case studies. Mathematics also plays a key role in the recognition of nature, and should be addressed as well in this context. Today's physics has many facets: Depending on the perspective, it appears as a mathematically extremely sophisticated theory-building exercise, or as THE paradigmatic example of an empirical science with an astounding history of application successes, or as a world science that is at least implicitly normative. In fact, the interaction between theory, experiment and interpretation allows for a deeper understanding and successful predictions. Latest at this point, the intrinsic connection between physics and philosophy is revealed. In the philosophical-historical perspective, the time-invariant component of physics or its supporting inner structure becomes visible: conceptual leitmotifs and explanatory strategies are preserved, although in a modified form. As an effective and sustainable corrective of the current state, which is perceived as unsatisfactory by both sides, I propose that logical and epistemological basic contents, as well as specific topics of the philosophy of physics becomes part of the curriculum of the physicist's education.

1. Motivation: warum brauchen Physik und Philosophie einander?

Das Verhältnis von Mensch und Welt lässt sich in zwei grundsätzlichen Geschichten erzählen: die eine vom Teil und dem Ganzen, der zufolge der Mensch echte Teilmenge eines Größeren ist, das sich einer ausschöpfenden Erkenntnis entzieht, und die andere von der Spiegelung zweier gleich mächtiger Erscheinungen ineinander – die Komplexität von Körper und Geist entspricht jener des uns Umgebenden. Beide Erzählungen legen nahe, dass eine jede *Beschreibung* der Welt einem begreiflichen und begrifflichen Unvermögen verhaftet bleiben muss, in anderen Worten: unvollständig ist.

Nun kann man fragen: Wenn unser Wissen grundsätzlich unvollständig ist, warum soll eine der Naturwissenschaften, eben die Physik, einen anderen Status einnehmen als eine jede andere detaillierte, sogar normativ ambitionierte Welterzählung, die ihren historischen Zweck erfüllt – wie zum Beispiel eines der religiösen Weltbilder? Die meisten würden diese Frage mit dem hohen Mathematisierungsgrad der Physik als Gütekriterium, sowie dem verblüffenden Anwendungserfolg physikalischer Theorien beantworten, sowohl im Mikroskopischen als auch auf kosmologischen Skalen. Doch warum ist die Mathematik grundsätzlich besser als beispielsweise Maschinensprachen oder die Fachsprachen der Einzelwissenschaften – jenseits des weiterhin nicht streng beweisbaren Diktums Galileo Galileis, dem zufolge das Buch der Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben sei? Auch der Anwendungserfolg ist kontextgebunden und stellt keine wirkliche Begründung dar. Es stellt sich heraus, dass erst eine fundierte philosophische Reflexion die besondere Rolle der Physik unter den Naturwissenschaften zu erklären vermag. Die logische und semantische Analyse physikalischer Theorien sowie deren Wandel im Laufe der Zeit – Gegenstand moderner Wissenschaftstheorie – offenbaren deren *universellen* und *fundamentalen* Charakter. Sie sind universell, weil sie die erklärungsmächtigsten sind, die wir haben, und weil alle Systeme und Erscheinungen im bekannten Universum ihrem Wesen nach physikalisch sind. Sie sind fundamental, weil sie ihrerseits von keinen anderen Theorien mehr abhängen. Um die untersuchten Phänomene zu erklären, ist es nicht notwendig, den Boden der Physik zu verlassen – im Gegensatz zur Chemie oder Biologie, die sich auf die Physik reduzieren lassen. Obwohl relativ junge Gebiete wie die Lebens- und die Informationswissenschaften inzwischen im Fokus öffentlicher Aufmerksamkeit stehen, während die ohnehin schwer zugängliche Physik derzeit mit Grundlagenproblemen zu kämpfen hat, verbleibt sie doch, philosophisch gesehen, die Leitwissenschaft. Wenn wir vom

Universum sprechen, meinen wir faktisch *das physikalische Universum*, in dem alle Phänomene physikalischen Gesetzmäßigkeiten gehorchen (siehe Erläuterungen im Anhang[I]). Die philosophische Reflexion der Physik lässt sogar eine – mit der nötigen Vorsicht zu betrachtende – Extrapolation zu: selbst für Bereiche, die gegenwärtig der experimentellen Überprüfung nicht zugänglich sind, gilt nach heutigem Ermessen die physikalische Vermutung: Eines Tages wird man im Rahmen der Physik auch diese erklären und vermessen können.

Aus Gründen wie diesen scheint die Physik die *beste* der weltbildgebenden Wissenschaften zu sein. Doch es gibt Grenzen: eine etwas beklommene Stille stellt sich z.B. stets ein, wenn bei einem popularisierenden Übersichtsvortrag eine der inzwischen berühmten Tortengrafiken zum aktuellen physikalischen Weltbild gezeigt wird (Abb.1)[2]: Auch wenn die darin angegebenen Zahlenwerte sich – je nach Kalkulation – geringfügig unterscheiden mögen, so verbleibt die Botschaft beunruhigend: der sichtbaren Materie wird darin eine schmale 5%-Scheibe zugeordnet, während mysteriös angehauchte Konzepte wie Dunkle Materie bzw. Dunkle Energie den Löwenanteil unseres Universums zu beanspruchen scheinen. Mit anderen Worten: Das Wenige, was man weiß, hängt vom dem Vielen ab, was unbekannt ist.

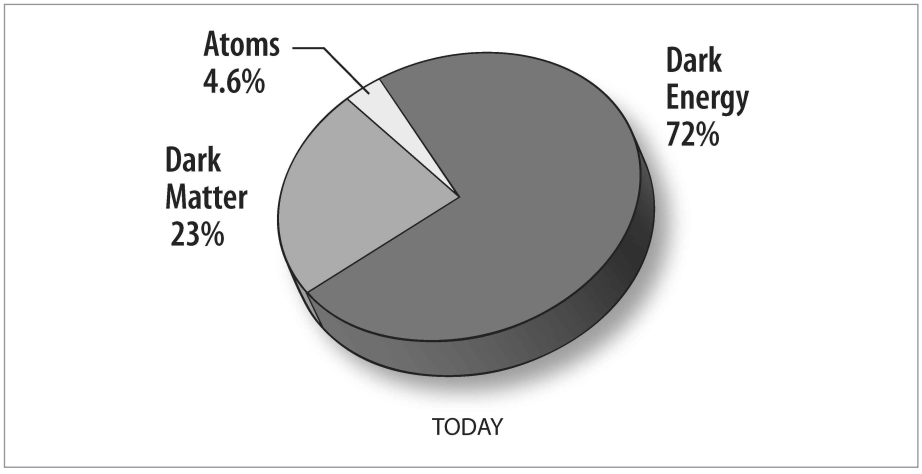


Abb.1 Die aktuell geltende Zusammensetzung des Physikalischen Universums. Darin werden lediglich ca. 5% der wahrnehmbaren bzw. sichtbaren Materie zugerechnet (Atoms), während die sog. Dunkle Materie (Dark Matter) 24% repräsentiert und die Dunkle Energie ganze 71.4%.
Quelle: https://map.gsfc.nasa.gov/universe/uni_matter.html

Bei allem Zauber, der von ihr als Leitwissenschaft ausgeht, und bei aller Erklärungskraft, die sie entfaltet, stellt sich die inhärente Frage: Ist das alles, was die heutige Physik schafft? Warum geht es nicht besser und vor allem: Was haben diese recht abstrakten Vorstellungen mit uns als erkennendem Subjekt zu tun? Kurzum, es stellen sich angesichts der Physik Fragen philosophischer Art, welche sich nur aus einer reflexiven Perspektive beantworten lassen. Die Philosophie braucht ihrerseits die Physik als paradigmatische Wissenschaft mit gut dokumentierter Entwicklungsgeschichte, gleichsam als empirische Basis ihrer Analysen.

In welchem Verhältnis stand und steht die Physik zu „ihrer" Philosophie, vor allem aber: Welche Zukunft erwartet diese einst taufrisch, inzwischen etwas angejahrt erscheinende „Ehe", von der man lange angenommen hat, sie sei im Himmel geschlossen? Um im Bild zu bleiben: Die unbeschwerte Anfangszeit scheint vorüber zu sein; eine Phase harter, möglicherweise aber lohnender Arbeit an der Beziehung steht bevor. Davon handelt dieser Aufsatz.

2. Ein Buch der Wandlungen: das Verhältnis von Physik und Philosophie im Laufe der Zeit

2.1. Vergangenheit: Vielfalt in der Einheit

An der gemeinsamen Wurzel von Physik und Philosophie in der antiken Naturphilosophie besteht kaum Zweifel. Auch wenn das neuzeitliche Denken die Gewichtung mancher Leitmotive und deren Behandlung verschoben hat, so ziehen sich die philosophischen Diskussionen, welche grundlegende physikalische Theorien anregen beziehungsweise sich aus diesen ergeben, über Jahrtausende hin: Vorstellungen zu Raum und Zeit, Teilchen- und Wechselwirkungskonzepte, die logische Struktur und die Leistungsfähigkeit wissenschaftlicher Beschreibungen sowie das Reflektieren deren Grenzen. Mag die antike Rechenkunst sich neben der modernen Mathematik noch so bescheiden ausnehmen: Der Anbeginn aller Wissenschaft ist das *Staunen* über und die *Frage an die* Welt: Er ist philosophisch[3]. Die Anfänge der Physik verlieren sich im Nebel der Geschichte; meist wird jedoch Aristoteles[4] *Physica* als erste ausgearbeitete Naturphilosophie betrachtet. Aus dem Begriff *phyein* (hervorgebracht werden, wachsen) leitet sich der Name Physis (Natur) ab. Den Schriften oder Dingen jenseits der Physik, *ta meta ta physika*[5], waren hingegen eigene Bücher gewidmet. Nach Aristotelischer Auffassung ist die Physis der Bereich dessen, was von selbst ist, indem es in sich selbst den Anfang von

Veränderung und Bestand hat. Im Gegensatz zu heute wurde dem Bereich der Natur, zu dem auch der Geist gehörte, der Bereich der Technik bzw. Kunst gegenübergestellt: *techné* steht für Dinge, die nicht von sich aus sind, sondern von uns hervorgebracht werden. Auch befasste sich Aristoteles mit der Erforschung von Ursachen und dem Unterschied zwischen eidos (Form), hylé (Materie), dem Ursprung einer Veränderung, insbesondere einer Bewegung und dem télos, als Zweck oder Ziel einer Veränderung. Die Problemstellungen und Erklärungsstrategien der Naturphilosophie blieben lange unverändert: Demokrit, Leukipp, Aristoteles, Platon und viele andere suchten nach dem Unveränderlichen, das den beobachtbaren Veränderungen zugrunde lag, zum Beispiel Atome.

In einer systematischen Untersuchung – welche an dieser Stelle nicht vorgenommen werden kann – darf Platons[6] Werk nicht fehlen. Dieses übte einen enormen Einfluss auf die führenden Physiker bis in die jüngste Vergangenheit aus[7]. Sie kannten Platons Dialoge und fanden darin reichhaltige Inspiration für ihre Arbeit, sowohl in konzeptueller als auch in methodischer Hinsicht. Vereinfacht ausgedrückt: Mit Platon betritt die schon vorher, u.a. durch die Pythagoreer eingeführte mathematische Methode die große Bühne als *lingua franca* moderner Wissenschaft. Das Zusammentragen von Indizien für die zentrale Rolle der Mathematik als universelle Erkenntnissprache und Erklärungsstrategie zieht sich wie ein roter Faden durch die Dialoge. Eine Lösung des Erkenntnisproblems anstrebend und von den klassischen philosophischen Fragen nach der Natur des Menschen und der Welt ausgehend gelangt Platon zur Behandlung praktischer mathematischer Probleme, wie zur Logik von Aussagen, zur Natur von Zahlen und Mengen, zur Geometrie der Zahlen und zum Atomismus in der Geometrie als Teil-Ganzes-Erklärungsmuster auf der symbolischen Darstellungsebene[8]. Die vorherige, empirisch begründete und rezeptartige Mathematik wird in jener Zeit zu einer systematischen, logisch-deduktiven Wissenschaft mit spezifischen Zielsetzungen und Methoden: die Geometrie.

Von einer Evolution der Ideen im philosophisch-mathematisch-physikalischen Raum zu sprechen, im Zuge derer die drei Komponenten variierende Gewichtungen annehmen, ist an dieser Stelle naheliegend: Mitunter sehr alte philosophische Ideen verschwinden nicht wirklich, sondern durchlaufen verschiedene Entwicklungsstadien oder können lange Zeit ruhen, um ‚wiederentdeckt' zu werden. Im günstigsten Fall erlangen sie eine größere physikalische Erklärungskraft, vornehmlich durch zunehmende Mathematisierung. Diese mathematische Reifung geht in aller Regel mit einem Verlust der Anschaulichkeit einher, was wiederum eine philo-

sophische Explikation notwendig macht. Der ursprünglichen Basis *Philosophie-Empirie* wurde somit eine weitere Dimension hinzugefügt: Die *mathematische Komponente* vervollständigt die grundlegende Erklärungstextur der Physik. Auf einer allgemein-deskriptiven Ebene kann die Physik als eine dreistellige Relation (Theorie, Experiment, Interpretation) definiert werden.

Die antiken Ideen hatten lange Bestand, wobei sie lange Zeit im arabischen Raum überlebten und weiterentwickelt wurden. In Europa wurden sie erst mit dem Zerfall des arabischen Reiches bekannt[9]. Selbst dann war der Fortschritt langsam; man stand unter der ideologischen Glasglocke der Scholastik und hatte mit der Last prekärer gesellschaftspolitischer Rahmenbedingungen zu kämpfen; zudem mangelte es an ausgereiften experimentellen und mathematischen Techniken. Eine tiefe Zäsur erfolgte im 17. Jhd.[10] durch René Descartes[11], den man heute als Philosoph, Mathematiker, Physiker, Theologen und Biologen in Personalunion bezeichnen müsste – eine in Zeiten divergierender Informationsmengen und, je nach Lesart, damit verbundener oder erzwungener Hochspezialisierung geradezu beunruhigende Vorstellung.

Das berühmteste Werk aus seiner Feder, die 1637 anonym in Leiden erschienene „Abhandlung über die Methode, seine Vernunft gut zu gebrauchen und die Wahrheit in den Wissenschaften zu suchen“[12], trägt das ambitionierte philosophische Forschungsprogramm schon im Titel. Descartes fügte sich in eine reiche geistesgeschichtliche Tradition. Weil die damals verfügbare Wissensmenge jedoch noch überschaubar war, konnte ein Einzelner an den großen Fragen arbeiten und Ansätze generieren, die in mehreren Gebieten Anwendung fanden – was wiederum fast wie von selbst zu einer gewissen intrinsischen Einheitlichkeit des Weltbildes führte. Folgerichtig übte sein vielschichtiges Werk einen enormen Einfluss auf die denkende und forschende Nachwelt aus: Mit Descartes beginnt die neuzeitliche Naturphilosophie. Seiner analytischen Auffassung zufolge ist die Natur der Bereich des räumlich und zeitlich Ausgedehnten. Als Ursache dient nur der Ursprung der Bewegung. Jede Bewegung wird durch andere Bewegungen nach Gesetzen determiniert, welche in der Sprache der Mathematik formuliert werden können. Im Unterschied zur antiken Auffassung ist der Natur keinerlei Ziel oder Zweck immanent. Zugleich betritt die Trennung von Natur (rex extensa) und Geist (rex cogitans) die Bühne der Philosophie[13]. Vor allem aber hat die von Descartes gegründete analytische Geometrie die Mathematisierung vorangetrieben: Ein System von Scharparallelen erlaubt es, die Gleichung einer Kurve aufzustellen, zudem ist die

Multiplikation von Strecken möglich, da geometrische Konstruktion und Zahlenoperationen gleichwertig sind.

Dieser Apparat stellte sich als unumgängliches Zwischenstadium in der Entwicklung der Differential- und Infinitesimalrechnung heraus, welche von zwei weiteren philosophierenden mathematischen Physikern mit starkem theologischen Einschlag[14] zur Anwendungsreife gebracht wurden: Gottfried Wilhelm Leibniz[15] und Isaac Newton[16]. Leider können an dieser Stelle nur die wichtigsten, zur Illustrierung des Verhältnisses von Physik und Philosophie tragenden Ideenlinien erwähnt werden. Die Untersuchungen zum Werk dieser Universalgelehrten füllen inzwischen ganze Bibliotheken. Zu Leibniz, dessen Tod sich 2016 zum 300. Mal jährte, sei auf die hervorragende Sammlung unter dem Link http://leibniz-2016.de/ verwiesen.

Wichtigster Beitrag Leibnizens für die Physik dürfte die Mitentwicklung des Calculus sein, der modernen Differential- und Integralrechnung. Die Idee einer allgemeinen Begriffsschrift, der *characteristica universalis*, die ihm bereits in der Studienzeit kam, ist zwar wesentlich älter. Sie taucht schon beim mittelalterlichen spanischen Gelehrten Raimund Lullus[17] auf. Doch dieser erhabene Gedanke wäre wohl rein philosophisch geblieben, wenn inzwischen nicht genügend Vorarbeit geleistet geworden wäre: Moderne Untersuchungen zeigen, dass die Reifung der Idee zur physikalisch anwendbaren Symbolik faktisch erst im 18. Jhd. möglich war[18]. Zunächst mussten die geometrischen Ansätze von Kepler und Cavalieri, des Weiteren die algebraischen Kalküle von Vieta, Descartes und Fermat, die Exhaustionsrechnung, die Theorie der Indivisiblen und deren Arithmetisierung, die Behandlung der Tangenten, die Quadratur der allgemeinen Parabeln entwickelt sowie die Untersuchung von Extremwertaufgaben vollzogen werden. Diese logisch-historischen Voraussetzungen machten erst nach 1660 die Ausbildung kalkülartig beherrschbarer infinitesimaler Methoden möglich. Leibnizens Idee stand in der Tradition der philosophischen Suche nach der Wahrheit, welche bei ihm sowohl als empirische, als auch als Vernunftwahrheit verstanden wird. Letztere wird, vielleicht stärker denn je, einer mathematischen Wahrheit gleichgesetzt: Mit der angestrebten Schrift sollte es möglich sein, aus allen denkmöglichen Aussagen die *richtigen* herauszufiltern, und zwar durch eine Art Variationsrechnung – eine Utopie, welche stark auf die moderne mathematische Logik hindeutet.

Wichtig an dieser Stelle ist Leibnizens Hervorhebung zweckmäßiger *Bezeichnungen*. Er schrieb:

> „Bei den Bezeichnungen ist darauf zu achten, dass sie für das Erfinden bequem sind. Dies ist am meisten der Fall, so oft sie die innerste Natur der Sache mit Wenigem ausdrucken und gleichsam abbilden. So wird nämlich auf wunderbare Weise die Denkarbeit vermindert."

In der Tat hat sich seine mathematischen Symbolik als die anwendungsfreundlichste erwiesen: Das heute in Form und Bedeutung unverändert verwendete Integralzeichen ist aus dem großen S von *Summatio* hervorgegangen und wurde 1686 zum ersten Mal gedruckt. Abb. 2. zeigt eine Reproduktion des Manuskripts von 29. Oktober 1675 mit der Einführung des Integral- und Differentialzeichens.

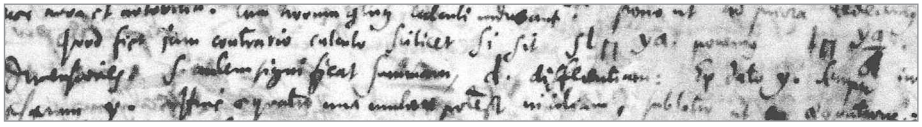


Abb.2. Schrift von Leibniz: „∫.autem significat summarum, d. differentiam" Ausschnitt des Manuskripts LH XXXV, 18, Bl. 2v mit der Einführung der Symbole für die Differential- und Integralrechnung, Niedersächsische Landesbibliothek Hannover.

Aus heutiger Sicht haben sowohl Isaac Newton als auch Gottfried Wilhelm Leibniz zur infinitesimalen Methode Entscheidendes beigetragen. Doch im Unterschied zu Leibniz ging Newton bei seinen Überlegungen von mechanisch-physikalischen Prinzipien aus, welche in den *Principia*[19] ausführlich dargelegt sind. Newtons Zugang war in höchstem Maße dem Experiment verpflichtet, eher *physikalischer* als Leibnizens primär philosophische Motivation[20]: Die veränderlichen Größen besitzen eine physikalische Entsprechung und hängen von der objektiv verlaufenden Zeit ab. Diese Variablen nennt Newton *Fluenten*. Deren Geschwindigkeiten, also Ableitungen nach der Zeit, heißen bei ihm *Fluxionen*. Die heute in der Physik verwendeten *Fluxionspunkte* treten frühestens 1693 auf. Newtons *The Method of Fluxions and Infinite Series* erschien 1736 in London, erst 9 Jahre nach seinem Tod. Dennoch entwickelte auch Leibniz eine eigene Physik[21] in Form einer Synthese der Lehre von den einfachen Substanzen und von den lebendigen Kräften. Darin werden die Begriffe *vis mortua* und *vis viva* eingeführt, in etwa den heutigen Begriffen für die potenzielle respektive kinetische Energie entsprechend. Zusammenfassend lässt sich anführen, dass die leichtere Handhabbarkeit der Leibnizschen Symbolik letztlich zum ‚Anwendungssieg' über die von Newton entwickelte Fluxionsrech-

nung führte. Für die heutige Physik war selbstredend der Beitrag beider Universalgelehrten von eminenter Bedeutung.

Die zunehmende Mathematisierung in der Frühen Neuzeit wird von der Weiterentwicklung des Experiments begleitet. Das evidenzbasierte Denken wird als ein mächtigeres Instrument zur Untersuchung der Natur als das bloße Nachdenken erkannt. Zu den europäischen Wegbereitern moderner Naturwissenschaft zählen Empiristen wie Duns Scotus, Wilhelm von Ockham, Roger Bacon und natürlich Galileo Galilei, Johannes Kepler und Nikolaus Copernicus. Nachdem im vorangegangen Abschnitt die Entwicklung der mathematischen Symbolik im Vordergrund stand, soll nun auf das ebenfalls beachtliche Alter und die ungebrochene Kontinuität der *experimentellen Methode* verwiesen werden: Diese kommt in den antiken Vorstellungen über die Zusammensetzung und Wirkung der Elemente zur Geltung, doch ihre Anfänge lassen sich viel früher verorten, etwa in den metallurgischen Mythen der Eisenzeit, in denen der direkte Kontakt mit der Materie und deren Umwandlung unter der *wissenden* Aufsicht des Schmiedes eine zentrale Rolle spielt[22]. Die Aufgaben des Schmiedes als Magier und Geburtshelfer der Legierung haben einen deutlich sakralen Charakter und spiegeln sich in seiner gesellschaftlichen Funktion als Heiler und Priester. Darin ist er, als *Meister der Feuers*, ein Vorläufer des Alchemisten[23], welcher wiederum dem modernen Chemiker oder der Physikerin vorangeht. Die mineralogischen Spekulationen westlicher Autoren wie Gerolamo Cardano[24], welcher Welt, Himmel und Erde, Natur und Gedankenwelt als ein einheitliches Ganzes auffasst, basieren auf der *beseelten Urmaterie* als grundlegendes Prinzip und lesen sich beispielsweise wie folgt:

> „Die metallischen Stoffe befinden sich in den Bergen und haben, genau wie die Bäume, Wurzeln, einen Stamm, Zweige und mehrere Blätter. [...] Was ist ein Bergwerk anders als eine mit Erde bedeckte Pflanze?“

In seiner Monadologie wird Leibniz sich explizit auf Cardanos Arbeiten beziehen. Der hauptsächlich als Empirist bekannte Francis Bacon[25] schreibt wiederum in seinem *Sylva Sylvarum, or a natural history in ten centuries*:

> „Einige der Alten berichten, dass man auf der Insel Zypern eine Art Eisen findet, welches, nachdem es in kleine Stücke geschnitten und in eben begossener Erde vergraben wurde, darin irgendwie vegetiert, so dass alle diese Stücke viel größer warden.”

Schließlich hat sich Isaac Newton fast sein ganzes Leben lang mit Alchemie beschäftigt, und durch sein umfassendes Werk eindrucksvoll bewiesen, dass Symbolik, Bild und Ritus oder – modern ausgedruckt: die Methode – der praktischen Verwendung einer Entdeckung weit voraus gehen können. Die amerikanische Wissenschaftlerin Betty Jo Teeter Dobbs hält in ihrem Buch *The Janus faces of genius – The role of Alchemy in Newton's thought*, Cambridge University Press 1991, fest: „Isaac Newton studied alchemy from about 1668 until the second or third decade of the eighteenth century."

Aus heutiger Sicht könnte man leicht dazu neigen, die Alchemie und deren Vorläufer als esoterisch angehauchte Irrwege anzusehen, im besten Falle als Protowissenschaften mit vernachlässigbarer Erklärungsleistung. Im Kern ist jedoch auch hier eine Kontinuität der Ideen festzustellen, wobei die Bezeichnung sich als entscheidend herausstellt. Sobald man erkennen konnte, dass eine bestimmte Substanz im chemischen Sinne elementar ist, wurde der Übergang von einem zunächst abstrakt vorliegenden *Prinzip*, wie zum Beispiel Mars, zum konkret nutzbaren Element *ferrum* (Eisen) vollzogen. Dem großen Experimentator Newton ging es kaum um die Erhaltung mystischer Komponenten, die als Platzhalter dienten, sondern vielmehr darum, das bereits vorliegende alchemistische Narrativ über die konstituierenden Substanzen der Welt auf eine solide experimentelle Basis zu stellen, die sich idealerweise auch noch mathematisieren ließ und dadurch eine konsistente physikalische Form annahm.

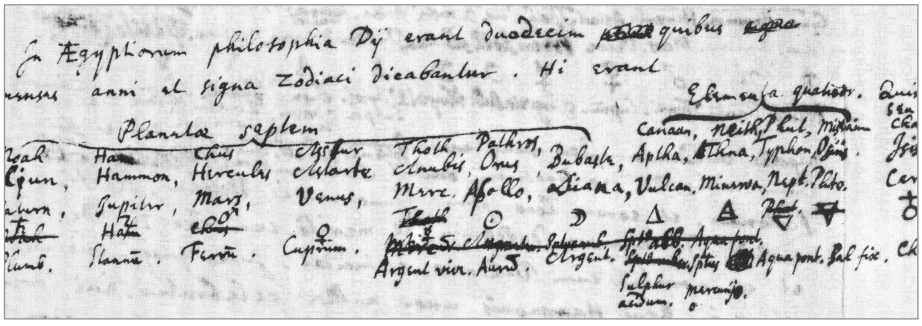


Abb. 3 Schrift und Symbolik von Isaac Newton
Oben ein Auszug des Manuskripts Babson 420 (The Sir Isaac Newton Collection, Babson College Archives), abgebildet in: Betty Jo Teeter Dobbs, The Janus faces of genius – The role of Alchemy in Newton's thought, Cambridge Univ. Press 1991, S. 163. In Table E-1. die von den antiken Planeten- und Götternamen abgeleiteten Symbole in leichter lesbarer Form: Symbols used by Newton, S. 296.

Table E-1. *Symbols used by Newton*

Symbol	Meaning
☿	quicksilver (argentum vivum), mercury (mercurius), Mercury
♃	sulfur
☽	silver (argentum) or moon (luna), Diana
☉	gold (aurum) or sun (sol), Apollo
♂	iron (ferrum), Mars
♄	lead (plumbum), Saturn
♁	antimony: either the ore, which was probably stibnite (antimony trisulfide), or the metal
♀	copper (cuprum), Venus
☋	niter, probably potassium nitrate
✳	(usually) sal ammoniac, ammonium chloride, or (sometimes) star regulus
♃	tin (stannum), Jupiter, Jove
♈	bismuth
Æ	aqua fortis, nitric acid
⊕	vitriol, a sulfate, usually that of iron or copper

Die modernen Bezeichnungen der chemischen Elemente lassen sich auf die antike Terminologie zurückführen.

Zusammenfassend lässt sich auch in Falle des Experiments eine ideengeschichtliche Entwicklung erkennen, wie oben beim mathematischen Formalismus: Nach und nach verlieren die Begriffe und Verfahren ihre ursprüngliche sakrale Komponente; es erfolgt der Übergang zur modernen experimentellen Wissenschaft.

Allmählich verschiebt sich der Fokus der hier nacherzählten Entwicklungsgeschichte von den qualitativ-philosophischen zu den quantitativ-experimentellen Aspekten der Physik, wodurch sie allmählich eigenständiger wird und die Form einer mathematisierten und empirischen Wissenschaft gewinnt. Im 19. und 20. Jhd. rückt die philosophische Komponente etwas in den Hintergrund; der Fokus liegt auf der Qualität der Beschreibung. Der Anspruch, ein vollständiges Weltbild zu erzeugen, wird zwar nicht explizit aufgegeben, doch das neue Desiderat detaillierter quantitativer Erklärungen für Phänomene ist als Entwicklungsmotor klar erkennbar. Neben der experimentellen Verfeinerung ist ein Bedeutungszuwachs der mathematischen Symbolik erkennbar, welche ab einem bestimmten Reifegrad eine eigene Dynamik entfaltet und zu einer Wesensveränderung des Experiments führt. Anders ausgedrückt: Man fängt an, nach Dingen zu suchen, respektive Erscheinungen nachzustellen, die man ohne Mathematik nicht vermutet hätte – die unmittelbar daraus resultierende philosophische Notwendigkeit, zwischen epistemischer und ontologischer Erkenntnis zu unterscheiden, liegt auf der Hand.

Auch geht die Zeit der Universalgelehrten zu Ende; man vernetzt und tauscht sich nicht länger nur privat aus, sondern auch in Akademien und Fachjournalen. Die strategische Bedeutung des Wissens wurde zwar schon vorher erkannt, was sich in der Gründung von Klosterschulen und Universitäten zeigte. Nun kann dieses jedoch auf effektive und systematische Weise weitergegeben und vermehrt werden. Die technischen Anwendungen machen es nutzbar für die Gesellschaft, weshalb die Wissenschaft an sich an Bedeutung gewinnt. Allmählich entsteht eine wissenschaftliche Gemeinschaft, die sich rasch diversifiziert, so dass man spätestens zur Mitte des 19. Jhd. bereits von den Nuclei moderner Disziplinen wie Physik, Chemie und Biologie sprechen darf. Pointiert formuliert: Die Physik wird wichtiger als die Physiker, die sie betreiben.

Rückblickend erscheint die Arbeit am Gebäude der Physik als ein komplexes Unternehmen, in dem der Zufall oft eine Rolle spielt. Die gegenseitig befruchtende Zusammenarbeit mit der Mathematik bleibt aber essentiell und somit auch die anfallenden philosophischen Fragestellungen, allen voran jene nach dem Verhältnis von Natur und Geist. Oft genug führen physikalische Ansätze zur Entstehung neuer Gebiete der Reinen Mathematik; umgekehrt finden rein mathematische Erscheinungen – manchmal wesentlich später – eine physikalische Anwendung. Ein faszinierendes Beispiel dafür bietet die Entwicklung der Gruppentheorie: Den Grundgedanken hatte der französische Mathematiker Evariste Galois[26]. Sein Ansatz besagt, dass man Einsicht in die Struktur der Lösungen einer jeden algebraischen Gleichung gewinnen kann, wenn man ihr eine eindeutig bestimmte Permutationsgruppe zuordnet. An dieser Gruppe kann man, um es mit dem Leipziger Mathematikhistoriker Hans Wußing zu sagen, gleichsam wie in einem Spiegel die Haupteigenschaften der Gleichung *ablesen*, insbesondere jene zur Lösbarkeit in Radikalen. Galois neuer Gedanke löste ein jahrhundertealtes Problem, freilich – wie Wußing anmerkt, „mit Methoden und Überlegungen die der Mehrzahl der damaligen Mathematiker unerwartet, ja geradezu fremdartig vorkommen mussten." Seine tentativ eingeführten, lückenhaften und nicht streng bewiesenen Konzepte wurden nach und nach durch Kollegen vollendet und gehören heute zum mathematischen Grundbestand[27]. Doch das mathematische Teilgebiet der Algebra *gehört* gewissermaßen auch zur Physik, denn es stellte sich heraus, dass die in der Physik wesentlichen Symmetrietransformationen Gruppen bilden. Eine der bekanntesten mathematisch-physikalischen Querverbindungen wurde von Emmy Noether hergestellt, die sich mit dem nach ihr benannten Theorem ein Denkmal setzte. Unter dem damals enorm starken Eindruck der Einstein'schen Relativitätstheorie und auf

Arbeiten von Felix Klein und David Hilbert aufbauend, gelang es ihr, die für die heutige Physik fundamentale Einsicht zu beweisen, dass jede Symmetrie in Differentialinvarianten einem physikalischen Erhaltungssatz äquivalent ist!

Wie wichtig Konzepte für die Entwicklung einer Wissenschaft sind bzw. wie mächtig sie werden können, wenn sie gleichsam im Begriffsraum zu gravitieren anfangen und ihn dadurch verändern, bekräftigte auch der große deutsche Gelehrte Otto Neugebauer in seinen 1934 erschienenen *Vorlesungen über die Geschichte der Antiken Mathematischen Wissenschaften*:

> „Wie für die Entwicklung der modernen Algebra, so ist auch für die babylonische algebraische Mathematik die Existenz einer geeigneten Bezeichnungsweise entscheidend, da sich ja immer wieder bestätigt, dass die Kräfte einer Symbolik immer sehr viel weiter reichen, als es ursprünglich beabsichtigt war."

Das Weiterspinnen antiker oder aus heutiger Warte als rein philosophisch geltender Ideenlinien – soweit diese bekannt sind – lässt sich auch im Werk anderer Gelehrten verfolgen: Der Mathematiker, Logiker und Philosoph Bertrand Russel führte seine Arbeiten zum Zahlenbegriff auf Platon zurück. Ebenso verhielt sich Werner Heisenberg mit seiner Idee einer einheitlichen Feldtheorie. Im Rahmen der Stringtheorie[28], von welcher noch die Rede sein wird, wurde für das Szenario einer Universalgenese eine Idee der stoischen Philosophie wieder aufgegriffen. Im maßgeblichen Aufsatz von 2001 "The Ekpyrotic Universe: Colliding Branes and the Origin of the Hot Big Bang" halten die Autoren um Paul J. Steinhardt fest:

> "We refer to our proposal as the 'ekpyrotic universe', a term drawn from the Stoic model of cosmic evolution in which the universe is consumed by fire at regular intervals and reconstituted out of this fire, a conflagration called ekpyrosis. Here, the universe as we know it is made (and, perhaps, has been remade) through a conflagration ignited by collisions between branes along a hidden fifth dimension".

2.2. Gegenwart: Vielfalt ohne Einheit

> „Ihre Trennung (der Wissenschaften, Anm. d. A.) nach verschiedenen Fächern ist ja nicht in der Natur der Sache begründet, sondern entspringt nur der Begrenztheit des menschlichen Fassungsvermögens, welches zwangsläufig zu einer Arbeitsteilung führt."[29] Max Planck

Die angeführten Beispiele zeigen zum einen, dass die Grenzen zwischen den Wissensgebieten in Wirklichkeit nicht so scharfgezogen sind, wie die heutige akademische Ausdifferenzierung es suggeriert und mitunter sogar verlangt, und zum anderen, dass Kenntnisse der philosophisch-historischen Grundlagen für das Verständnis der inneren Mechanismen einer Wissenschaft unumgänglich sind. Die Physik ist jedenfalls weit mehr als ihr schriftlicher Output; wie alle Wissenschaften wird auch sie von Menschen gemacht. Daher reicht das Studium der Bücher, Publikationen und Briefe nicht aus, um sie zu verstehen. Es bedarf auch einer unmittelbar empirischen Perspektive. Ideenströme müssen ungehindert zwischen den Wissensgebieten fließen, ohne von formalen Fachgrenzen oder *Groupthink* daran gehindert zu werden. Deshalb wird die Interdisziplinarität in unserer Zeit zunehmend als strategisches Ziel anerkannt, um begriffliche und methodische Freiräume dort zu eröffnen, wo man mit nur einer *Sprache* offensichtlich nicht vorankommt. Dieser Übergang ist mühsam und von Unwägbarkeiten geprägt; er kann kaum im Vorfeld quantitativ eingeschätzt werden. Dennoch erscheint er notwendig: Auf einer übergeordneten Ebene relativieren sich oft zäh verteidigte Grenzen und beginnen zu verschwimmen, so wie eine zerklüftete Landschaft aus einer gewissen Höhe glatt erscheint[30]. Der Perspektivenwechsel lohnt sich: Von außen betrachtet offenbart die heutige Physik globale Qualitäten, welche in den detailgeprägten Inneneinsichten ihrer *unfertigen* Subdisziplinen verborgen bleiben. Dieser Skalen- bzw. Darstellungswechsel bedeutet nichts anderes als eine philosophische Reflexion der Physik, und es spricht vieles dafür, dass er mit geringem Informationsverlust möglich ist.

Doch warum findet diese Reflexion nicht automatisch statt, wenn sich Physik und Philosophie so nahe stehen? Weshalb ist der Austausch so schwierig geworden? Hier haben wir es gewissermaßen mit einem historischen Abbildungsfehler zu tun: Im Lichte der letzten paar Jahrhunderte hat man sich daran gewöhnt, Physik und Philosophie als zueinander gehörig zu betrachten. Doch der Jetzt-Zustand ist anders, vor allem weil sich die akademische Welt in den letzten 50 Jahren gravierend verändert hat. Möglicherweise stellen wir uns das Verhältnis von Physik und Philosophie zu einfach vor: Physiker wie Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr und Werner Heisenberg haben es doch auch geschafft, die interpretationsbehafteten Aspekte ihrer Arbeit in einen korrekten philosophischen Kontext zu setzen und zu diskutieren – warum sollte dies nicht weiterhin möglich sein? Dennoch: Die Zeiten erfolgreich philosophierender Physiker scheinen erst einmal vorbei zu sein, auch wenn der philosophische Impetus auf der persönlichen Ebene eine wichtige Rolle

spielt. Tatsächlich war der 2008 verstorbene Carl-Friedrich von Weizsäcker der bisher letzte auch als Philosoph ernst genommene Physiker, obgleich sein System von philosophischer Seite als eher unzureichend erachtet wird.

Als akademische Disziplinen haben sich Physik und Philosophie zweifelsohne voneinander entfernt. Mancherorts ist in der persönlichen Begegnung sogar eine Art grundsätzliche Vorsicht spürbar, mit der man sich gegenseitig beäugt. Angesichts der hohen Professionalisierung beider Fächer ist das kaum überraschend. Bei aller glorreichen Vergangenheit gilt: Eine Schnittmenge muss inzwischen begründet werden. Welche hinreichend interessante Fragen stellt die Physik an die Philosophie? Und umgekehrt: Weshalb ist die Philosophie der Physik nützlich? Dieses gleichsam *utilitaristische*, demnach zumindest auf lokale Art *teleologische* Denken gehört zum Zeitgeist. Ungeachtet seiner unbestritten guten Auswirkungen, zu denen u.a. die Quantifizierung und Präzisierung vorher recht schwammig formulierter Konzepte zählt, führt dies doch auch zum Entstehen begrifflicher und methodischer Königreiche und zu zahlreichen Deutungsdomänen, die entschlossen verteidigt werden.

Heutzutage treffen Physik und Philosophie faktisch zu selten aufeinander, um sich nahe zu stehen, und wenn doch, dann im kleinen Kreis hochspezialisierter Meetings und in wenigen gemeinsamen Publikationsprojekten, welche das breite Publikum kaum erreichen und deshalb auch keine prägende Wirkung entfalten. Die Kriterien echter Interdisziplinarität werden nicht erfüllt. Die Interdisziplinaritätsforschung nennt hierzu als wesentliches Kriterium einen über Fachgrenzen hinweg stattfindenden *Verständigungsprozess*. Für die untersuchten Problemstellungen müssen demnach sowohl eine gemeinsame Sprache, als auch Leitlinien zur Bewertung wissenschaftlicher Leistung (Assessment) gefunden werden. Je nach Quelle werden mehrere Prinzipien fächerübergreifender Arbeit formuliert: ursprüngliche Gleichstellung und spätere Transzendierung der Disziplinen, Identifikation des Forschungsgegenstandes, Minimalität beim Wissenstransfer, Synergie und Integration. Eine interdisziplinäre Sprache soll dahingehend einheitlich sein, dass erzielte Resultate in den einzelnen Disziplinen vergleichbar und nutzbar sind. Zudem sollen die Inhalte in alltäglicher Sprache kommunizierbar sein – wie in diesem Aufsatz zu lesen, ist dieses Kriterium in der heutigen Physik nicht immer erfüllt. Die Notwendigkeit allgemein verständlicher Interpretationen physikalischer Theorien spricht für eine Revitalisierung des Verhältnisses mit der Philosophie.

Aus diesen Gründen ist nach meiner Überzeugung die Rede von der Entfremdung beider Fächer angebracht. Hierfür gibt es vier Ursachen, welche teilweise bereits in den vorangehenden Abschnitten anklangen:
– Erstens ist ein paradigmatisch einigender Einfluss einzelner Persönlichkeiten in der physikalischen Gemeinschaft nicht mehr in dem Maße gegeben, wie es noch bis Mitte des 20. Jhd. möglich war.
– Zweitens mangelt es an gegenseitiger Sachkenntnis.
– Drittens wird ein systematischer – d.h. in Lehre und Forschung stattfindender – Dialog von Physik und Philosophie durch akademische Rahmenbedingungen wie z.B. eine restriktive Personalpolitik und die mit der Modularisierung des Studiums einhergehende Ökonomie der Leistungspunkte erschwert.
– Viertens: Wer daran etwas ändern möchte, stellt fest, dass dies möglich, aber riskant ist.

Im Folgenden wollen wir uns diese Ursachen genauer ansehen:
i. Philosophisch talentierte und schöpferische Physiker/innen leben auch heute, doch den historischen und globalen „Impact" eines Albert Einstein entfaltet niemand mehr[31]. Eine prägende Wirkung von Ideen und Theorien über die Grenzen der Physik hinweg ist zwar vorhanden, aber sie findet meist anhand popularisierender Werke statt. Auch wenn es potenziell Physiker/innen gibt, die als globale Vorbilder dienen könnten, so wird ihr tatsächlicher Einfluss von der Explosion des verfügbaren Wissens bei gleichzeitiger Relativierung des Bildungs- und Wertekanons begrenzt. Diese eher wissenschaftssoziologische Ursache wird durch die zunehmende Konkurrenz um die begrenzte Ressource Öffentliche Aufmerksamkeit verstärkt. Die jährliche Nobelpreis-Verleihung gilt zwar als mediales Ereignis, auch einige Physiker erreichen durch das erwähnte Verfassen populärwissenschaftlicher Bücher eine gewisse Bekanntschaft auch außerhalb ihrer Community. Doch die wirklich großen Geister erscheinen nicht mehr ganz so groß wie früher. Eine etwas quantitativere Einschätzung lässt sich anhand der Teilnehmerzahl und des Bekanntheitsgrads der als Gipfeltreffen zu den Grundlagenproblemen der Physik (und Chemie) intendierten Solvay-Konferenzen[32] vornehmen: Bei der ersten Konferenz im Jahre 1911 waren 25 Personen zugegen, u.a. Einstein und Bohr. Ihre von der Weltöffentlichkeit aufmerksam verfolgten Diskussionen zum Thema „Die Theorie der Strahlung und der Quanten" bewirkten einen Durchbruch in der Anerkennung der neuerschaffenen Quantentheorie, mitsamt philosophischer Interpretation. An der bisher letzten, der Astrophysik und Kosmologie gewidmeten Solvay-Konferenz 2014, nahmen offen-

bar 79 Personen teil; das Echo bleib selbst in der physikalischen Gemeinde bescheiden. Zudem nutzen viele Autoren das populärwissenschaftliche Format, um unentschiedene ideologische Kämpfe mit Kollegen auf der öffentlichen Bühne auszutragen, obwohl die Meinung der Öffentlichkeit, und sei diese noch so überzeugt vom oder anderen dargelegten Standpunkt, keinen echten Einfluss auf die Fachdebatten ausüben kann. Dieses Phänomen der Auslagerung innerer Diskussionen auf die äußere Bühne dürfte auch ein Symptom der generischen Unsicherheit sein, welche der heutigen Physik vor allem in ihrer weltbildgebenden Funktion zu schaffen macht.

ii. Eine philosophische Vorbildung ist nicht immer gegeben oder sie erweist sich als nicht ausreichend: der eingangs zitierte Max Planck war, wie andere Physiker seiner Zeit, dem Werk Immanuel Kants zutiefst verpflichtet, Werner Heisenberg wurde durch Platon inspiriert. Einsteins private philosophische Diskussionsrunde „Akademie Olympia" befruchtete nach eigenen Angaben seinen physikalischen Werdegang und stellte als Triumvirat des später weltberühmten Physikers, sowie des Mathematikers Conrad Habicht und des Philosophen Maurice Solovine ein Musterbeispiel interdisziplinären Dialogs dar. Auch wenn die drei Freunde[33] unterschiedliche Fächer studiert hatten, so hatten sie alle bereits im Gymnasium eine fundierte philosophische Lektüre und Ausbildung erfahren, die eine gemeinsame Diskussion tragen konnte.

Die heutige Situation stellt sich ungleich komplizierter heraus: Eine ausreichende Sachkenntnis würde bedeuten, dass man den Stand der Forschung der jeweils anderen Disziplin rezipiert hat und mit deren Vertretern reden kann. Doch kaum eine Lehrende hat heute die Zeit, zusätzlich zu ihrer in aller Regel übervollen Agenda, sich in die umfangreichen und technisch anspruchsvollen Grundlagen einer anderen Disziplin zu vertiefen! Wachsende Studierendenzahlen und eine zunehmende Vielfalt von Studierangeboten sind zu bewältigen und Drittmittel verstärkt einzuwerben. Hinzu kommt die sich oft kleinteilig und zäh gestaltende Arbeit in den universitären Gremien. Die von mir geführten zahlreichen Gespräche mit Hochschullehrern, wissenschaftlichen Mitarbeitern und Studierenden beider Disziplinen offenbaren sowohl eine für echte Interdisziplinarität unzureichende Kenntnis der jeweils anderen Seite als auch den Wunsch, diesen als mangelhaft empfundenen Zustand zu ändern. Ein von mir ins Leben gerufenes Physikalisch-Philosophisches Kolloquium an der Technischen Universität Dresden, in dem einmal pro Semester ein Physikphilosoph bzw. Grundlagenphysiker vor Vertretern und Studierenden beider Disziplinen referiert, belegt das tiefe gegenseitige Unverständnis. Ähnliche

Erfahrungen konnten in einem zunächst experimentell eingeführten, inzwischen aber etablierten Seminar zur Philosophie der Physik gesammelt werden, wo Philosophiestudierende nach eigenen Angaben *erstmalig* sachlich korrekte Einblicke in die heutige Physik erhielten, während die Physikstudierenden die – für sie anfangs höchst ungewohnte - reflektierende Perspektive der anderen Disziplin einnehmen mussten. Die heutigen Physiker/innen haben nicht die Zeit, sich mit aktuellen philosophischen Debatten auseinanderzusetzen, was vom begrenzten Zugang der Philosophen/innen zum Kern des physikalischen Erkenntnisprozesses gespiegelt wird.

Eine Übersicht wichtigster aktueller Problemfelder der Physikphilosophie wird im dritten Abschnitt gegeben. Sie zeigt, dass trotz aller Hürden Physiker und Philosophen auch heutzutage mehr als genügend Stoff zum Diskutieren hätten und dass aus dem Austausch wertvolle Impulse ihrer Arbeit resultieren könnten. In der Tat lassen sich viele offene Fragstellungen weder der Physik, noch der Philosophie allein zuordnen und gehören deshalb zur Schnittmenge beider Disziplinen. Ihre Lösungen werden genuin interdisziplinär sein.

Der unzureichende Kenntnisstand wird auch von philosophischer Seite festgestellt, wofür es zahlreiche Belege gibt. So hält der Wissenschaftsphilosoph Martin Carrier fest:

> „Die Wissenschaftstheorie (WT) hat sich im Verlauf des 20. Jahrhundert etabliert; sie ist fester Bestandteil der theoretischen Philosophie geworden und tritt in dieser Hinsicht neben Felder wie Sprachphilosophie und Erkenntnistheorie. Entsprechend hat sich die WT professionalisiert. Bis weit ins 20. Jahrhundert hinein stammen wesentliche Beiträge von aktiven Wissenschaftlern. Ernst Mach und Pierre Duhem sind wichtige Beispiele aus der Zeit der vergangenen Jahrhundertwende; später setzte sich der Wiener Kreis zu einem nicht unbeträchtlichen Teil aus Wissenschaftlern zusammen. Dies hat sich geändert – ähnlich wie in der wissenschaftsreflexiven Schwesterdisziplin der Wissenschaftsgeschichte. Selbst naturphilosophische Fragen werden heute weitgehend von entsprechend spezialisierten Wissenschaftsphilosophen behandelt. Ebenso ist in der Methodenlehre die Innenperspektive des aktiven Teilnehmers der Außenperspektive des distanzierten Beobachters gewichen. Durch eine derartige Professionalisierung wird eine Eindringtiefe der Wissenschaftsreflexion erreicht, die aus der gleichsam nebenberuflichen Perspektive des aktiven Wissenschaftlers nicht zu gewinnen ist.“

Eine ähnliche Meinung zum gegenwärtigen Verhältnis von Physik und ihrer Philosophie geben Cord Friebe et al., die Autoren des Buches „Philosophie der Quantenphysik", Springer 2015, auf der ersten Seite des Vorworts:

> „Dass zwischen diesen Disziplinen (Physik und Philosophie, Anm. d. A.) ein enger Zusammenhang besteht, bedarf kaum einer besonderen Begründung, und dieses Verhältnis erfährt in Phasen wissenschaftlichen Umbruchs stets eine Intensivierung. Neue physikalische Theorien können das bisherige philosophische Wirklichkeitsverständnis herausfordern oder sogar revidieren. Gleichzeitig kann die Philosophie einen Beitrag zum genaueren Verständnis und zur Interpretation naturwissenschaftlicher Ergebnisse leisten. Die Umwälzungen in der Physik des frühen 20. wissenschaftlichen Jahrhunderts durch die Entwicklung von Quantenmechanik und Relativitätstheorie belegen das nachdrücklich. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts setzte eine Entwicklung ein, in deren Verlauf die Philosophie der Physik zu einem sehr lebendigen und hochprofessionalisierten Zweig der angelsächsisch geprägten Wissenschaftsphilosophie wurde. Zwar spielen Anregungen durch Physiker weiter eine Rolle, aber die Hauptströmung der Forschung wird von Philosophen/innen getragen, die in der Physik einen guten fachwissenschaftlichen Hintergrund haben, in ihrer Arbeit sich aber ganz auf Grundlagenfragen und philosophische Probleme der jeweiligen physikalischen Theorien konzentrieren. Die Ergebnisse dieser Forschung werden in spezialisierten Zeitschriften publiziert und diskutiert. Diese Professionalisierung hat auch dazu geführt, dass die neueren Debatten und Ergebnisse in Physikerkreisen wenig bekannt sind."

Hinzu kommen innerfachliche Aspekte: in beiden Disziplinen genießen Teilgebiete eine mit der Zeit sich verändernde Aufmerksamkeit. Einer der profiliertesten Physikphilosophen der Gegenwart, Michael Esfeld, beschreibt die Situation in einem Beitrag für das Wiener Jahrbuch für Philosophie (2015) mit Blick auf Stellung der Naturphilosophie in der aktuellen Metaphysik wie folgt:

> „In der Naturphilosophie stehen die naturwissenschaftliche Erforschung der Welt und die philosophische Reflexion auf die Welt untrennbar zusammen. Naturphilosophie versucht, eine Antwort auf im Wesentlichen die folgenden drei Fragen zu geben:
>
> 1) Was ist Materie? Was sind Raum und Zeit?
> 2) Was sind die Naturgesetze?

3) Wie erklärt die Materie in Raum und Zeit, indem ihr Verhalten bestimmten Gesetzen unterliegt, die beobachtbaren Phänomene?

Es ist offensichtlich, dass eine Antwort auf diese Fragen naturwissenschaftliche Forschung und philosophische Reflexion in einem erfordert. Das gilt für die ersten Vorsokratiker – die ionischen Naturphilosophen – und umso mehr für die frühe Neuzeit, den Höhepunkt der Naturphilosophie in den Werken von Descartes, Newton und Leibniz. [...] Kurz, Natur-Philosophie steht für eine Physik aus Reflexion darüber, was es grundlegend in der Natur gibt und was im Grunde die Natur zusammenhält, und für eine Metaphysik, die in konkrete physikalische Theorien übergeht mit empirisch testbaren Konsequenzen. Im 20. Jahrhundert ist diese Einheit von Physik und Metaphysik weitgehend verloren gegangen. [...] Was die Metaphysik betrifft, so ist diese seit den 1970er Jahren wieder Kernbestandteil der Philosophie. Jedoch dominiert eine so genannte analytische Metaphysik, die weitgehend aus dem Lehnstuhl erfolgt – nämlich als Begriffsanalyse – und daher fast vollständig von den Naturwissenschaften abgelöst ist (trotz häufiger gegenteiliger Lippenbekenntnisse). Dem gegenüber hat sich vor allem in den letzten zehn Jahren eine naturalisierte Metaphysik herausgebildet, die einen starken neo-positivistischen Akzent hat: Es wird suggeriert, dass man metaphysische Schlussfolgerungen mehr oder weniger direkt aus dem Formalismus einer physikalischen Theorie ablesen könnte. Das erwähnte Messproblem der Quantenphysik zeigt jedoch, dass dieses Unternehmen nicht gelingen kann."

Die faktische Entfremdung von Physik und Philosophie ist also Vertretern beider Disziplinen bewusst; Ansätze zur Wiederannäherung gibt es bereits, auch wenn von einer Breitendynamik leider noch kaum etwas zu spüren ist. Diese werden im letzten Abschnitt Erwähnung finden.

iii. Der Charakter der universitären Ausbildung hat sich in den letzten Jahrzehnten massiv verändert, vom klassischen Bildungsideal der *universitas* als intellektuelle Gemeinschaft der Lehrenden und Lernenden eher wegführend. Stattdessen sollen, innerhalb einer fest vorgeschriebenen Zeit, die in den Studiendokumenten genau beschriebenen – idealerweise berufsrelevanten – Fertigkeiten vermittelt und abgeprüft werden. Die politisch vorangetriebene Rationalisierung in der Lehre, gekoppelt mit zunehmender Spezialisierung in der Forschung, erweist sich als ungünstig für eine Widerannäherung von Physik und Philosophie. Das vorherrschende Ziel einer Normierung und Modularisierung, somit der fortschreitenden Durchstruk-

turierung der Bildungssysteme und deren zunehmender Beurteilung nach finanziellen Gesichtspunkten geht mit dem Verlust von Freiräumen einher. Dies betrifft vor allem fachübergreifende Angebote, die den Geist angehender Naturwissenschaftler durch das freie, also nicht zweckgebundene Schwingen der Phantasie befruchten zu lassen geeignet wären.

Die Notwendigkeit eines Korrektivs zu dieser Schieflage wurde zwar erkannt: Worte wie *Interkulturalität* und *Interdisziplinarität* sind in den internen Strategiepapieren der Universitäten oft anzutreffen. Gemeint ist damit genau das bereits Angesprochene: weg vom fachlichen Einerlei, hin zu mehr Austausch mit anderen Fächern, sowohl in der Forschung, als auch in den Studieninhalten. Doch Angebote wie z.B. die Physikphilosophie sind schwierig zu implementieren, sowohl wegen der bereits bestehenden Stoff- und Prüfungsdichte in den modularisierten Studiengängen als auch wegen des Mangels entsprechend qualifizierter Mitarbeiter.

iv) Für die gewünschten interdisziplinären Angebote wäre spezialisiertes Lehrpersonal notwendig. Leider führt die schon seit Jahren währende restriktive Personalpolitik zu erheblichen Engpässen. Zudem ist es in der heutigen universitären Landschaft kaum ratsam, auf *Lehre* zu setzen. Eine Spezialisierung auf Physikphilosophie verlangt in der Regel ein vorangehendes Physikstudium, um die philosophisch zu reflektierenden Inhalte durchdringen zu können. Spätestens dann, wenn sie mit der philosophischen Dissertation beginnen, wechseln dahin tendierende Physiker/innen faktisch die Community und erfahren die beruflichen Unwägbarkeiten einer typischen Philosophenlaufbahn[34].

Weil die Stellensituation in der Philosophie sich noch akuter als in den Naturwissenschaften gestaltet, wächst im Falle einer erfolgreichen Stellensuche die Wahrscheinlichkeit einer Abkehr vom ursprünglichen physikphilosophischen Thema und der Hinwendung zu anderen, unter Umständen leichter vermittelbaren Gebieten der Philosophie. Das gleiche gilt für die Geschichte der Physik, welche nach Auskunft von Mitgliedern des Fachverbandes Geschichte der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft offenbar noch immer keine herausragende Rolle in der Wissenschaftsgeschichte spielt und wo man sich eher auf Chemie, Medizin und Technik konzentriert, so jedenfalls dargestellt im Eröffnungsvortrag des Fachverbandes „Geschichte der Physik“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft auf der Frühjahrstagung 2017. Professuren für Physikgeschichte sind inzwischen auf Grund fehlender Neubesetzungen sehr dünn gesät. Dieser, angesichts der übergeordneten Rolle der Physik unter den Wissenschaften schlicht alar-

mierende Umstand wird durch die formale Trennung von *Philosophie* und *Geschichte* erschwert. Denn auch diese Communities sehen sich als weitgehend unabhängig voneinander und pflegen jeweils ihren eigenen Fachdiskurs. Als Argument werden gerne die unterschiedlichen Methodiken und Zielsetzungen ins Feld geführt. Doch auch diese Schutzzone sollte zugunsten eines größeren gesellschaftlichen Impacts überwunden werden. Der aktuelle IHPS-Ansatz (Integrated History and Philosophy of Science) lässt diesbezüglich etwas Hoffnung keimen. Er ist deshalb realistischer als die heutige Trennung von Philosophie und Geschichte in jeweils einer eigenen Wissenschaft, weil er der hinreichend belegten Tatsache Rechnung trägt, dass nur die Verbindung sorgfältiger historischer Arbeit mit der Reflexion über die zugrundeliegenden konzeptionellen und somit naturphilosophischen Grundlagen zu einem akkuraten Bild der reflektierten Wissenschaft führen kann.

– Die Verfügbarkeit bestehenden Personals für fächerverbindende oder gar interdisziplinäre Formate ist begrenzt: In den letzten Jahren wurden bekanntlich viele Haushaltsstellen aus Spargründen abgebaut. Stattdessen sollen die Fachrichtungen verstärkt Drittmittel einwerben und die anfallende Lehre durch Personal abdecken, das auf dieser Basis beschäftigt ist. Doch auf Drittmittelstellen beschäftigte Physiker/innen können die arbeitsintensiven interdisziplinären Lehrangebote kaum stemmen, da sie sich auf einen quantifizierbaren Erfolg ihres von den fördernden Institutionen zu evaluierenden Projektes konzentrieren müssen. Außerdem verlangen interdisziplinäre Formate aufgrund ihres, zumindest in der Aufbauphase eher experimentellen Charakters, eine gewisse Kontinuität über Jahre hinweg, um die gewünschte quantifizierbare Wirkung entfalten zu können, weshalb sie im aktuellen Standardmodus enger Befristungen kaum gedeihen können. Tatsächlich hat im universitären Mittelbau schon längst eine Segregation des wissenschaftlichen Personals stattgefunden: Die inhärenten Daueraufgaben und die Standardlehre an den Fachbereichen werden im Wesentlichen von den wenigen unbefristeten wissenschaftlichen Mitarbeitern bewältigt[35], während die Drittmittelstellen vor allem für die Forschung und für *gehobene* (potenziell karriereföndernde) Lehre gedacht sind. Die betreffenden Mitarbeiter sollen ja genügend Erfolg haben, um nach Vertragsende weiterzuziehen! Das Dilemma ist nachvollziehbar: Einerseits ist der politische motivierte *Sparansatz* vernünftig. Er wird durch die Notwendigkeit begründet, auch in Zeiten zunehmender Studierendenzahlen eine wirtschaftliche Lösung zu erreichen. Andererseits kann er in praxi nicht wirklich aufgehen, weil der tradierte Erfolg der Universität als *Bildungsanstalt* eben auf Freiheit beruht.

– Lehre gilt in Deutschland bekanntlich weniger als Forschung. Sich auf interdisziplinäre Lehre zu spezialisieren ist für Mitarbeiter offensichtlich nur an denjenigen universitären Standorten möglich, wo eine solche Entwicklung erwünscht und gezielt gefördert wird. Die eigene Erfahrung der Autorin an der Technischen Universität Dresden zeigt, dass man die Notwendigkeit interdisziplinärer Lehre erkennt und nach Wegen einer nachhaltigen Implementierung sucht.

– Zudem erfahren die klassischen, an den Universitäten angesiedelten Physik- und Philosophie-Fachrichtungen und Institute schon seit der Entstehung der – inzwischen sehr starken – außeruniversitären Forschungseinrichtungen personelle und finanzielle Zentrifugalkräfte. Es entstehen zwar neue Studiengänge, vornehmlich zur Darstellung und Verstärkung entsprechender anwendungsorientierter Forschungsgebiete. Der Anwendungserfolg der Philosophie ist aber naturgemäß schwer zu quantifizieren, weshalb darauf basierende interdisziplinäre Studiengänge geringe Chancen haben, den internen Auswahlprozess zu bestehen. Deshalb ist der Dialog von Physik und Philosophie auch in der Lehre sehr schwach geworden. Im Rahmen der Kurs- und Spezialvorlesungen des Physikstudiums können interdisziplinäre Aspekte, sowohl aus Zeitgründen, als auch aus Gründen der Stofforganisation, nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die Begrifflichkeiten und Theorien werden von den Lehrenden unter dem Druck einer eher formalistischen Ökonomie nach mathematischem Werkzeugkasten und Gebietsrelevanz aufgenommen und geordnet. Zwar geht man, in aller Regel, wenigstens punktuell auf die jeweilige Begriffsentstehung ein, die größeren philosophisch-historischen und interdisziplinären Perspektiven müssen aber weitgehend ausgeklammert werden.

Wie bereits dargelegt: Es handelt sich inzwischen um unterschiedliche Gemeinden. Ohne spezielle Kenntnisse lassen sich die aktuellen Debatten nicht verfolgen. Eine philosophische Ausbildung ist an den Physik-Fachrichtungen faktisch nur dann möglich, wenn Philosophie als Nebenfach gewählt werden kann und wenn am Philosophischen Institut vor Ort Wissenschaftstheorie oder gar die weit technischere Physikphilosophie abgedeckt werden.

Abschließend halten wir fest: Im Zuge der akademischen Ausdifferenzierung bzw. Professionalisierung der Philosophie ist deren Dialog mit der Physik schwieriger und deshalb qualitativ und quantitativ wesentlich schwächer geworden: Man tauscht sich kaum noch direkt aus und arbeitet äußerst selten wirklich zusammen. Die Physiker/innen haben nicht die Zeit, die umfangreiche philosophische Fachliteratur zu lesen bzw. Arbeitsbeziehungen mit den Vertretern der aktuellen

Physikphilosophie zu pflegen. Selbst bei beiderseitigem Interesse erfolgt der Austausch nur punktuell, ist eher informeller Natur, und verbleibt ohne messbare Auswirkung auf die zwei Disziplinen. Umso willkommener wären ständige Angebote: So erlebte die Autorin, als sie an ihrer Physikfachrichtung ein physikphilosophisches Seminar ins Leben rief, sowohl die spontane Unterstützung der Professoren als auch ein lebhaftes Interesse der Physik- und Philosophie-Studierenden. Beides dürfte u.a. im Bewusstsein eines defizitären Zustandes verortet sein!

2.3. Die Zukunft: Einheit in der Vielfalt?

Eine Wiederannäherung von Physik und Philosophie in Form eines gemeinsamen Diskurses würde beiden Disziplinen nicht nur innerfachliche Impulse geben, sondern auch ihre gesellschaftliche Relevanz festigen, denn: Bei aller Vielfalt und Spezialisierung stellt sich auch heute im Kern noch immer die Frage nach der Einheitlichkeit des daraus resultierenden Weltbildes. Bei allem – von Generation zu Generation vererbten – *Respekt* vor der Mathematik und dem damit einhergehenden Vertrauen, dass man in der Physik schon *das Richtige* tun wird, und möge dieses Tun den Uneingeweihten noch so hermetisch isoliert erscheinen: Der Fachfremde hat ein Recht darauf, zu erfahren, was in der Physik eigentlich vor sich geht. Die aktuellen physikalischen Theorien sind mathematisch so abstrakt und die Experimente so kompliziert geworden, dass es einer inhaltlich korrekten Übersetzung – einer Interpretation – bedarf, um ein plausibles Verhältnis der theoretischen Begrifflichkeiten und experimentellen Messgrößen zur angenommenen Wirklichkeit herzustellen. Auch wenn es inzwischen seitens einzelner Forschungsgebiete unzählige Initiativen und Bemühungen für die verständliche Kommunikation ihres Tuns gibt[36], sind in erster Linie die Philosophen gefragt. Es finden noch viel zu wenige Diskussionen darüber statt, was physikalisches Verständnis überhaupt bedeutet, und wie sich das aktuell geltende physikalische Weltbild in eine alltagstaugliche Sprache korrekt darlegen lässt. Kurz ausgedrückt: Es stellt sich akut die Frage nach einem neuen *Narrativ* der Physik.

Physiker erkennen die wissenschaftstheoretische Relevanz dieser Aspekte, auch wenn ihnen von philosophischer Seite mitunter eine mangelnde philosophische Durchdringung vorgehalten wird. So schreibt der Wissenschaftsphilosoph Manfred Stöckler[37]:

> „Physikerinnen und Physiker stützen sich meist auf eigene philosophische Intuitionen, die häufig Strandgut der Geschichte der Ideen sind, und in den Naturwissenschaften fast nie systematisch reflektiert werden."

Diese Kritik ist zwar insoweit berechtigt, als es den meisten Physikern/innen an einer systematischen philosophischen Vorbildung fehlt. Andererseits legt die Art und Weise, wie die Physik wirklich funktioniert, nahe, dass die philosophischen Intuitionen der Physiker/innen grundlegend sind; sie weisen kaum zufällig in die richtige Richtung, sondern weil sie sich aus der Physik selbst ergeben und somit fachimmanent sind. Wir haben bereits gesehen, dass die philosophische Reflexion Bestandteil des physikalischen Erkenntnisprozesses ist und dass ein Verständnis der Physik als Disziplin ohne die Berücksichtigung ihrer philosophischen Implikationen nicht gelingen kann. Wie sich dies in der Praxis konkret gestaltet, kann am Beispiel des physikalischen Verstehens verdeutlicht werden: Was bedeutet dieses Verständnis, und wie gehen die Physiker damit um?

Essenziell dafür sind Darstellungen des untersuchten Systems, als Modelle bekannt. Jeder Physikstudent und jede Physikerin kennt die fast obsessive Frage, „Verstehen wir das wirklich?" oder „Wie kann man dies am besten verstehen?" gefolgt von ausführlichen Auseinandersetzungen mit jeder greifbaren Facette der betreffenden Erscheinung. Dabei werden zum Beispiel anschauliche „mechanische" Skizzen angefertigt, um die Funktionalität aus der jeweils sparsamsten Formgebung abzuleiten, sowie stetig auf das bereits Gelernte rekurriert. Die Integration der zu verstehenden Erscheinung in die bestehende Erklärungstextur wird durch das routinemäßige Nachsinnen darüber begleitet, in welchem weiteren Kontext sich das so gewonnene Schema noch anwenden ließe, also über die Voraussagekraft des Modells. Diese Diskussionen mit Kommilitonen bzw. inneren Denkprozesse setzen bereits in den ersten Semestern an und bleiben auch bei der Bearbeitung von Übungsaufgaben und Prüfungsvorbereitungen. Nach einiger Zeit wird deutlich, dass erfolgreiche Studierende über ein das reine Faktenwissen überschreitendes *physikalisches Verständnis* verfügen, das sich später in Form der schwer fassbaren *physikalischen Intuition* als wesentliches Ingredienz der Forschungsarbeit herausstellen wird. Der Prozess des Lernens umfasst sowohl den Weg vom Abstrakten zum Konkreten, also der Anwendung erworbenen Wissens auf spezielle Problemstellungen, als auch das Extrahieren allgemeiner Aussagen aus Spezialfällen. Dieses bidirektionale Lernschema folgt übrigens den gleichen komplementären Prinzipien *form follows function* und *function follows form* wie die Ausgestaltung von Materie oder mensch-

licher Organisationen. Ein Beispiel für Ersteres ist die Strukturaufklärung von Molekülen in der Biochemie[38], wo man zeigen kann, dass die Funktion eines Moleküls aus dessen *Form* abgeleitet (faktisch: verstanden) werden kann, weil sie aus der räumlichen Anordnung der Atome resultiert. Die aktuelle Biophysik verfolgt die umgekehrte Richtung: Indem man die zwischen Zellen und Zellverbänden wirkenden Kräfte untersucht, kann man nachvollziehen, wie sich im Zuge der Morphogenese aus einem undifferenzierten Zellhaufen ein strukturierter Organismus entwickelt[39].

Die implizite philosophische Komponente physikalischen Denkens offenbart sich in leitenden Prinzipien wie die Sparsamkeit und die logische Konsistenz der Erklärung. Der Physiker Nicolas Giordano erläutert dies beispielsweise in seinem Buch *Physics of the Piano*, Oxford University Press 2010, wie folgt:

> „This takes us to a different sort of question – what does a scientist mean when he or she uses the word *understand*? [...] The approach taken by most physicists is to describe the 'essence' of a problem. This means that all the extraneous aspects of the problem are ignored, and only the truly essential parts are described in the simplest possible terms. [...] The quest for simplicity is very much in accord with our use of word understand and is often discussed using a principle known as Ockham's razor[40]. In physics, it sometimes happens that a particular phenomenon can be described equally well by two different theories or explanations. According to Ockham's razor, the simplest theory or explanation is to be preferred, since it gives the most economical description."

Weitere wichtige Komponenten sind die reale Entsprechung oder Relevanz rein theoretischer Erscheinungen, wie zum Beispiel der Wellenfunktion in der Quantenphysik oder der aufgerollten Dimensionen, welche die äußerst abstrakte Mathematik der sogenannten Strings mit sich bringt, sowie die experimentelle Überprüfbarkeit physikalischer Hypothesen als zu erfüllendes Kriterium, damit mit Fug und Recht von einer *Theorie* gesprochen werden kann. Letzteres ist im Falle der String-Hypothese noch nicht gegeben, was gegenwärtig zu eingehenden philosophischen Diskussionen führt. Zur Verdeutlichung sollen im Folgenden drei konkrete, noch ungelöste, genuin physikphilosophische Problemstellungen vorgestellt werden, welche von beiden Disziplinen als solche erkannt und diskutiert werden: die Vorstellungen über die elementaren Bestandteile der Materie, die Vorstellungen über die Natur der Raumzeit und die Frage nach der experimentellen Überprüfbarkeit von Hypothesen. Alle drei Problemstellungen sind Jahrtausende alt, vor allem

die erste, auch als atomistisches Forschungsprogramm bekannt. Diese soll ausführlicher vorgestellt werden, die anderen zwei in knapper Form.

i) Der Atomismus erfüllt bereits in seiner antiken Form die Kriterien eines universellen Programms zur Erklärung der Natur. Seine bemerkenswerte Erklärungsleistung zeugt von der Kontinuität von Ideen und Erklärungsstrategien in der Kulturgeschichte der Menschheit, weshalb er sich besonders dazu eignet, die Wesensverwandtschaft von Physik und Philosophie zu belegen. Manche Philosophen vertreten auf überzeugende Weise die These, dass die Unterschiede zwischen der antiken, rein philosophischen Phase und des im 19. Jahrhundert beginnenden naturwissenschaftlichen Atomismus forciert sind, da sie erstens auf die unterschiedliche Rezeption eines und desselben Programms beruhen und zweitens nur quantitativer Natur sind. Auch wenn damals die mathematischen Werkzeuge noch nicht zur Verfügung standen, die aus der heutigen Physik die mit Abstand höchstentwickelte aller Naturwissenschaften entstehen ließen, so war das Ziel dennoch sowohl metaphysischer wie naturwissenschaftlicher Art. Die antike Naturphilosophie bestand zwar nicht nur aus Physik, enthielt aber unbestritten einen schwergewichtigen physikalischen Teil und wirkte somit weltbildgebend auch im Sinne moderner naturalistischer Auffassungen. Das Studium überlieferter Texte von Leukipp, Demokrit, Platon u.a. legt den Schluss nahe, dass der Atomismus zum einen die wahrnehmbare Vielfalt der Erscheinungen der materiellen Welt auf wenige elementare Bestandteile – die unterschiedlichen, in Ermangelung von Beobachtungen lediglich postulierten Atomarten – reduzieren konnte, deren Konfigurationswechsel die beobachtbaren Veränderungen erklärten, zum anderen aber auch bemüht war, metaphysische und kausale Aspekte einzubeziehen. Insgesamt wurde eine im vorliegenden Kontext ausreichende, unmittelbar zugängliche Erklärungssprache entwickelt: Metaerklärungen oder Interpretationen der Begriffe waren nicht notwendig. Zwischen dem sinnlich Wahrnehmbaren und dem metaphysischen Hintergrund aller Dinge bestand somit eine eindeutige Zuordnung: Auch den antiken Denkern war klar, dass man über die intrinsischen und relationalen Eigenschaften der unsichtbaren Atome letztlich nicht überprüfbare Annahmen machen musste. Dennoch: Bei der Beschreibung dieser Eigenschaften konnte man von Kategorien der makroskopischen bzw. direkt wahrnehmbaren Welt auf das Mikroskopische extrapolieren. Die Atome waren diskret, demnach individuierbar, sie waren irgendwo in der Raumzeit zu finden, also lokalisiert, und sie waren – soweit nicht am selben Ort – voneinander unterscheidbar. Letzteres erklärt vor

allem makroskopische Eigenschaften wie Dichte, Härte und Druck durch die Anhäufung beziehungsweise den Mangel an Teilchen.

Dies änderte sich mit der Quantenphysik, weil diese ein vollkommen ungewohntes Verständnis dessen verlangt, was Teilchen *sind* und wie sie untereinander wechselwirken. Jenseits inzwischen sattsam bekannter einzelner Aspekte, welche in diesem Rahmen nicht erläutert werden können, lässt sich die zentrale philosophische Herausforderung der Quantentheorie und ihrer Weiterentwicklung im Rahmen der noch abstrakteren Quantenfeldtheorie wie folgt ausdrücken: Wie kann der mathematische Formalismus der Theorie mit so etwas wie einer *realen Welt* in einem idealerweise intuitiven Zusammenhang gebracht werden? Vereinfacht formuliert: Die Quantentheorien sind von mathematisch validen, aber rein theoretischen Konzepten bevölkert, wie etwa Spins, Wellenfunktionen, Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Feldoperatoren. Das Problem ist: was mathematische Modelle enthalten, muss nicht unbedingt in der Realität existieren oder sich physikalisch zu erkennen geben. Die physikalischen Theorien weisen rein theoretische Terme aus, denen man keine realen Entsprechungen zuordnen kann. Zudem sind diese Theorien ontologisch unterdeterminiert. Zur Erklärung eines einzigen Datensatzes sind mehrere Theorien möglich. Kurz ausgedrückt, die Physik hilft uns dabei, die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den elementaren Konstituenten der Welt zu verstehen, sie verrät aber nicht, um welche Teilchen es sich genau handelt. Die Teilchenvorstellungen ändern sich konsequenterweise ständig, was folgende Abbildung eindrucksvoll zeigt:

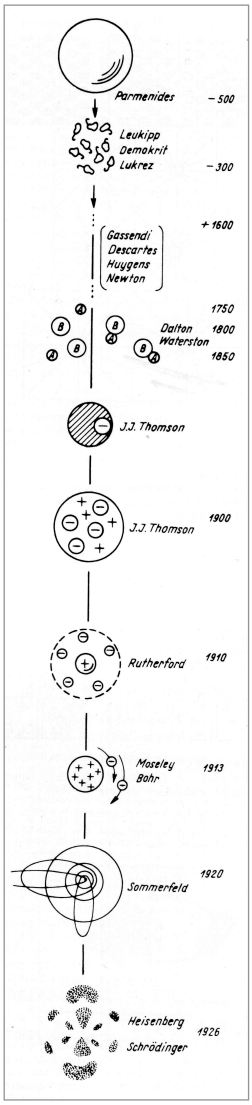


Abb. 4 Wandel der Atomvorstellungen im Laufe der Zeit. Nach Károly Simonyi, Kulturgeschichte der Physik, Rowohlt 2005.

Auch wenn man heutzutage definitiv nicht mehr von Atomen sprechen kann, so setzt sich die antike Ideenlinie als *atomistische Erklärungsstrategie* fort[41], wie folgende Tabelle zeigt.

	Antike Atomvorstellungen	Elementarteilchenphysik im Rahmen von Quantenfeldtheorien (gegenwärtige Atomphysik)
Inhaltlicher Schwerpunkt	naturphilosophisch	naturwissenschaftlich
Hauptziel des Forschungsprogramms	Erklärung bzw. Verständnis von Entstehen und Vergehen sowie der Qualitäten mit dem Ziel einer Vereinheitlichung	Erklärung / Vorhersage quantitativer Details der physikalischen Erscheinungen mit dem Ziel einer Vereinheitlichung
Methode	Erklärung mit unsichtbaren Atomen aber anschaulichen Modellen. Entfernung von der sichtbaren Welt verbleibt anschaulich, weil man auf das Unsichtbare extrapoliert	Erklärungen anhand allgemeiner Naturgesetze bzw. Prinzipien, deren Mathematisierung mit einem Verlust der Anschaulichkeit einhergeht
Grenzen der Teilbarkeit	Dogmatisch (Atome sind unteilbar)	Gilt nicht allgemein, sondern nur für bestimmte Energiebereiche gerechtfertigt
Formen und Eigenschaften der Atome in der Raumzeit	Alltagsnahe Spekulationen über die Formen der Atome, das Leere ist noch kein generischer Begriff eines Behälterraums. Weitgehend spekulativ, ansatzweise Begründung durch Erklärungserfolg	Räumlich Gestalt der Atome (Elementarteilchen) unklar. Eigenschaften werden generell nicht (mehr) räumlich charakterisiert. Sie werden teilweise durch mathematische Argumente und durch ihren Erklärungserfolg begründet.
Lebensdauer der Atome	Unendlich (das Bleibende im Wechsel der Erscheinungen)	Elementarteilchen entstehen und vergehen (Umwandlung). Es gibt aber allgemeine Naturprinzipien (Symmetrien) welche für kollektive Eigenschaften Erhaltungsgrößen festlegen
Zusammensetzung	Zusammenhalt der Atome nicht gut begründet, Zusammensetzung wird anschaulich verstanden	Zusammenhalt der Teilchen durch Kräfte erklärbar, das Zusammengesetztsein kann nicht mehr deduktiv durch experimentelle Zerlegbarkeit expliziert werden, sondern induktiv-statistisch

Vergleich von Grundzügen antiker und moderner Atomvorstellungen, abgewandelt nach Manfred Stöckler.[42]

Weder in der Quantenmechanik, noch in der späteren Quantenfeldtheorie – die den modernsten und leistungsfähigsten mathematisch-konzeptuellen Rahmen der Physik darstellt – ist eine eindeutige Beschreibung von Objekten und Prozessen direkt aus dem mathematischen Formalismus ablesbar. Weder gibt es die Punktteilchen, noch deren Bahnen nach klassischem Verständnis. Eine Erklärung

dessen, wie der Formalismus mit der realen Welt korrespondiert, ist nur im Rahmen der sogenannten Minimalinterpretation und der spätere Interpretationen der Quantentheorie möglich. Eine Theorie erst durch ihre Interpretation zu verstehen bedeutet aber, dass der mathematische Formalismus nicht länger der Sprache folgt, sondern diese *erzeugt*. Wie u.a. der Philosoph Manfred Stöckler feststellt: „Der mathematische Apparat liefert jene Minimalsemantik, welche die Überprüfung der Theorie durch Experiment erlaubt". Das Problem ist nichttrivial, denn diese, aus der Theorie resultierende Sprache eignet sich kaum als Narrativ der Physik; sie ist für Außenstehende äußerst unanschaulich. Heutige Quantenphysiker konzedieren darin, dass ein allgemein verständliches Vokabular fehlt, um die durch den Filter der Theorie experimentell zugänglichen Erscheinungen angemessen zu deuten.

Die heutige Physik vermag beispielsweise noch nicht, eine allgemein verständliche Erklärung dessen zu bieten, was ein subatomares *Teilchen* eigentlich ist. Es liegt nahe, dass die komplexe Aufgabe einer adäquaten philosophischen Deutung aktueller Teilchenkonzepte nur im Rahmen einer Zusammenarbeit von Physikern und Philosophen gelöst werden kann. Auf diese Weise könnte weiterhin an die tradierten, in der kulturellen Landschaft vielerorts noch lebendigen Ideenlinien angeknüpft werden. So hält der berühmte Quantenphysiker Anton Zeilinger in seinem Vorwort zu den „Physikalischen Prinzipien der Quantentheorie"[43] über Heisenbergs Einfluss auf die heutige Quantenphysik fest:

> „Wer meint, Heisenbergs physikalische Prinzipien der Quantentheorie, die Niederschrift seiner Vorlesungen an der Universität Chicago im Jahr 1929, wären lediglich von historischem oder philosophischem Interesse, der irrt. Im Gegenteil, seine Darstellung des, wie er es nennt, ‚Kopenhagener Geistes der Quantentheorie' ist eine klare Analyse der neuen Bedeutung und Rolle des Experiments in der Quantenphysik, die heute aktueller ist als je zuvor. [...] Die meisten der frühen Gedankenexperimente fanden direkte oder analoge Realisierung, und es gibt sehr viel mehr Experimente zur Quantenphysik als zu Heisenbergs Zeiten. Die Interpretationsfragen sind jedoch heute genauso aktuell, wenn nicht aktueller als damals. Einiges in den heutigen Diskussion könnte jedoch durch Rückgriff auf die Wurzeln an Klarheit gewinnen."

ii. Nicht nur das Teilchenkonzept als ontologische Basis alles physikalischen Geschehens, durchlief tiefe Wandlungen. Das gleiche gilt auch für die Auffassungen darüber, wo sich die Physik eigentlich abspielt: die Vorstellungen zu Raum und Zeit. Im Wesentlichen wird auch heute noch, wie zu der Zeit der berühmten Kontroverse zwischen Newton und Leibniz, die die gesamte wissenschaftliche Welt beschäftigte und nachhaltige Impulse setzte, darüber diskutiert, ob Raum und Zeit als Rahmen,

Bühne oder Behältnis fungieren, also eine eigene, von der Materie getrennte Existenz besitzen oder ob sie nur Ausdruck der Beziehungen zwischen den Körpern sind. Eine ähnlich gelagerte Debatte findet übrigens zur Kausalität statt, einem sowohl physikalisch, als auch philosophisch umstrittenen und schwer zu fassenden Begriff. In der Philosophie spricht man im ersten Fall von einer absoluten, im zweiten von einer *relationalen* Raumzeit. Historisch gesehen entspricht die absolute Raumzeit der klassischen Newtonschen Physik, während die relationale Auffassung zunächst von Leibniz und später von Ernst Mach vertreten wurde.[44] Die Ideengenese der Relativitätstheorie, für die Einstein die Gedanken Ernst Machs aufnahm und abwandelte, ist inzwischen ausführlich rekonstruiert worden. Ausgehend von einer kausalen Auffassung der Zentrifugal- und Trägheitskräfte, welche als Wechselwirkungen verstanden werden, formuliert Einstein, dass einerseits alle Bewegung Relativbewegung ist und dass andererseits Trägheitskräfte physikalisch ohne Bezug auf andere Körper beschrieben werden. Wie Martin Carrier bemerkt, ist beides nur durch das Mach'sche Prinzip in Einklang zu bringen, demzufolge die Trägheitskräfte eine Wirkung ferner Massen sind. Von Interesse an dieser Stelle ist vor allem der Einfluss der Mathematik auf die physikalischen und philosophischen Vorstellungen: So wie man lange Zeit unter dem Einfluss Euklids so ziemlich alles zu geometrisieren versuchte, basiert Einsteins Auffassung der Gravitation auf einem geometrischen Gedanken: Die Gravitation ist nun Ausdruck der Raumzeit selbst, deren Dynamik sie gleichsam entspringt. Ihre Wirkung lässt sich mathematisch durch die Metrik – vereinfacht gesprochen eine Abstandfunktion – ausdrücken: Fallende Körper folgen der geradesten Bahn. Die Raumzeit verändert sich nun in Anhängigkeit von der lokalen Massen- und Energiedichte und „bestimmt", welcher Bahn die Körper folgen. Umgekehrt verändern die Massen die Gestalt der Raumzeit – wir haben es erneut mit einer bidirektionalen Beziehung zu tun.

Das heutige Hauptproblem besteht in der andauernden Unvereinbarkeit der Relativitätstheorie mit der Quantenphysik: Wie in Abb. 4 zu sehen, besteht das heutige „Atom" nach der seit Heisenberg und Schrödinger geltenden quantenmechanischen Auffassung aus mehreren auf bestimmte Weise angeordneten Gebieten, welche allerdings nicht für einen wohldefinierten Ort stehen, an dem sich das Teilchen befindet, sondern lediglich Aufenthaltswahrscheinlichkeiten darstellen. Diese Unbestimmtheit wird durch die Punktierung der Orbitale in Abb. 4 angedeutet. Über die philosophischen Implikationen der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie – welche die aktuell geltenden Elementarteilchen beschreibt – ist viel geschrieben und diskutiert worden. Sowohl in der Physik, als auch in der Philosophie konzediert man dennoch, dass eine sowohl epistemisch, als auch ontologisch befriedigende und somit konsensfähige Interpretation noch nicht vorliegt.

Eines der Hauptprobleme besteht darin, dass die quantisierten Teilchen und Felder ontologisch nicht auseinander zu halten sind[45]. Voraussagen sind grundsätzlich nur im Wahrscheinlichkeitsmodus möglich, was auch für den Aufenthaltsort eines Teilchens gilt. Demnach kann ein Teilchen sich prinzipiell an zwei Orten gleichzeitig ‚befinden'. Erst im Falle der Messung kollabiert die sogenannte Wellenfunktion und es entsteht Gewissheit darüber, wo das Teilchen eigentlich ist. Hier entsteht ein gravierender Widerspruch zur Relativitätstheorie, die klassisch ist – also nicht quantisiert. Wir haben gesehen, dass das Gravitationsfeld durch die Energieverteilung erzeugt wird. Ein Teilchen, welches Energie besitzt, macht sich auch gravitativ bemerkbar. Doch das von ihm erzeugte Gravitationsfeld muss ortsbestimmt sein – da es durch eine klassische Feldtheorie beschrieben wird. Deshalb kommen Gravitation und Quantenphysik nicht zusammen, was dem Streben nach Einheitlichkeit in der Physik entgegenwirkt. Übrigens: Darüber, ob die allumfassende Theory of Everything überhaupt ein notwendiges Ziel der Physik darstellt, oder ob man mit in Teilbereichen gut funktionierenden, mathematisch nicht zu vereinbarenden Theorien sich zufrieden geben darf, wird ebenfalls rege diskutiert. Wie dem auch sei: Nach einer Quantentheorie der Gravitation wird gegenwärtig fieberhaft gearbeitet. Die bisher prominentesten Ansätze sind die Schleifenquantengravitation und die String-Hypothese.

Im Zuge dessen werden allerdings die Raumzeit-Konzepte immer abstrakter, denn sie ergeben sich aus der zugrundeliegenden Mathematik. Auch hier eilt der Formalismus der Erfahrung voraus, was realiter eine Antwort auf die Frage liefert, wie abstrakte Größen eigentlich physikalischer Natur sein können: Nun, sie sind schon mal da und es wird nach Möglichkeiten gesucht, sie experimentell zu überprüfen. Faktisch fehlt natürlich der Bezug zu einer wie auch immer gearteten *Wahrnehmbarkeit*, so dass man von einer maximalen Unanschaulichkeit sprechen darf. Je nach Modell wirkt die Raumzeit schaumig, körnig oder flüssig, setzt sich aus gewundenen Netzwerken auf der weit subatomaren Planck-Skala zusammen, wird aus vierdimensionalen Dreiecken zusammengebaut oder erhält 10 und mehr Dimensionen, so wie es die eigenwillige, eigens dafür entwickelte Mathematik der kleinen vibrierenden Saiten diktiert, die man eher in der englischen Bezeichnung Strings kennt. Diesen Ansätzen ist nicht nur die intrinsische Problematik einer noch unausgereiften Mathematik gemeinsam, sondern auch die Tatsache, dass sie auf dem jetzigen Technikstand nicht experimentell zugänglich sind.[46]

iii. Somit wären wir bei der mangelnden empirischen Überprüfbarkeit moderner physikalischer Ansätze angelangt, was anhand der String-Hypothese verdeutlicht werden soll. Diese betrat die Bühne der Physik als Lösungsansatz eines schwerwiegenden Problems: Wie bereits kurz erwähnt, gibt es in der Physik historisch gewach-

sene klassische Theorien, etwa die *Allgemeine Relativitätstheorie*, sowie Quantentheorien, wie die im sogenannten *Standardmodell* vereinigten Theorien der schwachen, der starken und der elektromagnetischen Wechselwirkung. Bei ersteren ist die zugrundeliegende Raumzeit-Geometrie glatt, die Gravitation stellt die Krümmung des Raumes dar. Bei einer Quantentheorie hingegen treten Quantenfluktuationen auf; die von Heisenberg postulierte Unschärferelation ist allgegenwärtig. Dies bedeutet, dass der Raum auf mikroskopischer Skala verzerrt wird; insbesondere kann eine Krümmung nicht definiert werden. Deshalb ist die Allgemeine Relativitätstheorie nicht mit dem Standardmodell vereinbar. Man bräuchte dafür einen Ansatz, bei dem die Mikrostruktur der Raumzeit sowohl Gravitation als auch Quanteneffekte tragen kann. Als mögliche Lösung wurde eine prinzipielle Grenze der zulässigen Raumzeit-Verzerrung vorgeschlagen: Indem man an Stelle von Punkten eine eindimensionale *Saite* oder *Schleife* als elementare Größe einführt, dürfen bestimmte Größen sich nicht mehr der Null nähern, was lästige Divergenzen einhegt. Diese technischen Details sind an dieser Stelle wichtig, weil sie die Genese einer *physikalischen Ontologie* aus *mathematischen Überlegungen* belegen.

Erste Ideen zur String-Hypothese entstanden bereits Ende der 1960er Jahre, als Gabriele Veneziano erkannte, dass sich Eigenschaften verschiedener Elementarteilchen durch eine einzige Funktion beschreiben zu lassen schienen. 1970 schlugen die Physiker Nambu, Nielsen und Susskind vor, die Punktteilchen durch schwingende eindimensionale Saiten zu ersetzen, weil dies die Beschreibung der Kernkraft-Wechselwirkung durch die Eulersche Beta-Funktion erlaubte. Kurz darauf, im Jahre 1974 erkannten Schwarz und Scherk, dass bestimmte Schwingungsmuster der Strings das Elementarteilchen der Gravitation, genannt Graviton, verkörpern, wodurch eine Quantentheorie der Gravitation in Reichweite schien. Allerdings ließ sich damals die starke Kraft noch nicht integrieren. Das Problem konnte 1984 gelöst werden, als Green und Schwarz zeigten, dass die String-Hypothese mächtig genug ist, um alle vier bekannten Wechselwirkungen (die starke, die schwache, die elektromagnetische und die gravitative) *und* die Materie einzubeziehen. Diese ermutigende Erkenntnis führte zu mehr als Tausend Publikationen in zwei Jahren[47]. Leider standen irgendwann nicht weniger als fünf, mathematisch derartig anspruchsvolle *string*-basierte Modelle zur Auswahl, dass lediglich Näherungslösungen für angenäherte Gleichungen möglich waren.

Die zweite Superstringrevolution wurde um die Jahrtausendwende ausgelöst und dauert heute noch an. Wie Ed Witten, einer der wichtigsten Verfechter der Strings, betont, besteht der Hauptvorzug der String-Hypothese in deren bemerkenswerter Eigenschaft, die Gravitation vorherzusagen. Sie vereinigt damit alle bekannten

Wechselwirkungen und deren Botenteilchen, die sich als Schwingungszustände der zugrundeliegenden Strings darstellen lassen. Kurz gefasst bestehen Teilchen und Felder nun aus einem und demselben Stoff: eindimensionale offene oder geschlossene Strings von 10–35m Länge. Wie geht das überhaupt? Die Schwingungszustände der Strings liefern die Teilcheneigenschaften wie Masse, Ladung und Spin, während die Schwingungsenergie die Teilchenmasse festlegt, und zwar über die Äquivalenz von Masse und Energie. Der Nullpunktschwingung entsprechen die Bosonen (Photon, Gluon, Graviton), den angeregten Moden hingegen das Elektron, das Neutrino und die Quarks. Das Graviton und die skalaren Felder werden durch offene, die restlichen Eichbosonen durch geschlossene Strings dargestellt. Für diese Universalität muss allerdings ein hoher Preis bezahlt werden: Es zeigt sich, dass geeignete Strings nur in einer 10- oder 11-dimensionalen Raumzeit leben können, in der eine Dimension der Zeit und die restlichen 9 oder 10 dem Raum zugeordnet werden. Diese hochdimensionale Raumzeit lässt sich nur dann mit der uns einigermaßen vertrauten vierdimensionalen vereinbaren, wenn man annimmt (oder sich irgendwie *vorstellt*), dass die ‚überschüssigen' Dimensionen aufgerollt sind[48], wodurch sie der Beobachtung verborgen bleiben. Aber das ist kein Grund zur Verzweiflung: Mathematische Objekte, denen man eine gewisse Realität nur im Rahmen einer Interpretation zuordnen kann, sind nichts Neues in der Physik. Physiker/innen sind daran gewöhnt, dass der Formalismus auch *größer* oder umfassender als die Realität sein kann.

Doch selbst wenn man eines Tages die String-Mathematik in den Griff bekommen sollte, es verbleibt ein gravierendes Problem: die experimentelle Überprüfung. Aus diesem Grund darf streng genommen noch nicht von einer *Theorie*, sondern höchstens von einer *Hypothese* gesprochen werden[49]. In der Tat entscheidet erst der experimentelle Nachweis über die *Wissenschaftlichkeit* einer physikalischen Theorie. Dies gilt selbst dann, wenn, wie im Falle der String-Hypothese, sowohl die ursprüngliche Motivation als auch die bisherige Entwicklung nach streng wissenschaftlichen Regeln verliefen.

Auch wenn eine Hypothese auf bereits hinreichend nachgeprüften und konsistenten Konzepten basiert beziehungsweise lauter empirisch überprüfte *Theorien* vereinigt, so kann daraus noch nicht die Richtigkeit dieser Hypothese gefolgert werden! Diese äußerst wichtige Erkenntnis ist genuin philosophischer Art und tangiert mehrere Teilbereiche der Wissenschaftstheorie, unter anderem die wissenschaftliche Erklärung, Induktion und Bestätigung, Kausalität, Reduktion, Emergenz sowie mathematikphilosophische Aspekte.

Auf diesem Hintergrund findet gegenwärtig ein innerphysikalischer Disput zwischen Anhängern und Skeptikern der String-Hypothese statt, dessen Konfliktlinien

Physik und Philosophie gleichermaßen tangieren, und der sich deshalb als stringenter interdisziplinärer Diskussionskontext empfiehlt. Während Kritiker in der String-Hypothese lediglich eine wissenschaftliche Spekulation sehen, die – vornehmlich aus soziologischen Gründen – zu wichtig genommen wird, und durchaus bereit sind, das gesamte Forschungsprogramm als gescheitert anzusehen, wenn die experimentelle Evidenz noch lange auf sich warten lässt, argumentieren Verfechter der Hypothese mit ihrer bereits erwähnten inneren Konsistenz. Vereinfacht ausgedrückt: Eine Hypothese, die aus einer physikalischen Notwendigkeit heraus entstand, auf hinreichend empirisch überprüften Theorien basiert, zu der es derzeit keine besseren Alterativen gibt, und die auch noch mathematisch *schön* ist, hat gute Chancen, sich auch als wahr zu erweisen – wie lange dies auch dauern möge. Oder noch anders ausgedrückt: Der experimentelle Nachweis als hartes Bestätigungs- bzw. Falsifizierungskriterium wird durch eine Art *Metainduktion*, eine weichere Anhäufung von Indizien, ersetzt. Anstatt einer Theorie zu *glauben*, weil sie experimentell, quasi *extern* bewiesen wurde, vertrauen wir auf die Richtigkeit der Hypothese, falls genügend *innertheoretische* Indizien dafür sprechen.

Wie wir im ersten Teil dieses Beitrags gesehen haben, ist dieser Vorgang nicht ohne Präzedenz in der Geschichte der Wissenschaft. In der Antike und der frühen Neuzeit war er sogar die Regel. Erst mit dem Erstarken und Verfeinern der experimentellen Techniken im 19. und 20. Jhd. konnte sich der experimentelle Nachweis als wichtigstes Kriterium für die Wissenschaftlichkeit eines Paradigmas etablieren. Vor einer Aufweichung der Standards sei aber gewarnt.

Eine positive Folge solcher Diskussionen könnte durchaus eine Annäherung von Physikern und Philosophen sein, sofern diese Chance echter Interdisziplinarität durch die Arbeit an einer gemeinsamen Problemstellung umgesetzt wird. An sich wird von beiden Seiten ein kohärentes und vor allem zeitgemäßes Narrativ der Physik verlangt. Dieses ist sowohl auf der kleinen Skala der Teilcommunities[50], als auch für die Physik als Gesamtsystem notwendig, wie man folgenden Ausführungen der Physiker John Ellis und Joe Silk entnehmen kann:

> "This year *(2014, Anm. d. A.)*, debates in physics circles took a worrying turn. Faced with difficulties in applying fundamental theories to the observed Universe, some researchers called for a change in how theoretical physics is done. They began to argue — explicitly — that if a theory is sufficiently elegant and explanatory, it need not be tested experimentally, breaking with centuries of philosophical tradition of defining scientific knowledge as empirical. We disagree. As the philosopher of science Karl Popper argued: a theory must be falsifiable to be scientific.

> Chief among the 'elegance will suffice' advocates are some string theorists. [...] What to do about it? Physicists, philosophers and other scientists should hammer out a new narrative for the scientific method that can deal with the scope of modern physics. In our view, the issue boils down to clarifying one question: what potential observational or experimental evidence is there that would persuade you that the theory is wrong and lead you to abandoning it? If there is none, it is not a scientific theory. Such a case must be made in formal philosophical terms. A conference should be convened next year to take the first steps. People from both sides of the testability debate must be involved."[51]

Die Kontroversen um die String-Hypothese offenbaren ein weiteres grundlegendes Problem der wissenschaftlichen Wissensgewinnung: Inwieweit kann davon ausgegangen werden, dass eine aus mathematischen, erklärungsnotwendigen oder empirischen Gründen abgeleitete Hypothese tatsächlich gerechtfertigt ist? Anders gefragt: Handelt es sich beim neuen Erkenntnisstück oder der neuen Leitidee um das *richtige* Puzzleteil respektive den *wahren* konzeptuellen Rahmen, oder wird vielmehr ein falsches Stück gleichsam ‚mit Gewalt' hineingeschoben und irgendwie passend gemacht, wodurch nicht nur das lokale Muster, sondern sogar die Statik der Gesamtstruktur auf fatale Weise verändert wird? Die Physik stellt, wie andere Wissenschaften auch, im Rahmen ihrer Modelle, Theorien oder Gesetzesaussagen eine Fülle von Behauptungen auf, welche über den Bereich der konkreten Beobachtung hinausgehen, ja, dies geradezu leisten müssen. Anfänglich als denknotwendig erscheinende *lokale* Vorstellungen entwickeln eine Art Eigenleben, wenn sie auf einen größeren Geltungsbereich verallgemeinert werden. Doch darf man diesen Schritt tun? Lässt sich der Allgemeinheitsanspruch der Aussagen überhaupt rechtfertigen und vor allem: Welche Einschränkungen müssen dabei berücksichtigt werden? Das Problem ist nicht trivial: Eine Hypothese wird angesichts widersprechender Beobachtungen verworfen, doch wie soll man im Nebel mehrerer gleichermaßen attraktiv erscheinender, aber unbestätigter Erklärungspfade erfolgreich navigieren? Auch hier kann die Philosophie unterstützend eingreifen und der Physik gute Dienste erweisen. Dies soll im Folgenden erörtert werden.

Für Physiker/innen ist die Problemstellung der Hypothesenauswahl aktueller denn je: Bei der eingangs erwähnten Dunklen Materie und Energie handelt es sich um noch unbewiesene ad-hoc Annahmen. Die Annahme Dunkler Materie wird benötigt, um das Massedefizit im Universum zu erklären. Ihr Steckbrief ist kurz: sie macht gut 20% der Gesamtdichte des Universums aus, nimmt aber nicht an der elektromagnetischen und starken Wechselwirkung teil und ist deshalb nur indirekt nachzuweisen. Erste Hinweise darauf gab es in den Dreißigerjahren (Fritz Zwicky, 1933), gefolgt von der indirekten experimentellen Bestätigung durch Messungen an

Rotationskurven von Spiralgalaxien durch Vera Rubin Anfang der Siebzigerjahre. Da sich ihre Wirkung auch in Beobachtungen des Gravitationslinseneffekts erklärend integrieren lässt, scheint es sich dabei um eine plausible Hypothese zu handeln. Doch woraus besteht Dunkle Materie? Die uns bekannte nichtleuchtende baryonische[52] Materie konnte ausgeschlossen werden; als mögliche nicht-baryonische Kandidaten zählten anfänglich die heiße (hochrelativistische), die warme (relativistische) und die kalte (nicht-relativistische) Dunkle Materie. Bei den ersteren ergeben sich aber in der näheren Betrachtung gravierende Probleme aufgrund der hohen Geschwindigkeiten, so dass inzwischen nur die kalte Dunkle Materie als aussichtsreich gilt. Diese ist langsam genug, um Anhäufungen und die damit verbundenen Potenzialtöpfe zu bilden, eignet sich als Erklärung für die beobachteten akustischen Oszillationen im Cosmic Microvawe Background (CMB) Spektrum und ist somit mit den gängigen Modellen zur Galaxienbildung vereinbar, wobei andere Kandidaten weiterhin denkbar verbleiben. Inzwischen gibt es mehrere konsistente und extrem aufwändige Simulationen der Verteilung Dunkler Materie im Universum. Diese Visualisierungen offenbaren eine Filamentstruktur und passen sehr gut zur geltenden Vorstellung eines *Negativs* oder einer *Matrix* der sichtbaren Materieverteilung. Ob die Simulationen Dunkler Materie belastbar sind und eine echte Beweiskraft entfalten, oder ob in die – immerhin menschengemachten – Programmierung der Berechnungen bereits so viele Vorabvorstellungen der Forscher einfließen, dass lediglich ein im Grunde genommen *zu erwartendes* Ergebnis erzielt werden konnte, verbleibt eine hochaktuelle Frage, welche an dieser Stelle nicht erörtert werden kann.

Ähnlich verhält es sich mit der Annahme der Dunklen Energie: Diese vertritt gut 70% der Gesamtdichte des Universums und wurde eingeführt, um die seltsame Beobachtung in den Griff zu bekommen, dass sich das All offenbar nicht nur kontinuierlich vergrößert, sondern dass diese Expansion immer schneller, also beschleunigt erfolgt. Übereinstimmende diesbezügliche Beobachtungen an Supernovae von Riess und Schmidt, sowie von Perlmutter wurden bereits 1998 veröffentlicht. Eine echte physikalische Erklärung steht aber, fast zwanzig Jahre später, noch aus, erstens weil manche Hypothesen (wie jene einer inhomogenen Raumzeit-Struktur oder einer grob asymmetrischen Materieverteilung) inzwischen verworfen werden mussten, und zweitens weil die bisher nicht widerlegte Dunkle Energie, welche der Gravitation entgegenwirkt und somit den für die beschleunigte Expansion denknotwendigen *negativen Druck* ausübt, über das Stadium einer Hypothese nicht hinauskommt. Es wird angenommen, dass sie sehr homogen ist und von geringer Dichte. Die derzeit diskutierten zwei Modelle basieren auf der von Einstein eingeführten *kosmologischen Konstante* beziehungsweise auf der sogenannten *Quintessenz*. Der Reiz des ersten Ansatzes liegt in der Möglichkeit, die Kosmologie

und die Quantenmechanik zu verbinden. Im Kern geht man davon aus, dass es eine Vakuumenergie als intrinsische Eigenschaft des Raumes gibt (the cost of having space), was mit der quantenmechanischen Vorstellung des leeren Raumes als Schauplatz von Vakuumfluktuationen korrespondiert. Virtuelle Teilchenpaare werden dabei erzeugt und vernichtet; diese, in der klassischen Physik nicht existierende Energie des leeren Raumes bleibt zeitlich konstant und führt durchaus zum beobachteten negativen Druck. Leider liegt der berechnete Wert derzeit bei 120 Größenordnungen über den Vermessenen, weshalb dem Ansatz ein Anwendungserfolg noch versagt bleibt.

Dennoch ist dieser Kandidat aussichtsreicher als der zweite erwähnte Ansatz, jener der Quintessenz: Dabei geht man davon aus, dass die Dunkle Energie von einem Kraftfeld verursacht wird, dessen Minimum der potentiellen Energie auf willkürliche Weise so niedrig gesetzt wird, dass nur eine kleine – eben zu den Beobachtungen passende – Menge Dunkler Materie im Universum verteilt wäre. Die Quintessenz kann man sich als örtlich und zeitlich variables skalares Feld vorstellen, aus mathematischer Sicht einem Fluid mit veränderlicher Schallgeschwindigkeit äquivalent. Sie hat den Vorteil, die geringe Energiedichte der Dunklen Materie erklären zu können, verbleibt als Ansatz aber deswegen labil, weil man keine Sicherheit hätte, dass dieses Feld konstant bliebe oder dass es in der Vergangenheit konstant war. Nimmt es ab, dann würde das Universum seine Expansion stoppen und in sich zusammenfallen (Big Crunch). Nähme das Feld hingegen zu, dann gälte das sogenannte Big Rip-Szenario, bei dem das Universum von der immer stärker werdenden Dunklen Energie auseinandergerissen würde. Aus diesen Gründen gilt die kosmologische Konstante als bevorzugter Ansatz. Eine weitere Schwierigkeit tritt jedoch auf den Plan: Um das bereits erwähnte Problem der Größenordnungen zu „lösen", schlug der Physiker Steven Weinberg vor, den Wert der kosmologischen Konstante nicht gleichsam als *vorgegeben* zu betrachten, sondern als nur einen der in einer Vielzahl von Universen mit unterschiedlichen Vakuumenergien möglichen Werte. Es ist nicht leicht, den Wert dieser Relativierung einzuschätzen. Einerseits überwindet sie ein vorher als intrinsisch erscheinendes Dilemma und eröffnet somit eine neue Perspektive: Auch wenn es eine Fülle von Universen geben mag, so leben wir in jenem mit der genau *passenden* kosmologischen Konstante. Andererseits findet hierin das Anthropische Prinzip Anwendung, demzufolge, vereinfacht ausgedrückt, das Universum für uns da ist, weil es uns so hervorgebracht hat, damit wir es beobachten und eines Tages auch umfassend erklären können. Die guten Resultate unserer Erkenntnisanstrengungen sind mitnichten überraschend. Für einen lesenswerten Überblick zu den Varianten des Anthropischen Prinzips und deren heutigen Akzeptanz in der Kosmologie verweise ich auf ein Interview mit dem Physiker und ehemaligen Astronauten Ulrich Walter[53], aus dem folgendes Zitat stammt:

„Prinzipiell unterscheidet die Astrophysik zwischen drei Varianten des Anthropischen Prinzips:

1. Das schwache Anthropische Prinzip (R. H. Dicke 1957): Die Aussage des schwachen Anthropischen Prinzips (weak anthropic principle = WAP) basiert auf einem logisch selbstverständlichen Zusammenhang: Weil es in diesem Universum Beobachter gibt, muss die Entwicklung des Universums die Existenz dieser Beobachter zulassen. Die beobachtbaren Werte der Naturkonstanten und die aus ihren Wirkungen erschließbaren kosmischen Anfangsbedingungen ‚unseres' Universums entsprachen gerade den Erfordernissen, welche für die Vorbedingungen biologischer Evolution intelligenten Lebens notwendig sind.

2. Das starke Anthropische Prinzip (B. Carter 1974): Wesentlich spekulativer ist die Formulierung des starken Anthropischen Prinzips, das dem Universum einen Zielrichtungsmechanismus zuschreibt: ‚Das Universum muss die Eigenschaften haben, die es ermöglichen, dass sich im Laufe der kosmischen Evolution Leben entwickeln kann.' Das Universum musste zu einem bestimmten Zeitpunkt seiner Geschichte Bedingungen hervorbringen, welche die Entwicklung von Leben gestatteten.

3. Das finale Anthropische Prinzip (P. Dirac 1961). Es besagt, dass intelligente Informationsverarbeitung, auf die in dieser Variante das Leben reduziert wird, irgendwann im Universum in Erscheinung treten muss und danach niemals wieder aussterben kann. Dieses ‚Postulat des ewigen Lebens' ist an eine spezielle kosmologische Entwicklung geknüpft, die von J.D. Barrow und F.J. Tipler (1986) näher untersucht wurde."

Wegen der tatsächlichen Unerklärbarkeit Dunkler Energie bleibt ein weiterer konkurrierender Erklärungsansatz im Rennen, der besagt, dass man keine Dunkle Energie bräuchte, wenn man nur die Gravitation richtig verstünde. Die Lösung läge somit in einer für die Vorgänge auf großen Skalen adäquaten Theorie der Gravitation, welche über die Newton'sche hinausginge. Damit sähe die heutige Physik einer ähnlichen Entwicklung entgegen, wie jene der Quantentheorie Anfang des 20. Jahrhunderts: Damals gab es auf dem Wissenshintergrund der klassischen Physik nicht erklärbare experimentelle Beobachtungen. Sowohl für die Schwarzkörperstrahlung als auch für andere Phänomene wurden zwar im Laufe der Zeit verschiedene Lösungsansätze mit beschränkten Gültigkeitsbereichen präsentiert und aus pragmatischen Gründen teilweise akzeptiert. Doch eine umfassende Erklärung gelang erst mit der Formulierung der Quantenhypothese und deren experimentellem Erfolg, respektive der sich nach und nach herausgebildeten mathematischen Form. Aus physikalischer Sicht wäre eine geeignete Erweiterung der

Newton'schen Theorie zur Erklärung der Materieverteilung im Universum die ideale Lösung, denn sie dürfte mit den wenigsten Zusatzannahmen auskommen und die *alten* Theorien in sich tragen.

Wie man obigen Ausführungen entnehmen kann, ist in der menschengemachten Wissenschaft die Gefahr von logischen Tautologien[54] stets nahe. Die Beispiele von Erklärungsansätzen zur Beschaffenheit unseres Universums gestatten es nachzuvollziehen, weshalb die Generierung und Bestätigung von Hypothesen für die Entwicklung einer Wissenschaft eine wesentliche Rolle spielen. Als potenzielle Lösungen eines bestimmten Problems mögen mehrere Ansätze in Erwägung gezogen werden, doch wie ist zu bestimmen, welcher der beste ist, und wie kann man seinen potenziellen Erfolg einschätzen, falls eine experimentelle Überprüfung noch außer Reichweite liegt? An dieser Stelle offenbart sich eine weitere Schnittmenge von Physik und Philosophie: Die Wissenschaftlichkeit von Methoden und die damit verbundenen legitimen Arten logischer Schlussfolgerungen sind sowohl aktuelle Fragestellungen der Physik als auch traditionelle Themen der Wissenschaftstheorie. Letztere beginnt fast immer beim klassischen Induktionsproblem, zuerst aufgeworfen von David Hume[55]. In seinem 1748 erschienenen Traktat *„Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand"*[56] hält er fest:

> „Alle Gegenstände der menschlichen Vernunft oder Forschung lassen sich naturgemäß in zwei Arten einteilen, nämlich in Beziehungen zwischen Ideen und Tatsachen. Von der ersten Art sind die Wissenschaften der Geometrie, Algebra und Arithmetik; und jede Behauptung von entweder intuitiver oder demonstrativer Gewissheit. [...] Sätze dieser Art sind durch die reine Tätigkeit des Denkens zu entdecken, ohne von irgendeinem Dasein im Universum abhängig zu sein. Wenn es auch niemals einen Kreis oder ein Dreieck in der Natur gegeben hätte, so würden doch die von Euklid demonstrierten Wahrheiten für immer ihre Gewissheit und Evidenz behalten. Tatsachen... sind nicht in gleicher Weise als gewiss verbürgt; ebensowenig ist unsere Evidenz von ihrer Wahrheit, wenn auch noch so stark, von der gleichen Art wie bei der vorhergehenden. Das Gegenteil einer Tatsache bleibt immer möglich."

Hume stellte auf prägnante Weise heraus, dass man aus der Summe aller Erfahrungen und Überzeugungen keine Schlüsse über die noch nicht beobachteten Fälle ziehen darf. Die „Gewissheit", die Sonne werde auch morgen und in aller Zukunft aufgehen, bloß weil sie heute und an jedem vorherigen Tag genau dies tat, ist rein subjektiv. Denn wenn man diese, quasi in die Zukunft greifende aufzählende Induktion durch den Erfolg der vorherigen, sich auf die Vergangenheit beziehenden Induktionsschlüsse zu rechtfertigen versuchte, dann würde man dadurch wie-

derum einen Induktionsschluss vollziehen. Der Schluss vom vergangenen Erfolg des induktiven Schließens auf den Erfolg des Zukünftigen wäre indessen selbst eine aufzählende Induktion, deren Korrektheit man gerade beweisen möchte; somit läge einer der weiter oben bereits vorgestellten Zirkelschlüsse vor, bei denen die Konklusion aus Prämissen abgeleitet werden, deren Gültigkeit nicht gesichert ist oder von der Konklusion selbst abhängen. Bei unserer Art, Schlüsse zu ziehen, spielen psychologische Faktoren eine große Rolle. Wie Jacob Rosenthal anmerkt:

> „Dass wir die Konklusionen typischer induktiver Schlüsse als wahrscheinlich oder sogar sicher wahr behandeln, wird von Hume weder bestritten, noch kritisiert. Er beharrt nur darauf, dass diese subjektive Gewissheit oder Wahrscheinlichkeit das Produkt der Gewöhnung und nicht rational begründbar ist."[57]

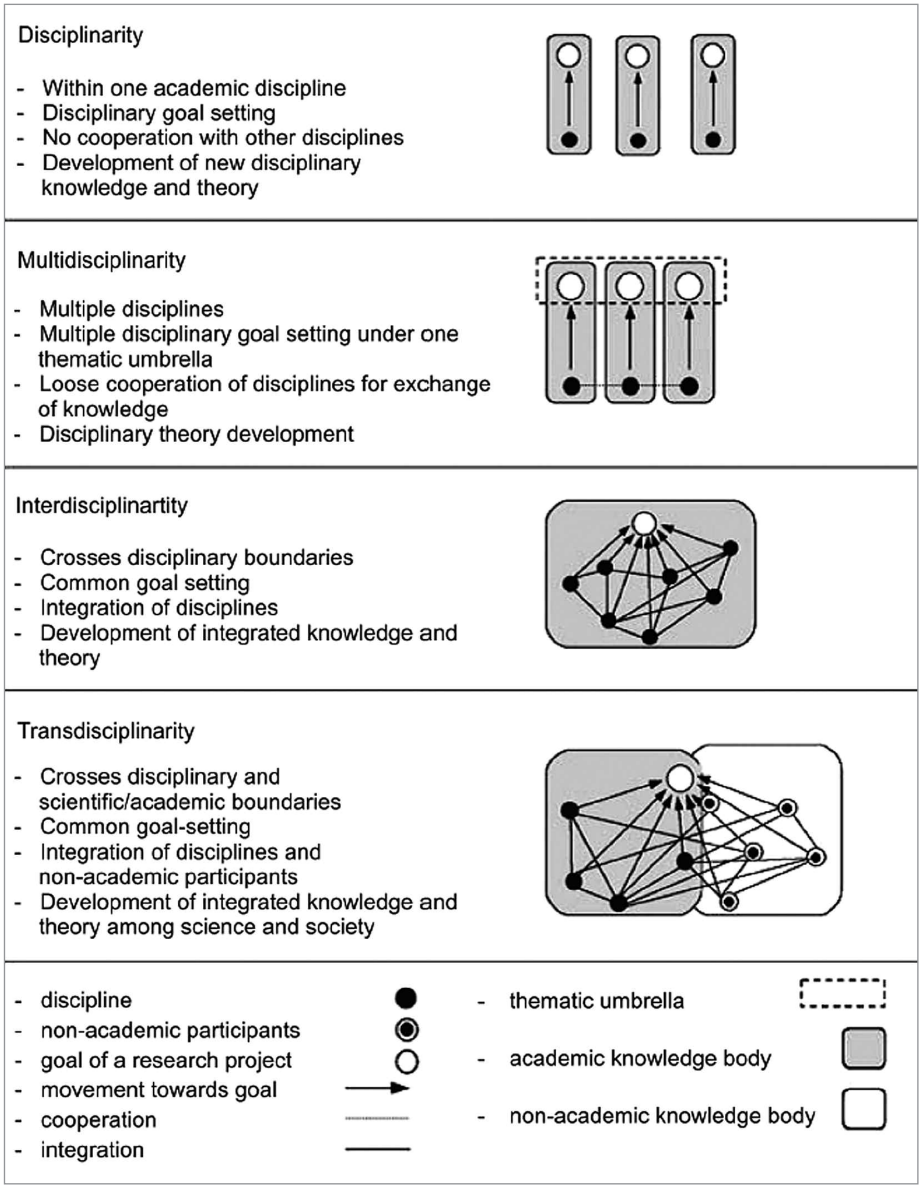
Eine Analyse des Induktions- und des damit zusammenhängenden Bestätigungsproblems würde an dieser Stelle den Rahmen sprengen, weshalb nur die wesentlichen Grundzüge Erwähnung finden sollen: Es ist in der Tat möglich, Hypothesen, welche ja den Status von Allaussagen beanspruchen, auf ihren wahrheitserweiternden Gehalt hin zu überprüfen und zu entscheiden, ob sie gesichertes Wissen darstellen oder ob ihnen durch Beobachtungen eine gewisse Wahrscheinlichkeit zukommt beziehungsweise – im ungünstigsten Fall – ob sie nicht über den spekulativen Status hinauskommen. Am bekanntesten in Physikerkreisen ist die inzwischen etwas angejahrte hypothetisch-deduktive Methode nach Karl Popper[58]. Dieser zufolge können Hypothesen nicht verifiziert, sondern nur falsifiziert werden, indem sie mit bestimmten Beobachtungen in Konflikt stehen. Ein induktives Element ist auch hier vorhanden, denn eine in der Vergangenheit widerlegte Theorie wird auch in der Zukunft in vergleichbaren Situationen scheitern.

Stark im Kommen, vor allem in den rasant wachsenden empirisch-informatischen Disziplinen wie den Neurowissenschaften, in denen man zwangsläufig sowohl auf der realen als auch auf der Repräsentationsebene mit einer Fülle von Modellen operiert, deren Güte keineswegs sicher ist, sondern erst abgeschätzt werden muss, ist eine subjektive Bestätigungstheorie, der Bayesianismus, benannt nach ihrem Urheber, dem englischen Geistlichen Thomas Bayes[59]. Man geht darin der Frage nach, wie stark eine Hypothese durch bestimmte Evidenzen gestützt wird. Da Glaubensgrade von rationalen Personen den Axiomen der Wahrscheinlichkeitstheorie genügen, und die numerischen Werte der Glaubensgrade sich wie mathematische Wahrscheinlichkeiten verhalten, lassen sich die Wahrscheinlichkeiten als Grade persönlicher Überzeugungen auffassen. Wesentlich ist dabei der Begriff der *bedingten Wahrscheinlichkeit*, welcher einen realen Ansatz für die Veränderung von Wahrscheinlichkeiten angesichts neuer Informationen darstellt: Eine neue

Wahrscheinlichkeit kann durch Konditionalisierung auf Grund neu gewonnener Information berechnet werden. Tatsächlich kann man so eine Konvergenz der Hypothesenwahrscheinlichkeit erreichen. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies: Obwohl die Startwahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Hypothesen rein subjektiver Natur sind, nimmt ihr Einfluss auf die jeweils aktuellen Wahrscheinlichkeiten mit zunehmender Evidenz ab und wird im Grenzfall Null, was in formaler Hinsicht einer gewissen Objektivität entspricht.

Die vorgestellten offenen Fragen lassen also im Sinne einer Wiederannäherung von Physik und Philosophie durchaus hoffen. Doch wie kann es konkret weitergehen? Wie soll das u.a. von Ellis und Silk geforderte neue Narrativ der Physik entstehen? Ein neues Narrativ verlangt nach einer Synthese, nach einer Verschmelzung beider Fachsprachen zu einem neuen, mächtigeren Vokabular. Dies ist ein komplexes Vorhaben. Wie die Interdisziplinaritäts-Forschung zeigt, muss dafür die eigene disziplinäre Komfortzone zugunsten eines Austausches über Fachgrenzen hinweg verlassen werden. Ein bloßes Nebeneinander einzelner Disziplinen reicht nicht aus. Es liegt auf der Hand, dass dafür ein eigener *Rahmen* zur Verfügung stehen muss, in dem man sich unvoreingenommen und ohne vorherige Prägung auf andere Zugänge und Denkansätze einlassen kann. Damit einen neue Sprache entsteht, muss man insbesondere miteinander sprechen *wollen*. Die Früchte echter Interdisziplinarität lassen sich erst am Ende eines mühsamen Weges ernten. Aus den inzwischen zahlreichen vorliegenden Beiträgen zu dieser Thematik soll hier eine Grafik gezeigt werden[60], welche die substantiellen Unterschiede zwischen der fachlichen Monokultur (disciplinarity) oder dem bloßen Nebeneinander der Fächer (multidisciplinarity) auf der einen Seite und der Inter- und Transdisziplinarität auf der anderen zusammenfasst.

Eine Chance für die Wiederannährung von Physik und Philosophie liegt meines Erachtens darin, die angehenden Physiker/innen bereits während der Ausbildung mit systematischen philosophischen Kenntnissen zu wappnen, so dass eine reflektierende Haltung fast automatisch angenommen werden kann. Ein weiterer sehr großer Vorteil der Aufnahme physikphilosophischer Inhalte ins Physikstudium wäre das Kennenlernen der geisteswissenschaftlichen Fach- und Diskussionskultur. Dies würde sowohl den allgemeinen Bildungsstand verbessern als auch den Erwerb außerfachlicher Kompetenzen ermöglichen. Die positiven Auswirkungen einer auf diese Weise erweiterten Perspektive auf das spätere Berufsleben, ganz gleich wo dieses stattfinden wird, sind an anderer Stelle bereits ausführlich dargelegt worden. Das Berufsleben hält Anforderungen parat, auf welche ein reines Fachstudium kaum vorbereitet, u.a. zunehmende Komplexität, technologische, soziale, kulturelle und wirtschaftliche Veränderung, Kommunikation über disziplinäre Grenzen hinweg,



untypische Karrierewege und die Fähigkeit, die eigene Karriere aktiv und kreativ zu planen. Deshalb plädiere ich für eine Aufnahme philosophischer Inhalte ins Physikstudium. Umgekehrt sollten angehende Philosophen/innen solide Kenntnisse der Mathematik und Naturwissenschaften erwerben. Denkbar ist ein konsekutives Modell, bei dem im Bachelorstudiengang allgemeine Grundlagen der Wissenschaftstheorie und Logik vermittelt werden. Darauf aufbauend könnten im

Masterstudiengang, wenn die notwendigen Fachkenntnisse vorliegen, konkrete physikphilosophische Problemstellungen adressiert werden.

3. Schlussbetrachtung

Ziel dieses Beitrags war es, die gegenwärtige Entfremdung von Physik und Philosophie sowohl nach historischen Gesichtspunkten als auch anhand aktueller Problemstellungen darzulegen. In Ermangelung gegenseitiger Sachkenntnis und ständiger Diskussionskontexte findet der Dialog nur punktuell statt. Ferner wird er durch ungünstige akademische Rahmenbedingungen erschwert. Doch es gibt Hoffnung: Die Physik ist ein offenes und dynamisches System, ihr Fortschritt (auch) ein kulturgeschichtlicher Prozess. Deshalb genügt es kaum, sich nur auf die inneren Begebenheiten der Disziplin zu konzentrieren. Vielmehr hilft eine durch konkrete Zusammenarbeit mit der Philosophie hinzugewonnene fachübergreifende Perspektive dabei, das Wesen der Physik, ihre Probleme und ihren gesellschaftlichen Stellenwert zu verstehen. Weder die Kontroversen über die Wissenschaftlichkeit neuer physikalischer Ansätze, noch die Diskussionen über die Gültigkeit eines bestimmten Paradigmas lassen sich innerhalb der Physik selbst entscheiden. Darüber hinaus wurde hier die herausragende Rolle der Mathematik im physikalischen Erkenntnisprozess deutlich, auch wenn diese aus Platzgründen einer systematischen Behandlung nicht in der Tiefe unterzogen werden konnte, die sie eigentlich verdient hätte. Wie eingangs angemerkt, darf in einer umfassenden Betrachtung die Mathematik nicht fehlen, denn sie eröffnet eine zusätzliche Dimension des interdisziplinären Dialogs von Physik und Philosophie. Im Wesentlichen geht es dabei darum, ob die Mathematik der Welt zugrunde liegt oder ob sie vom erkennenden Menschen gleichsam hineinpraktiziert wird. Vielleicht wird diese Frage niemals endgültig beantwortet werden. Dennoch ist es sinnvoll, sich mit Fragestellungen dieser Art zu beschäftigen, um sich über die Leistungsfähigkeit der wissenschaftlichen Methode und deren erkenntnistheoretischen Wert bestmögliche Klarheit zu verschaffen. Wie Max Planck in seinem berühmten Vortrag „Positivismus und reale Außenwelt“[61] anmerkte:

> „Die beiden Sätze *‚Es gibt eine reale, von uns unabhängige Außenwelt‘* und *‚Die reale Außenwelt ist nicht unmittelbar erkennbar‘* bilden zusammen den Angelpunkt der ganzen physikalischen Wissenschaft. Sie stehen aber in einem gewissen Gegensatz zueinander und legen damit zugleich das irrationale Element bloß, welches der Physik ebenso wie jeder anderen Wissenschaft anhaftet und welches sich dahin auswirkt, dass eine Wissenschaft ihre Aufgabe niemals vollständig zu lösen imstande ist. [...] Die Arbeit der Wissenschaft stellt sich uns also

dar als ein unablässiges Ringen nach einem Ziel, welches niemals erreicht werden wird und grundsätzlich niemals erreicht werden kann. Denn das Ziel ist metaphysischer Art, es liegt hinter jeglicher Erfahrung."

Danksagung: Die Autorin dankt Prof. Walter Strunz (Fachrichtung Physik, TU Dresden) sowie ihrem philosophischen Mitdozenten und Mitstreiter PD Dr. Uwe Scheffler für wertvolle Hinweise und anregende Diskussionen.

Literaturempfehlungen:

1. *Wissenschaftstheorie – ein Studienbuch* von Andreas Bartels und Manfred Stöckler [Hrsg.], Mentis 2009.

2. *Einführung in die Naturphilosophie* von Michael Esfeld, WGB 2011.

3. *Philosophie der Quantenphysik* von Cord Friebe [Hrsg.] Springer 2015.

4. *Philosophie der Physik* von Michael Esfeld [Hrsg.] Suhrkamp 2012.

5. *Grundriss Wissenschaftphilosophie – die Philosophien der Einzelwissenschaften* von Simon Lohse und Thomas Reydon [Hrsg.] 2017.

6. *Towards a Theory of Spacetime Theories* von Dennis Lehmkuhl, Gregor Schiemann und Erhard Scholz [Editors], Birkhäuser 2017.

7. *Physical Theory – Method and Interpretation* von Lawrence Sklar [Editor], Oxford University Press 2014.

8. *Kulturgeschichte der Physik – von den Anfängen bis heute* von Kàroly Simonyi, Harri Deutsch 2004.

9. *6000 Jahre Mathematik – eine kulturgeschichtliche Zeitreise* von Hans Wußing, Springer 2008.

10. *Philosophie der Physik – eine Einführung* von Norman Sieroka, C.H. Beck 2014.

Erläuterungen:

[1] Für eine wunderbar klare und strukturierte Darstellung zur Stellung der Physik unter den Einzelwissenschaften und von aktuellen physikphilosophischen Fragen siehe Michael Esfeld: Einführung in die Naturphilosophie, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 2001 (aktualisierte Auflage 2011).

[2] An dieser Stelle wurde die NASA-Grafik verwendet. Die Darstellung findet man in verschiedenen Varianten, bei denen nicht nur die Farbgebung variiert, sondern

auch die Zahlenwerte. Diese können sich – je nach Kalkulation – geringfügig unterscheiden.

[3] Einem Bonmot zufolge beginnt und endet die Philosophie mit Staunen – dazwischen lernt man, wie man staunt.

[4] 384 – 322 v.Chr.

[5] Daraus ging das Wort *Metaphysik* hervor, heute ein grundlegendes Gebiet der Philosophie bezeichnend. Objekt der Metaphysik sind empirischen Untersuchungen nicht direkt zugängliche Bereiche der Wirklichkeit, eben die Welt hinter den Dingen. Eine metaphysische Hypothese in der Quantenphysik wären die berühmten *verborgenen Variablen*, in der Kosmologie die sog. *Dunkle Materie* resp. *Dunkle Energie*.

[6] 427 – 347 v.Chr.

[7] Was primär am ehemals obligatorischen Philosophieunterricht lag. Dessen Anfänge verlieren sich im Nebel der Geschichte; Philosophische Schulen entstehen in der Antike, u.a. in Form der Platonischen Akademie. Im Mittelalter wurde Philosophie in Klosterschulen unterrichtet. Seit der Einführung des modernen Gymnasiums in deutschsprachigen Ländern im 19. Jhd. wird das Fach Philosophie vorwiegend nicht-obligatorisch unterrichtet (Wahlpflichtbereich) oder als integriertes philosophisch-religiöses-weltanschauliches Bildungsfach *Ethik*. Die relevanten wissenschaftstheoretischen Kenntnisse können in diesem allgemeinen Rahmen kaum vermittelt werden.

[8] Diese sogenannte *mereologische* Erklärungsstrategie wird erstmalig in Platons Parmenides-Dialog verortet, in dem Parmenides und Sokrates sich über argumentative Strickfallen austauschen. Das Wort stammt vom griechischen meros (Teil).

[9] Dieses antike Wissen überlebte und entwickelte sich im arabischen Kulturraum. In Europa wurde es erst sichtbar, als man arabische Werke ins Lateinische übertrug. Die intellektuelle Blüte des Abendlandes wurde faktisch erst 1085 eingeleitet, als die Stadt Toledo mitsamt ihrer Bibliothek durch die Christen zurückerobert wurde. Kirchengelehrte wie Gerhard von Cremona übertrugen viele berühmte Werke ins Lateinische. Bekannt ist z.B., dass Wilhelm von Moerbecke, ein Vertrauter Thomas von Aquins, Archimedes ins Lateinische übertrug. Die Reconquista endete erst 1492 mit dem Untergang Granadas. Das zweifelsohne prägendste Werk zur Geometrie waren die Schriften Euklids: die *Darlegung des Eukleides* von Nasir ad-Din at-Tusi erschien erst 1594 in Rom!

[10] Die sog. Frühe Neuzeit, welcher auch Kepler, Galilei, Newton und Leibniz zugerechnet werden.

[11] 1596 – 1650. Geistesgeschichtlich ungefähr zwischen Galilei (1564 – 1642) und Newton (1643 – 1727) einzuordnen.

[12] Titel der französischen Originalausgabe: „Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la verité dans les sciences". Eine lateinische Übersetzung wurde 1656 in Amsterdam gedruckt. Descartes hat sich aus politischen Gründen nicht getraut, sein ganzes Werk publik zu machen. Er ging 1626 in die Emigration nach Schweden, wo er allerdings weder das raue Klima noch das strenge Zeitmanagement seiner Herrin, der Königin Kristina, vertrug und an einer Lungenentzündung starb. Anderen Meinungen zufolge war Arsenvergiftung im Spiel.

[13] Die modernen Gehirn- und Lebenswissenschaften arbeiten gegenwärtig an der Aufhebung dieses vermeintlichen Wesensunterschieds, indem sie die biologisch-materiellen und damit physikalischen Grundlagen des Bewusstseins freizulegen versuchen.

[14] Descartes Versuche, den Glauben an Gott anhand eines kausal-analytischen Schemas zu rationalisieren sind als ontologischer bzw. ideentheoretischer Gottesbeweis bekannt und in seinen *Meditationen* nachzulesen.

[15] 1646 – 1716.

[16] 1643 – 1727.

[17] ca. 1232 – 1316.

[18] Für eine packende und detaillierte Übersicht siehe die wundervolle Abhandlung: Hans Wußing, „6000 Jahre Mathematik", Springer 2008, auf welche sich diese Darstellung bezieht.

[19] Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, veröffentlicht am 5. Juli 1687.

[20] Berühmt ist der Leibniz-Ausdruck *die beste aller möglichen Welten ist mathematisch* als Essenz der gleichsam mathematischen Vorgehensweise Gottes bei der Erschaffung der Welt zu verstehen.

[21] Specimen Dynamicum, erschienen 1695.

[22] Mircea Eliade, Schmiede und Alchemisten – Mythos und Magie der Machbarkeit, Herder 1992.

[23] Philosopher by Fire.

[24] 1501 – 1576.

[25] 1561 – 1626.

[26] Der am 31. Mai im Jahre 1832 mit nur 21 Jahren an den Folgen eines Duells verstarb.

[27] Evariste Galois gilt als Mitbegründer der Gruppen- und Körpertheorie (1830), auf welcher die moderne abstrakte Algebra ruht. Ein weiterer Grundpfeiler ist die 1871 von Dedekind gegründete Idealtheorie.

[28] Angesichts der ausstehenden empirischen Überprüfung wäre die Bezeichnung String-Hypothese korrekt. Auch in der Physik bürgern sich unpräzise

Bezeichnungen ein, vornehmlich aus historischen Gründen bzw. aus schlichter Gewohnheit. Während die String*theorie* gewohnheitssprachlich eine noch unverdiente Statusaufwertung erfährt, stellt sich die Situation beim sog. Standardmodell der Elementarteilchen umgekehrt dar: Hier wäre die Bezeichnung Theorie angebracht. Auch der Terminus *Gesetz* wird mitunter recht großzügig für Beziehungen zwischen physikalischen Größen vergeben, deren schmaler Geltungsbereich die dadurch suggerierte Universalität nicht erfüllen kann.

[29] Max Planck, *Ursprung und Auswirkung wissenschaftlicher Ideen*, Vortrag gehalten am 17. Februar 1933 im Verein Deutscher Ingenieure, Berlin – In: Wege zur physikalischen Erkenntnis. Reden und Aufsätze, S. Hirzel Leipzig, 1944.

[30] Streng genommen basiert das aktuelle Weltbild auf einem *Wissenskontinuum*.

[31] Selbst ein Stephen Hawking, möglicherweise der letzte wissenschaftliche „Rockstar" nicht, u.a. wegen der mathematischen Abstraktheit und der schwierigen philosophischen Durchdringung seiner Theorien. Jenseits popularisierender Darstellungen: Eine wirkliche Fachdiskussion stellt sich als äußerst komplex heraus, d.h. man muss sich zunächst eine beträchtliche Menge Wissen aneignen, um überhaupt einsteigen zu können.

[32] Mehr Informationen sind auf der Wikipedia-Seite nachzulesen: https://de.wikipedia.org/wiki/Solvay-Konferenz#25._Solvay-Konferenz_f.C3.BCr_Physik_.282011.29.5B4.5D.

[33] Welche Rolle Freundschaften für den Erfolg interdisziplinären Austauschs spielen, wäre eine lohnende Untersuchung.

[34] Zumal in Deutschland, wo, einer eminenten philosophischen Tradition entsagend, viele Philosophie-Institute praktisch handlungsunfähig gespart wurden. An vielen Physikfachrichtungen wiederum sind zur Umsetzung unabwendbarer Sparmaßnahmen oft gerade die als *entbehrlich* eingestuften Themenbereiche wie eben die Philosophie und Geschichte der Physik abgebaut worden.

[35] Welche tendenziell *immer mehr* Aufgaben übernehmen müssen, so dass sie im Dauerzustand der Überlastung agieren.

[36] Die Rubrik Öffentlichkeitsarbeit bzw. Outreach darf praktisch auf keiner Website einer wissenschaftlichen Einrichtung mehr fehlen. Bei physisch, fachlich oder finanziell großen Forschungseinrichtungen wie z.B. CERN werden Aktivitäten dieser Art zentral koordiniert und mit einem beachtlichen Budget ausgestattet.

[37] In Philosophie der Physik, von Michael Esfeld [Hrsg.], Suhrkamp 2012.

[38] Beziehungsweise die darauf beruhende Entwicklung von medizinischen Wirkstoffen.

[39] Dafür müssen verschiedene Skalen berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass die Ausformung von Organismen im Zuge der Zellteilung auf physikalische Prinzipien zurückgeführt werden kann.

[40] Nach Wilhelm von Ockham (1288–1347) benanntes heuristisches Forschungsprinzip aus der Scholastik, dem zufolge bei der Bildung von erklärenden Hypothesen und Theorien höchstmögliche Sparsamkeit angestrebt werden soll. Die Vereinfachung darf jedoch nicht zu weit gehen (vgl. dazu Einsteins Anmerkung, dass man alles so einfach wie möglich darstellen sollte, aber nicht einfacher).

[41] Dies gilt selbst für den 2012 erstmalig erfolgten Nachweis des Higgs-Teilchen, von dem man höchstens behaupten darf, dass mit Hilfe der statistischen Datenanalyse gemessener Energien bestimmte Ereignisse rekonstruiert wurden, welche hinreichend relevante Indizien auf das Vorhandenseins eines Teilchens lieferten, von dem man aus gutem Grund annehmen konnte, dass es, bevor es zerfiel, tatsächlich das vom Brout-Englert-Higgs-Mechanismus prognostizierte Higgs-Boson gewesen war.

[42] Manfred Stöckler: Demokrits Erben. Der Atomismus zwischen Philosophie und Physik, in „Philosophie der Physik" von Michael Esfeld [Hrsg.], Suhrkamp 2012, Seite 153.

[43] Diese Ausgabe einer berühmten Vorlesungsreihe von Werner Heisenberg an der University of Chicago ist in verschiedenen Ausgaben erhältlich, u.a. von Hirzel Verlag, 2008.

[44] Für detaillierte Darstellungen dieser Problematik sei auf die Aufsatzsammlungen „Philosophie der Physik" von Michael Esfeld [Hrsg.], Suhrkamp 2012, und auf das Studienbuch „Wissenschaftstheorie" von Andreas Bartels und Manfred Stöckler, mentis, Paderborn 2009, verwiesen.

[45] Für eine stringente und gut strukturierte Übersicht empfehle ich das Buch „Philosophie der Quantenphysik" mit Beiträgen aktueller deutschsprachiger Physikphilosophen um Cord Friebe [Hrsg.], Springer 2015.

[46] Die Planck-Länge beträgt 1,6 x 10^{-35m}. Die dazugehörigen Energien für Beobachtungen auf der Planck-Skala lägen somit im Bereich von 103kWh. Diese Werte sind zwar grundsätzlich erreichbar, problematisch ist indessen ihre Konzentration auf die gewünschte Planck-Länge. Deshalb sind derzeit nur indirekte Beobachtungen denkbar.

[47] Was als erste Superstringrevolution in die Physikgeschichte einging.

[48] Mathematisch spricht man von einer Kompaktifizierung.

[49] Auch in der Physik bürgern sich manche philosophisch nicht adäquaten Bezeichnungen ein: Das mächtige und experimentell hinreichend untersuchte

Standard*modell* verdient zweifelsohne die Bezeichnung Theorie, während die einer experimentellen Überprüfung harrende String-Theorie eigentlich eine *Hypothese* verbleibt bzw. noch nicht über den Modell-Status hinausgekommen ist.

[50] In der Stringtheorie beispielsweise – der wohl größten Teilgemeinschaft der theoretischen Physik – arbeiten ca. 1.000 Personen weltweit. Doch oft befassen sich nicht einmal Hundert Physiker mit einer bestimmten Problemstellung. Die Diskussionen sind hochspezialisiert; oft man muss sich auf eine weniger technische, deskriptive Ebene begeben, um die Inhalte zu interpretieren. Dies ist aber ein genuin philosophisches Anliegen, und genau hier kann die Philosophie der Physik wertvolle Dienste leisten.

[51] *Defend the integrity of physics – Attempts to exempt speculative theories of the Universe from experimental verification undermine science*, George Ellis and Joe Silk, Nature, 516 (2014).

[52] Als Baryonische Materie wird die aus Atomen aufgebaute Materie bezeichnet, um diese von elektromagnetischer Strahlung, dunkler Materie, und dunkler Energie zu unterscheiden.

[53] https://www.heise.de/tp/features/Der-Raum-ist-selbst-ein-Akteur-des-grossen-Schauspiels-3611890.html.

[54] Unter *Tautologie* versteht man eine Aussage, die aus logischen Gründen immer wahr ist. Im sog. Zirkelschluss wird eine These aus Voraussetzungen abgeleitet, deren Gültigkeit keinesfalls gesichert ist, oder die von der These selbst abhängen. Dadurch bleibt ein echter Erkenntnisgewinn aus.

[55] 1711 – 1776.

[56] An Enquiry Concerning Human Unterstanding.

[57] Jacob Rosenthal, *Induktion und Bestätigung* in Bartels und Stöckler, Wissenschaftstheorie, Mentis 2009.

[58] 1902 – 1994.

[59] 1701 – 1761.

[60] Grafik aus: Tress. G., Tress, B. and Fry, G. (2004) Clarifying Integrative Research Concepts in Landscape Ecology. Landscape Ecology, 20, 479-493. Zitierung nach: Hunt, F. and Thornsbury, S. (2014) Facilitating Transdisciplinary Research in an Evolving Approach to Science. *Open Journal of Social Sciences*, 2, 340-351. doi: 10.4236/jss.2014.24038. Die Autorin dankt Herrn PD Dr. habil. Maik Adomßent für diesen nützlichen Hinweis.

[61] Vortrag gehalten am 12.11.1930 im Harnack-Haus der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften zu Berlin, zitiert aus Max Planck, Vorträge und Erinnerungen, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1983.

Curriculum Vitae

1972	Geboren am 27. August 1972 in Bukarest, Rumänien
1978–1986	8-jährige Allgemeine Schule, Bukarest
1986–1990	Mathematisch-Physikalisches Lyzeum (Bukarest) Bacalaureat (Abitur)
1991	Feststellungsprüfung zur Anerkennung des rumänischen Abiturs am Studienkolleg der Universität Heidelberg Zulassung zum Diplomstudiengang im Fach Physik an der Universität Konstanz
1991–1999	Physikstudium, Universität Konstanz, Abschluss als Diplom-Physikerin, Vordiplom in Mathematik
1999–2005	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachbereich Physik der Universität Konstanz, Doktorandin im Fach Physik, Promotionsabschluss zum Dr. rer. nat. (magna cum laude)
2004	Deutsche Staatsbürgerschaft
2005–2009	Elternzeit
2009–2012	Freiberuflerin in Bayern (Kurse an der VHS, Physik im Kindergarten und Grundschule. Entwicklung und Erprobung eines Projektes zur Einführung einer passenden MINT-Ausbildung bereits in der Grundschule, mit eigens entwickelten Experimenten und Lehrmaterialien)
01/2013 bis heute	wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Fachrichtung Physik der TU Dresden Entwicklung und Implementierung von interdisziplinären Lehrangeboten zur Physikphilosophie im Masterstudiengang Physik (Vorlesung zu den Philosophisch-Historischen Grundlagen der Physik, Hauptseminar zur Physikphilosophie) Lehraufenthalte an der Uni Wien im Rahmen des Erasmus-Dozentenaustauschprogramms Lehrauftrag an der Leuphana-Universität Lüneburg (Sommersemester 2017) Aktuell: Promotionsverfahren in Philosophie, TU Dresden *Forschungsinteressen:* physikalische und philosophische Auffassungen zum Modellbegriff, der Wahrheitsgehalt physikalischer Theorien, das Verhältnis von Physik und Philosophie, insbesondere die Möglichkeiten interdisziplinärer Lehrformate wie Vorlesungen und Seminare

Dr. Irena Doicescu