

Inhalt

Helmut Fink und Rüdiger Vaas

Einleitung: Erfolgreich in Evolution und Erkenntnis	11
Gerhard Vollmer und die Evolution und Einheit des Erkennens	12
Die Beiträge in diesem Buch	16

Helmut Fink

Auf der Suche nach der Objektivität	23
0. Die Frage	23
1. Subjektivität	24
2. Intersubjektivität	25
3. Objektivität	27
4. Physikalische Theoriebildung	29
5. Objekte der Theorie	31
6. Realitätsbezug?	33
7. Ein Fazit	35

Rüdiger Vaas

Die Evolution des Kosmos – Zufall und Notwendigkeit im Multiversum	37
Einzigkeit und Naturgesetze	37
Kosmische Entwicklung	38
Das Paradigma der Physik	39
Verschänkung von Zufall und Notwendigkeit	41
Die Rolle der Randbedingungen	43
Universeller Darwinismus?	44
Variabilität und Erklärbarkeit von Naturgesetzen?	46

Ernst Peter Fischer

Materie und Emergenz – ein wirkungsvolles Duo	53
--	----

Eckart Voland und Hannes Rusch

Im Lichte der Evolution: Kultur	69
Kultur: getrieben von der biologischen Evolution	73
Biologische Evolution: getrieben von der Kultur	75
Im Lichte der Kultur: Evolution	81

Volker Sommer

»Spiegel«-Leser wissen mehr – Reflexionen über Evolutionäre Erkenntnistheorie	87
--	----

Jonas Pöld und Florian Chefai

Das Realismusproblem in der Evolutionären Erkenntnistheorie	93
1. Einleitung	93
2. Evolution und Realismus	94
3. Evolution und Radikaler Konstruktivismus	99
4. Verteidigung des hypothetischen Realismus	102
5. Fazit	107

Ulrich Frey

Die Evolution als Ideengeber für eine systematische Kreativität	109
1. Die Evolution als Problemlöser	109
2. Die Rolle des Zufalls	110
3. Der Lösungsraum	111
4. Lösungsraum und Ideenfindung	116
5. Ideenfindung durch allgemeine Operationen	122

Hartmut Kliemt

KI: Neues Denkzeug oder Evolutionssprung?	125
Einleitung und Übersicht	125
1. KI ist weder ein fundamental neues Denkzeug noch ein Evolutionssprung	127
2. Kontrollierte Entwicklung versus eigengesetzliche Evolution von KI	131
3. AGI und Politik	136

Gerhard Engel

Evolution und Politik – oder: Wie man Türen öffnet	141
Ouvertüre	141
1. Satz: Lebensstil-Risiken	143
2. Satz: Koevolution	144
3. Satz: Verhaltenstrigger	146
4. Satz: »Politische Demografie«	148
Finale	150

Meinard Kuhlmann und Manfred Stöckler

Warum manche Warum-Fragen immer wieder neu beantwortet werden	153
1. Einleitung	153
2. Lösungen des Olbers'schen Paradoxons	153
3. Erklärungen des Zwillingsparadoxons	158
4. Ableitungen des Planck'schen Strahlungsgesetzes	160
5. Fazit	167

Paul Hoyningen-Huene

Die Dynamik der Ignoranz in den Wissenschaften	171
1. Eine Taxonomie der Arten der Ignoranz	173
2. Infektionskrankheiten heute	178
3. Zur Geschichte der Infektionskrankheiten	178
4. Eine tentative Skizze der Ignoranzdynamik in den Wissenschaften	183
5. Konklusion	186

Martin Mahner

Sind die sogenannten »Critical Studies« Kandidaten für Pseudowissenschaften?	191
1. Analytisches ABC	193
2. Warum sind die »Critical Studies« Kandidaten für Pseudowissenschaften?	196
3. Fazit	202

Michael Schmidt-Salomon

Auf Epikurs Schultern – eine kurze Geschichte des Naturalismus	207
Der Zeitgenosse der Zukunft	209
Der späte Triumph des Epikur	213
Ein Blick zurück nach vorn	216

Franz Josef Wetz

Nikolaus Kopernikus – der missverstandene Astronom	219
Im Verständnis der Neuzeit	220
Ausgangspunkt	222
Irritationen	222
Mitte ohne Mitte	224
Fast alles ist gleich	227
Der Traditionalist	230
Fazit	232

Dieter Birnbacher

Evolutionäre Erkenntnistheorie bei Schopenhauer – eine Spurensuche	235
1. Einleitung	235
2. Philosophie und Naturwissenschaft	236
3. Evolutionäres Denken bei Schopenhauer	238
4. Vernunft und Affekt	242
5. Das menschliche Erkenntnisvermögen – evolutionär gesehen	246
6. Hypothetische Naturphilosophie: Induktive Metaphysik	248
7. Schluss	249

Claus-Artur Scheier

Nietzsche und die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts 251

Thomas Sukopp

Gerhard Vollmer als Philosophiedidaktiker – vom Lernen auf Vorrat, einer immer noch nötigen Fragekultur und dem Wert guter Beispiele 267

1. Was können wir vom Hochschullehrer Vollmer lernen? 268

2. Was und warum hat Gerhard Vollmer etwas zur Fachdidaktik der Philosophie beigetragen? 270

3. Vollmers Philosophieverständnis und Erkenntnisse aus metaphilosophischer Perspektive für den Philosophieunterricht an Schulen 272

Anmerkungen 281

Autoren 301

Warum manche Warum-Fragen immer wieder neu beantwortet werden

1. Einleitung

Für Gerhard Vollmer besteht Wissenschaftstheorie schon immer aus mehr als allgemeinen formalen Überlegungen oder logischen Fingerübungen, Wissenschaftstheorie ist vor allem *Wissenschaftstheorie im Einsatz*: Sie setzt sich mit konkreten wissenschaftlichen Entwicklungen auseinander und hilft darüber hinaus, der Öffentlichkeit zu erklären, was Wissenschaft ausmacht. Ein schönes Beispiel für einen solchen Zugang zur Wissenschaftstheorie ist Gerhard Vollmers Aufsatz *Warum wird es nachts dunkel?*. Wir haben uns durch ihn anregen lassen, diese Studie weiterzuführen, sie mit der Geschichte der Erklärungen des Planck'schen Strahlungsgesetzes zu vergleichen und dabei einen Blick auf bisher wenig beachtete Aspekte der Weiterentwicklung und Überprüfung von Theorien zu werfen.

2. Lösungen des Olbers'schen Paradoxons

Beginnen wir mit dem Olbers'schen Paradoxon. Ausgangspunkt dieses Paradoxons ist der Sachverhalt, der schon durch eine einfache Beobachtung als unstrittig erwiesen werden kann: Der Nachthimmel ist dunkel. Plausible Annahmen im Rahmen der klassischen Kosmologie führen jedoch zu der Konklusion, dass der Nachthimmel so hell wie die Sonne sein müsste. Eine Lösung des Olbers'schen Paradoxons muss also im Bündel der jeweils gängigen

kosmologischen Annahmen eine passende Änderung vornehmen, so dass die Dunkelheit dann hergeleitet und in diesem Sinn erklärt werden kann. Gerhard Vollmer schildert in seinem Aufsatz die vielen und durchaus unterschiedlichen Versuche, die Forscher seit dem 17. Jahrhundert zu einer solchen Erklärung der Dunkelheit des Nachthimmels unternommen haben.¹⁸⁶

Die Behauptung eines überall sternhellen Nachthimmels folgt nach dem Verständnis der klassischen Kosmologie aus folgenden Hypothesen, die den meisten Wissenschaftlern vergangener Jahrhunderte als selbstverständlich oder zumindest sehr plausibel erschienen sind:¹⁸⁷

- a. Das Weltall und die Verteilung der kosmischen Materie ist räumlich unendlich.
- b. Das Universum ist unendlich alt.
- c. Das Weltall ist homogen (Kosmologisches Prinzip), es ist insbesondere gleichmäßig mit Sternen besetzt. Die mittlere Sternendichte ist zeitlich konstant (statisches Universum).
- d. Die physikalischen Gesetze, insbesondere die der Strahlung, gelten universell und sind nicht zeitabhängig,

Aus diesen Annahmen wurde abgeleitet, dass der Nachthimmel so hell wie die Oberfläche der Sonne (»sternhell«) sein müsste.

Die hier gegebene Darstellung ist etwas vereinfacht,¹⁸⁸ zeigt aber schon, dass der Übergang von der Prämissenmenge aus der klassischen Kosmologie zu einer Aussage, die im Konflikt zum dunklen Nachthimmel steht, nicht dem einfachen prädikatenlogischen Schema folgt, nach dem die schwarze Farbe des Federkleids von Rabe Jakob aus dem allgemeinen Gesetz »Alle Raben sind schwarz« und der speziellen Annahme »Jakob ist ein Rabe« abgeleitet wird.

Man kann die Folgerung des sternhellen Nachthimmels durch eine leicht nachvollziehbare Überlegung veranschaulichen: In einem unendlichen, gleichmäßig mit Sternen erfüllten Universum trifft jeder Sehstrahl, der von einem irdischen Beobachter ausgeht,

irgendwann auf die Oberfläche eines Sterns. Als Analogie kann man an einen hinreichend großen Wald denken, in den vom Rand her kein direktes Licht eindringt, weil jeder Sehstrahl schließlich auf einen Baum trifft.

Da nun die Folgerung eines sternhellen Nachthimmels, die man aus den Annahmen a) bis d) ableiten kann, offenbar nicht zutrifft, muss zumindest eine der darin enthaltenen Aussagen falsch sein. Man weiß allerdings zunächst nicht, welche der Annahmen falsch ist (»Duhem-Quine-Problem«). Aber natürlich möchte man herausfinden, welche der Annahmen falsch sind, damit man sie korrigieren und so die Dunkelheit des Nachthimmels erklären kann. Gerhard Vollmer führt eine ganze Reihe von Vorschlägen aus mehreren Jahrhunderten auf, die einzelne der oben genannten kosmologischen Annahmen verändern, um die Dunkelheit des Nachthimmels zu erklären.¹⁸⁹ Uns interessiert hier besonders, mit welchen Arten von Gründen für und gegen solche Korrekturen und damit für und gegen die jeweiligen Erklärungen der Dunkelheit des Nachthimmels argumentiert wird. Die Annahme a) (Unendlichkeit des Universums) wurde 1610 von Johannes Kepler angezweifelt. Diese Prämisse ist empirisch nicht direkt entscheidbar und eher naturphilosophisch begründet. Allerdings könnte der Nachthimmel auch in einem endlichen Universum gleißend hell sein, wenn die Sterne nur dicht genug stünden. 1721 schlug Edmund Halley eine Lösung vor, die an der Strahlung der Sterne ansetzt. Er nahm an, dass ferne Sterne zu wenig Licht aussenden, um auf der Erde sichtbar zu sein. Dabei hat er aber nicht beachtet, dass die Abnahme der Strahlungsintensität mit der Entfernung dadurch kompensiert wird, dass die Anzahl der Sterne, die sich in einem bestimmten Abstand von der Erde befinden, mit diesem Abstand in gleicher Weise zunimmt.

Weitere Lösungsvorschläge des Olbers'schen Paradoxons (Chéseaux 1744, Olbers 1823) nehmen an, dass interstellare Materie das Licht ferner Sterne absorbiert, so dass der Nachthimmel dunkel

wird. Dagegen haben John Herschel 1848 und Karl Friedrich Zöllner 1872 eingewandt, dass sich das interstellare Gas dabei aufheizen würde und schließlich ebenso Strahlung abgeben müsste wie die Sterne. Hierbei wird deutlich, dass man über die Annahmen a) bis d) hinaus noch weitere Hypothesen über das Schicksal der Strahlung im Raum zwischen den Sternen braucht. Olbers' Vorschlag widerspricht dem Energiesatz, der erst um 1850 allgemeine Anerkennung fand und Olbers noch nicht bekannt war. 1908 legte Carl Charlier eine Lösung vor, die die Annahme c) aufgibt. Er geht von einem hierarchisch aufgebauten Universum aus, in dem jedes System (Stern, Sternhaufen, Galaxie ...) Teil eines größeren Systems ist, wobei die durchschnittliche Dichte der Sterne bei größeren Systemen und damit in größeren Raumgebieten immer weiter abnimmt. Dieser Vorschlag löst das Rätsel des dunklen Nachthimmels, hat aber Probleme beim Verständnis einiger Beobachtungen.

Ein danach folgender Lösungsvorschlag stützt sich auf eine neue fundamentale Theorie, auf die Allgemeine Relativitätstheorie, die die Geometrie der Raumzeit und die Bewegung der Materie in ihr beschreibt. Auf die Kosmologie angewandt, ermöglicht diese Theorie eine Expansion des Raums. Nach Hermann Bondi (1952) wird es nachts dunkel, weil das Weltall expandiert. Dadurch kommt es zu einer Rotverschiebung des Lichts ferner Sterne und Galaxien und zu einer Verringerung der Energiedichte der Strahlung im Raum. Dieser Vorschlag wurde populär, weil er nahelegt, dass man aus der Dunkelheit des Nachthimmels auf die Expansion des Weltraums schließen könne. Allerdings ist diese Lösung nicht gut genug. Dunkel ist es auch aus anderen Gründen (wir kommen gleich darauf zurück), und dunkel könnte es auch dann sein, wenn das Universum nicht expandierte. Die kosmische Expansion verringert nur die Nachthimmelstrahlung. Eine andere Variante erklärt die Dunkelheit des Nachthimmels durch die Hypothese eines »Urknalls« und geht damit von einem endlichen Alter des Universums aus (Aufgabe der Annahme b)). Allerdings ist der Himmel nicht in jedem endlich

großen und nur endlich alten Universum dunkel. Würden die Sterne viel dichter stehen als in unserem Universum, dann wäre der Nachthimmel dennoch hell.

Tatsächlich kommt es weniger auf das Alter und die Größe des Universums als auf die Strahlungsdichte im Universum an.¹⁹⁰ Die heute allgemein akzeptierte Erklärung des dunklen Nachthimmels (von ihren Protagonisten dann oft auch als die »endgültige« Lösung des Problems bezeichnet) setzt bei der Betrachtung der zur Verfügung stehenden Energie an. Ausgeführt wird dieser Lösungstyp bei Harrison.¹⁹¹ Ein wichtiges Element ist darin eine Theorie der Energieerzeugung in den Sternen, die erst im 20. Jahrhundert durch die Quantentheorie ermöglicht wurde. Die Sterne senden ihr Licht in den leeren Weltraum und füllen ihn dadurch mit Strahlungsenergie. Die Sterne strahlen aber nicht lange genug und stehen nicht eng genug, um den Nachthimmel hell zu machen. Das zeigen neuere quantitative Überlegungen.¹⁹²

Dagegen ist es erstaunlicherweise nicht wesentlich, ob das Universum räumlich endlich oder unendlich groß ist, ob es endlich oder unendlich alt ist, ob das Weltall statisch ist oder expandiert. In dem Buch von Harrison (1981) findet man eine anschauliche Analogie: Die Höhe des Wasserstandes in einer Badewanne, die für die Größe der Strahlungsdichte in einem Raumgebiet des Universums steht, hängt davon ab, wie viel Wasser aus einem Hahn (aus den Sternen) eingefüllt wird. In diesem Bild kommt aus dem Hahn einfach nicht genug Wasser, um die Badewanne zu füllen. Dehnt sich die Badewanne wie der Weltraum aus, sinkt der Wasserstand. Die quantitativen Berechnungen zeigen, dass die von den Sternen überhaupt lieferbare Energie um viele Größenordnungen nicht ausreicht, um den Nachthimmel hell zu machen. Das war in den frühen Herleitungen des Olbers'schen Paradoxons übersehen worden, in denen man implizit von einer gefüllten Badewanne, also von einem Universum ausgegangen war, in dem die Strahlung mit ihren Quellen im Gleichgewicht ist.¹⁹³

Viele Lösungsvorschläge wurden verworfen, weil sie bei genauem Hinsehen das Problem nicht gelöst haben, weil die Autoren also Fehler gemacht haben. Die Vorschläge unterscheiden sich in den Gesetzen, die in den Erklärungen verwendet werden (mit oder ohne Energiesatz, klassische oder relativistische Mechanik) und in den Annahmen über den Aufbau des Universums, auf das diese Gesetze angewandt werden. Die verschiedenen Erklärungsansätze gehen im Lauf der Zeit mit einer Weiterentwicklung der Vorstellungen über das Universum einher. Sie waren anfangs eher qualitativ und geometrisch geprägt und stützten sich auf Konzepte wie Sehstrahlen. Vor einigen Jahrzehnten gab es dann einen Perspektivwechsel, der die Dichte der Strahlungsenergie im Raum in das Zentrum rückte und quantitative Aussagen über Sternverteilung und Energieausstoß der Sterne heranzog. Das war erst durch neue Beobachtungen und durch Einbeziehung von Erkenntnissen aus der Quantenmechanik, der Elektrodynamik und der Thermodynamik möglich. Es gab immer wieder neue Erklärungen der Dunkelheit des Nachthimmels, weil immer wieder neue Erkenntnisse gewonnen wurden, die in ein umfassendes und kohärentes Bild des Universums integriert werden konnten und dann auch bei den Erklärungen der Dunkelheit des Nachthimmels eine Rolle spielten.

3. Erklärungen des Zwillingsparadoxons

Ein weiteres Beispiel dafür, dass ein physikalischer Sachverhalt mehrfach neue und durchaus unterschiedliche Erklärungen gefunden hat, ist das Zwillingsparadoxon. Es geht dabei darum, dass für zwei Körper, deren Bahnen sich zweimal schneiden, gemäß der Relativitätstheorie zwischen den Treffen unterschiedlich lange Zeiten vergehen. Veranschaulicht wird das meist durch ein Zwillingpaar, wobei einer der Zwillinge in ein Raumschiff steigt und sich mit großer Geschwindigkeit von der Erde entfernt, während der andere Zwilling auf der Erde zurückbleibt. Wenn der raumfahrende Zwilling dann zur Erde zurückkehrt, stellt das Zwillingpaar fest, dass

sie unterschiedlich gealtert sind, dass ihre Uhren für das Zeitintervall zwischen Start und Rückkehr unterschiedliche Längen anzeigen. Der zurückgebliebene Zwilling ist gegebenenfalls schon ein Greis, während der Raumfahrer noch im besten Mannesalter ist. Das Zwillingsparadoxon war lange Zeit nur ein Gedankenexperiment, ist mittlerweile aber auch experimentell bestätigt.

Der erste Hinweis auf das Zwillingsparadoxon findet sich schon bei Albert Einstein in seinem Aufsatz aus dem Jahr 1905, in dem er erstmals die Spezielle Relativitätstheorie vorstellt. Dort ist aber noch nicht von Zwillingen die Rede, sondern von einer »eigentümlichen Konsequenz«, die sich für zwei Uhren ergibt. Man findet in der Literatur im Verlauf der Geschichte und auch in gegenwärtigen Lehrbüchern unterschiedliche Erklärungen für diesen Effekt.¹⁹⁴ Einige schließen Beschleunigungen und genaue Geschwindigkeiten des reisenden Zwillings ein, andere nicht. Einige arbeiten mit Lichtsignalen, die die Zwillinge aussenden, andere nur mit der Struktur der Raumzeit. Ein zentraler Unterschied ist, ob man den Altersunterschied der Zwillinge aus der geometrischen Struktur des Minkowskiraums und der jeweils auf ihren Bahnen verbrauchten (und nach der entsprechenden Metrik berechneten) Eigenzeit bestimmt oder ob man die Erklärung erfahrungsnäher ansetzt und operationalistisch zum Beispiel mit Lichtsignalen arbeiten will. Offenbar sind für die Frage, was »die richtige« Erklärung ist, auch wissenschaftsphilosophische Ideale und didaktische Überlegungen wichtig.

Das Zwillingsparadoxon hat eine zentrale Rolle bei der Durchsetzung der Relativitätstheorie in Fachkreisen und in einer weiteren Öffentlichkeit gespielt.¹⁹⁵ Einstein zeigte eine unerwartete, aber anschaulich beschreibbare Konsequenz einer abstrakten mathematischen Theorie. Die Gegner der Relativitätstheorie benutzten das Paradoxon als angeblichen Nachweis eines inneren Widerspruchs in dieser Theorie. Die verschiedenen Ableitungen des Paradoxons halfen mit, Erklärungskraft, begriffliche Voraussetzungen und intuitive Zugänge zu der neuen Relativitätstheorie zu klären. Die Aus-

einandersetzungen zeigen auch, dass sich das volle Verständnis dieser Theorie erst allmählich entwickelte: »*The Twins ›Paradox‹ has inspired more confusion about Relativity than any other effect.*«¹⁹⁶

In der Auseinandersetzung zwischen den verschiedenen Erklärungen des Zwillingsparadoxons ging es also immer auch um ein besseres Verständnis der Relativitätstheorie – ein Verständnis, das über den instrumentellen Umgang mit ihren mathematischen Formeln hinausgeht.

4. Ableitungen des Planck'schen Strahlungsgesetzes

Ein in der Physik seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts viel behandeltes Thema ist die spektrale Verteilung der Wärmestrahlung. Schon aus dem Alltag ist bekannt, dass sich die Farbe zum Beispiel von glühendem Eisen bei verschiedenen Temperaturen unterscheidet. Tatsächlich strahlt Eisen jeweils in allen möglichen Farben, das heißt in allen möglichen Frequenzen. Es gibt aber ein ausgeprägtes Maximum, das wir primär wahrnehmen und dessen Zentrum sich mit der Temperatur verschiebt. Was die Physiker interessiert, ist die gesamte Spektralverteilung, also die Intensität der Strahlung für verschiedene Frequenzen bei jeweils gegebener Temperatur. Die (mathematisch komplexe) korrekte Formel hat Planck bereits im Oktober 1900 in einer gelungenen Interpolation von experimentellen Ergebnissen gefunden; sie wird heute als Planck'sches Strahlungsgesetz bezeichnet. Für dieses Gesetz wurden mehr als zwei Dutzend zum Teil sehr unterschiedliche Ableitungen vorgelegt.¹⁹⁷ Wieso wurde über Jahrzehnte so intensiv um die richtige Herleitung gerungen?

Rückblickend betrachtet ist im Zuge dieser Entwicklung das Weltbild der klassischen Physik eingestürzt und die Quantenmechanik entstanden. Aus der Froschperspektive der beteiligten Physiker hat sich die Sache jedoch sehr anders dargestellt. Es gab für längere Zeit, insbesondere bei Planck, kein Krisenbewusstsein, sondern lediglich das Bestreben, ein widerspenstiges Phänomen in die

akzeptierten Theorien einzubetten. Aus der heutigen Vogelperspektive sieht es dagegen fast andersherum aus: Es ging letztlich nicht primär um das Finden der richtigen Herleitung, sondern um das Finden der richtigen Theorie, auf deren Grundlage die Erklärung stattfindet.

Die eigentlich wichtige Vorgeschichte zu Plancks zweiter Ableitung und physikalischen Begründung der Strahlungsformel im Dezember 1900 kann hier nur sehr verkürzt skizziert werden. Gustav Kirchhoff hatte für seine Untersuchungen der Wärmestrahlung die Idealisierung eines schwarzen Körpers eingeführt, der alle einfallende elektromagnetische Strahlung absorbiert. Er kann durch einen Hohlraum mit einer sehr kleinen Öffnung realisiert werden. Kirchhoff konnte nun zeigen, dass die Spektralverteilung der Hohlraumstrahlung für verschiedene Temperaturen, das heißt die Intensität der Strahlung in Abhängigkeit von der Frequenz, »universell« ist. Das bedeutet, dass weder die materielle Beschaffenheit der Hohlraumwände noch ihre Form irgendeine Rolle für die Spektralverteilung spielen. Jeder heiße Hohlraum im thermischen Gleichgewicht zeigt dieselbe Spektralverteilung. Es gibt also eine *universelle* Funktion $\rho(\nu, T)$, welche angibt, wie viel Energie die elektromagnetischen Wellen im Hohlraum in den verschiedenen Frequenzen haben.¹⁹⁸ Die Universalität begründete die Hoffnung, dass man das im Allgemeinen sehr komplexe Phänomen der Wärmestrahlung im Fall der Hohlraumstrahlung durch ganz grundsätzliche theoretische Überlegungen in den Griff bekommen kann. Genau diese Hoffnung hatte auch Max Planck, der insgesamt wenig an speziellen Problemen, dafür umso mehr an den großen Zusammenhängen der Theorien und ihren fundamentalen Naturgesetzen interessiert war. Dabei verfolgte Planck insbesondere das ambitionierte Forschungsprogramm einer Integration von Thermodynamik und Elektrodynamik. Das Problem bestand darin, dass es in der Thermodynamik irreversible Prozesse gibt, während die der Elektrodynamik zugrundeliegenden Maxwellgleichungen zeitinvariant sind. Plancks Ab-

sicht war nun, die Irreversibilität thermodynamischer Prozesse auf der Grundlage bestimmter elektrodynamischer Prozesse, nämlich der Strahlungsprozesse, abzuleiten.

Planck nutzt die Universalität der Hohlraumstrahlung in seiner zweiten Ableitung nun auf besonders kluge Weise aus, indem er bei ganz allgemeinen Erwägungen bleibt und rein hypothetisch ein ganz konkretes Modell der Hohlraumwände und ihrer Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld im Inneren des Hohlraums einführt. Dabei nimmt er an, dass die Hohlraumwände aus winzigen Oszillatoren (»Resonatoren«) bestehen: Ladungen, die jeweils um einen Ruhepunkt schwingen können. Planck denkt dabei nicht, dass dies die reale Situation richtig erfassen würde. Man kann mit diesem Modell, das sich besonders leicht berechnen lässt, dennoch arbeiten, weil es wegen der Universalität nicht auf die spezifische Realisierung ankommt.

Unter diesen Voraussetzungen leitet Planck im Dezember 1900 erneut die Formel für die Hohlraumstrahlung her.¹⁹⁹ Für seine physikalische Begründung muss er Annahmen machen, die darauf hinauslaufen, dass die Oszillatoren ihre Energie nur in Vielfachen von Energieelementen $\varepsilon = h\nu$ aufnehmen und abgeben können, wobei h die später nach ihm benannte Naturkonstante und ν die Frequenz der Oszillatoren bezeichnen. Das ist (entgegen einer weit verbreiteten Meinung) nicht als Quantisierung der Oszillatoren zu lesen. Dennoch wird Plancks Herleitung der Strahlungsformel vom Dezember 1900 oft als Geburtsstunde der Quantenmechanik bezeichnet. Auch wenn es dafür im Nachhinein gewisse Gründe gibt, wie wir im Folgenden sehen werden, ist es aber tatsächlich so, dass Planck mit seiner Energiequantelung wider Willen eine Idee in die Welt gesetzt hat, die seinem ganzen Forschungsprojekt zutiefst widerspricht und die er selbst auch in keiner Weise in dem Sinne ernst genommen hat, dass er hier eine revolutionäre Änderung der Physik bewirkt hätte. Tatsächlich hat Planck die von ihm das erste Mal verwendete Energiequantelung sogar nur deswegen (und als vorläu-

fig gedacht) eingeführt, um einen Ansatz anwenden zu können, den er eigentlich ebenfalls scharf abgelehnt hat. Es handelt sich dabei um die Entropieberechnung seines erklärten Widersachers Boltzmann. Der Konflikt dreht sich insbesondere um die fundamentale Weltbildfrage, ob Materie aus kleinsten unteilbaren Atomen besteht (Boltzmann) oder kontinuierlich ist (Planck). Der zentrale Aspekt der Boltzmann'schen Entropiebestimmung besteht nun darin, die Anzahl der Mikrozustände abzuzählen, die einen gegebenen Makrozustand realisieren können. Abzählen kann man aber nur, wenn es etwas abzuzählen gibt, was in der von Planck favorisierten Kontinuumsvorstellung jedoch nicht gegeben ist.

Um die statistische Interpretation der Entropie von Boltzmann einsetzen zu können, musste Planck bestimmen, auf wie viele Weisen eine vorgegebene Gesamtenergie auf ein System von Oszillatoren verteilt werden kann. Plancks einziger Grund für die später als revolutionärer Akt erscheinende Einführung von Energieelementen $\varepsilon = hv$, das heißt für die Quantisierung der auf die verschiedenen Oszillatoren der Hohlraumwände zu verteilenden Gesamtenergie, war es, die Anwendung des statistischen Ansatzes von Boltzmann zu ermöglichen. Aus Plancks eigener Sicht war dies ein »Akt der Verzweiflung«. ²⁰⁰ Die Diskretisierung war nötig, um eine Abzählung der zulässigen Mikrozustände (oder »Complexionen«) zu ermöglichen.

Planck hatte jedoch nicht vor, es bei der Quantisierung der Energie in Portionen der Größe $\varepsilon = hv$ zu belassen, sondern er versuchte lange, ε gegen 0 gehen zu lassen, um so den klassischen kontinuierlichen Fall zurückzugewinnen. Zu Plancks deutlichem Unbehagen ließ sich die korrekte Strahlungsformel jedoch nur unter Beibehaltung dieser speziellen Quantisierung herleiten. Die Diskretisierung der Energie war für Planck also mitnichten ein bewusster revolutionärer Akt, sondern ein Ärgernis, das es irgendwann zu beseitigen galt. Ein wirkliches Abrücken von der klassischen Physik beginnt bei Planck erst etliche Jahre später, nachdem insbesondere Einstein

und Ehrenfest darauf gedrungen hatten, dass die Annahme nicht-kontinuierlicher Größen unverzichtbar ist.

Einstein war auch einer der entschiedensten Kritiker von Plancks Herleitung der Strahlungsformel. Ein wesentlicher Punkt seiner Kritik besteht darin, dass Planck, indem er die Quantisierung auf die Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlungsfeld beschränken will, seinem eigenen Vorgehen widerspreche.²⁰¹ Bei der Herleitung dieser Gleichung verwendet Planck wesentlich Maxwells Theorie des Elektromagnetismus und setzt damit voraus, dass der Energieaustausch zwischen den Oszillatoren und dem Strahlungsfeld kontinuierlich ist. Konsequenterweise, so Einstein, müsse auch die elektromagnetische Strahlung selbst quantisiert werden und zwar auch im wechselwirkungsfreien Fall – was auf Einsteins berühmte Lichtquantenhypothese hinausläuft.

Tatsächlich hat es dann jedoch noch zwei volle Jahrzehnte gedauert, bis sich die Lichtquantenhypothese in einem gewissen Sinn durchgesetzt hat, insbesondere weil man damit noch andere Beobachtungen erklären konnte.²⁰² In dieser Zeit gab es von allen Seiten Kritik und anscheinend war sich sogar Einstein selbst in der Folgezeit nicht mehr immer ganz so sicher damit. Die Vorstellung, dass Licht räumlich lokalisiert in bestimmten endlichen Portionen existiert, scheint überhaupt nicht zu der allgemein akzeptierten Konzeption des Elektromagnetismus als fundamentale Feldtheorie zu passen, in der Licht vollständig kontinuierlichen Charakter haben sollte. Wenn man sagt, dass sich Einsteins Lichtquantenhypothese um 1925 dann doch durchsetzte²⁰³, muss man aber bedenken, dass im Rahmen der Quantentheorie Licht nicht einfach aus Teilchen besteht, sondern sich im Sinne eines Dualismus von Welle und Teilchen nur manchmal so verhält.

In der wohl bekanntesten Herleitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes, manchmal als ›Einsteins A und B‹ bezeichnet, stützt sich Einstein (1917) auf ein eher anschauliches Modell der Wechselwirkung von Strahlung und Materie, das man als Teil einer mecha-

nistischen Erklärung einstufen kann.²⁰⁴ Albert Einstein ersetzt das Modellobjekt der Oszillatoren durch zwei Energiezustände, wie sie vorher im Bohr'schen Atommodell eingeführt worden waren. Für die Wechselwirkung mit der Strahlung nimmt Einstein insbesondere an, dass Licht, elektromagnetische Strahlung, aus Teilchen, den ›Lichtquanten‹ oder ›Photonen‹, besteht, wobei die Energie eines Photons $\epsilon=h\nu$ ist, also wie bei den von Planck bekannten Energiepaketen. Einstein untersucht dann verschiedene Emissions- und Absorptionsprozesse und stellt dabei statistische Überlegungen über die Besetzungszahlen der beiden Energiezustände an. Mit Hilfe einer Verallgemeinerung der Maxwell-Boltzmann'schen Geschwindigkeitsverteilung leitet er die Temperaturabhängigkeit der Besetzungszahlen und damit das Planck'sche Gesetz ab. Dabei spielen also weniger abstrakte thermodynamische Überlegungen eine Rolle, vielmehr steht ein anschauliches, fast atomistisches Modell der Wechselwirkung von Strahlung und Materie im Mittelpunkt.

Wie sich zeigen sollte, ist eine hinreichend vollständige Modellierung dieser Mechanismen erheblich aufwändiger und unanschaulicher und gelang erst Dirac (1927), der mit seiner Arbeit den Grundstein für die spätere Quantenelektrodynamik legte. Dirac gelingt es dabei, im Rahmen von Einsteins Herleitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes von 1917 nur experimentell bestimmbare Konstanten theoretisch herzuleiten. Man kann vielleicht anschaulich sagen, dass Dirac auch für das Strahlungsfeld Energiezustände einführt und es damit quantisiert. Das ist die Grundlage für ein detaillierteres und realistischeres Modell für den Mechanismus der Wechselwirkung von Strahlung und Materie, die er mathematisch mit Hilfe der neu eingeführten Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren beschreibt.

Neben den drei hier vorgestellten Erklärungen des Planck'schen Gesetzes gibt es viele weitere. Sie unterscheiden sich unter anderem in der Art und Weise, wie Elemente der statistischen Mechanik

eingesetzt werden, wie viel aus der klassischen Elektrodynamik übernommen wird und welche Ansätze und frühen Konzeptionen eines quantisierten Strahlungsfeldes in Anschlag gebracht werden. Bei der Suche nach den »richtigen« Prämissen der Herleitungen wurden insbesondere bei drei wesentlichen Fragen verschiedene Antworten ausprobiert: (i) Welche Energien können die Oszillatoren abgeben und aufnehmen, und grundsätzlich: Wie modelliert man die strahlenden Körper? (ii) Welche Energien kann das elektromagnetische Strahlungsfeld (zum Beispiel im Innern des Hohlraums) abgeben und aufnehmen? (iii) Wie wechselwirken die Oszillatoren und das elektromagnetische Strahlungsfeld miteinander?

Im Lauf der Zeit wurde zunehmend klar, dass es bei der Beantwortung dieser Fragen unvermeidlich ist, Annahmen zu machen, die zu den einschlägigen klassischen Theorien in Widerspruch stehen. Der Einbau solcher Annahmen führt dann zu jeweils neuen Herleitungen des Planck'schen Gesetzes. Die neuen Antworten auf die oben angeführten Fragen sind die Quantelung der materiellen Energieniveaus und damit auch der Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlungsfeld (bei Planck zu (i)), die Quantisierung der elektromagnetischen Strahlung selbst (bei Einstein zu (ii)) und ein erstes, relativ detailliertes und realistisches Modell für den Mechanismus der Wechselwirkung von Strahlung und Materie, wobei das Strahlungsfeld in einer theoretisch fundierten Weise quantisiert wird (Dirac zu (iii)).

Es gab also in dieser Phase einer »provisorischen Physik« einen wechselseitigen Prozess, in dem bei der Suche nach Verbesserung der Prämissen der Herleitungen neue Theorien ausprobiert wurden, aber auch umgekehrt neue theoretische Ansätze über ihren Erklärungserfolg getestet wurden. Die verschiedenen Herleitungen des Planck'schen Gesetzes kann man als Schritte auf der Suche nach Kohärenz zwischen Hintergrundwissen und Begründungen für die Erklärungsprämissen ansehen.

5. Fazit

Rückblickend kann man mehrere Gründe ausmachen, wieso es zu so einer bemerkenswert hohen Anzahl von verschiedenen Anläufen zur Herleitung beziehungsweise Erklärung des Planck'schen Strahlungsgesetzes gekommen ist. In unserer Analyse haben wir uns auf das Verhältnis der fundamentalen Theorien zu diesen Herleitungen konzentriert. Zwar beruht ein Teil der Herleitungen des Planck'schen Strahlungsgesetzes auf der Weiterentwicklung der Theorien, die jeweils als fundamental und einschlägig für die Prämissen der Erklärungen erachtet werden, in der vorhergehenden Analyse stand jedoch ein anderes Motiv im Vordergrund, nämlich die Suche nach der richtigen fundamentalen Theorie selbst, auch wenn sich das für die Autoren jeweils nicht immer so dargestellt haben muss. Die Suche nach neuen Herleitungen ist also Teil eines Prozesses der Verbesserung des Hintergrundwissens, auf dem die Erklärungen beruhen. Einen ähnlichen Prozess der Suche nach Kohärenz des Hintergrundwissens mit den Prämissen einzelner Erklärungen kann man bei den Erklärungen der Dunkelheit des Nachthimmels finden.

Selbst wenn das bei der Suche und Ausarbeitung einer Herleitung für die Autoren vielleicht nicht immer im Vordergrund stand, ging es aus Sicht der rückblickenden Analyse immer auch um das Finden der richtigen Theorie, auf deren Grundlage die Erklärung stattfindet. Deswegen ist es kein Zufall, wenn unterschiedliche Herleitungen insbesondere in Phasen auftreten, in denen die Theorienentwicklung noch nicht abgeschlossen und das Hintergrundwissen provisorisch ist. Das trifft sowohl für das Olbers'sche Paradoxon zu, bei dem es um eine umfassende Theorie des Universums geht, als auch für das Planck'sche Gesetz, bei dem die Quantentheorie als neue fundamentale Theorie der Wechselwirkung von Materie und Strahlung langsam in Erscheinung tritt. In beiden Fällen geht es um komplexe Phänomene, bei deren Erklärung Elektrodynamik, Quantentheorie und Thermodynamik zu berücksichtigen sind. Beim Zwillingsparadoxon liegt der Fall etwas anders, hier geht es

um die Entwicklung des rechten Verständnisses eines neuen Typs von Theorien, die mit den Raumzeit-Theorien in die Welt kommen. Hier spielen vielleicht auch weitere Gründe für erneute Ableitungen eine Rolle, zum Beispiel die Suche nach besonders einfachen und anschaulichen Herleitungen oder die Suche nach einem besonderen Typ von Erklärungen, die im speziellen Fall zu einem besseren Verständnis eines Effekts führen.

Manchmal kann man Warum-Fragen schnell beantworten, weil man sich über den Hintergrund einig ist und so die holistische Struktur unseres Wissens unerheblich ist. Ist das Hintergrundwissen jedoch nicht sicher, kann es – unabhängig davon, ob die beteiligten Forscher sich darüber ganz im Klaren sind oder nicht – sehr fruchtbar sein, immer wieder nach neuen Erklärungen zu suchen, um eben dieses Hintergrundwissen überhaupt erst zu etablieren.

Literatur

- Darrigol, Olivier (2009): A simplified genesis of quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40: 151–166.
- Dirac, Paul A. M. (1927): The quantum theory of the emission and absorption of radiation. *Proceedings of the Royal Society of London A* 114: 243–265.
- Ehrenfest, Paul (1911): Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle? *Annalen der Physik* 341, 11: 91–118.
- Einstein, Albert (1905): Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik* 17: 132–148.
- Einstein, Albert (1917): Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Zeitschrift* 18: 121–128.
- Giulini, Domenico (2005): „Es lebe die Unverfrorenheit!“ Albert Einstein und die Begründung der Quantentheorie. In: Herbert Hunziker (Hrsg.): *Der jugendliche Einstein und Aarau*. Basel.
- Harrison, Edward R.: *Cosmology*, Cambridge 1981 (deutsche Übersetzung: *Kosmologie*. Darmstadt 1981).
- Hoyer, Ulrich (1980): Von Boltzmann zu Planck. *Archive for History of Exact Sciences* 23: 47–86.
- Klein, Martin J. (1962): Max Planck and the beginnings of the quantum theory. *Archive for History of Exact Sciences* 1: 459–479.

- Kuhlmann, Meinard (2017): Mechanisms in physics. In: Glennan, S., Illari, P. (Hrsg.): Routledge Handbook of Philosophy of Mechanisms. London, New York, S. 283–295.
- Kuhn, Thomas S. (1978): Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity 1894–1912. Oxford, New York.
- Kuhn, Wilfried, Manfred Stöckler (1986): Deduktionen und Interpretationen. Erklärungen der Planckschen Strahlungsformel in physikinterner, wissenschaftstheoretischer und didaktischer Perspektive. In: W. Kuhn (Hrsg.): Frühjahrstagung 1986, DPG – FA Didaktik der Physik, S. 13–51.
- Maudlin, Tim: Philosophy of Physics. Space and Time. Princeton 2015.
- Planck, Max (1900): Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2: 237–245 (wiederabgedruckt in: Dokumente der Naturwissenschaft, Physik, Bd. 12).
- Planck, Max (1911): Die Gesetze der Wärmestrahlung und die Hypothese der elementaren Wirkungsquanten (Vortrag auf dem Solvay-Kongress in Brüssel 1911), Abhandlungen der Bunsengesellschaft 3, 7 (1913): 77–94.
- Planck, Max (1931 [1969]): Max Planck: Brief an Robert Williams Wood von 1931. Wiederabgedruckt in: Hermann, A.: »Frühgeschichte der Quantentheorie«, Mosbach.
- Richter, Peter H.: Das Olberssche Paradoxon. Sterne und Weltraum 34 (1995), S. 804–809 (im Internet als Manuskript abgerufen am 19.3.2024 unter <https://www.itp.uni-bremen.de/prichter/download/OlbersParadox.pdf>).
- Stöckler, Manfred: Paradoxien der Zeit. Das Zwillingsparadox. In: Alexander Max Bauer, Gregor Damschen, Mark Siebel (Hrsg.): Paradoxien. Paderborn 2024, S. 125–145.
- Uffink, Jos (2007): Compendium of the foundations of classical statistical physics. In: Butterfield, J., J. Earman (Hrsg.): Handbook of the Philosophy of Science: Philosophy of Physics, Part B, Amsterdam u. a., S. 923–1074.
- Vollmer, Gerhard: »Warum wird es nachts dunkel? Das Olberssche Paradoxon als wissenschaftstheoretische Fallstudie«. In: Vollmer, Gerhard: Wissenschaftstheorie im Einsatz, Stuttgart 1993, S. 73–93.

