

Helmut Fink  
Meinard Kuhlmann *Hrsg.*

# Unbestimmt und relativ?

Das Weltbild  
der modernen Physik

SACHBUCH



Springer

Unbestimmt und relativ?

Helmut Fink · Meinard Kuhlmann  
(Hrsg.)

# Unbestimmt und relativ?

Das Weltbild der modernen Physik

 Springer

*Hrsg.*

Helmut Fink  
Institut für Theoretische Physik I  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Erlangen, Deutschland

Meinard Kuhlmann  
Philosophisches Seminar  
Universität Mainz  
Mainz, Deutschland

ISBN 978-3-662-65643-3      ISBN 978-3-662-65644-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65644-0>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023

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

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

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

© eicronic, shutterstock

Planung/Lektorat: Caroline Strunz

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

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

# Unbestimmt und relativ? Das Weltbild der modernen Physik – Vorwort

Die Beiträge dieses Buches gehen überwiegend auf ein populärwissenschaftliches Symposium zurück, das unter gleichem Titel von 20. bis 22. September 2019 im Aufseß-Saal des Germanischen Nationalmuseums in Nürnberg stattfand. Veranstalter waren die drei Organisationen, deren Logos unten zu sehen sind: die Heisenberg-Gesellschaft e. V., die Arbeitsgemeinschaft Philosophie der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), sowie das gemeinnützige Institut für populärwissenschaftlichen Diskurs KORTIZES gGmbH. Einige der damaligen Vorträge sind bei Auditorium Netzwerk als Mitschnitt auf DVD erhältlich. Zwei Beiträge in diesem Buch (Bartels und Passon) wurden zusätzlich aufgenommen.

Dieses Buch ist ein Sammelband, kein Lehrbuch. Die Beiträge bauen nicht aufeinander auf, sondern sind unabhängig voneinander lesbar. Kriterien bei der Themenwahl waren Grundlagencharakter, Weltbildrelevanz und Philosophiebezug. Der Anspruch ist eher systematisch als historisch und eher langfristig als tagesaktuell. Zielgruppe sind alle wachen Personen, die sich ernsthaft für die angesprochenen Fragen interessieren. Die Autoren wenden sich an ein breites Publikum. Die verbliebenen Formeln dienen der Einladung, nicht der Abschreckung.

Unser Dank gilt den genannten Organisationen für die Durchführung des Nürnberger Physik-Symposiums sowie Frau Dr. Lisa Edelhäuser, Frau Carola Lerch und Frau Caroline Strunz vom Springer Verlag für die freundliche und kompetente Betreuung. Ein ganz besonderer Dank gebührt den in aller Regel vielbeschäftigten Autoren für ihre Bereitschaft, an diesem Projekt

**VI Unbestimmt und relativ? Das Weltbild der modernen Physik – Vorwort**

mitzuwirken. Möge das vorliegende Resultat ihrer und unserer Arbeit zum öffentlichen Verständnis der modernen Physik positiv beitragen.

Nürnberg und Mainz  
im April 2022

Die Herausgeber



HEISENBERG  
GESELLSCHAFT



**KORTIZES**  
Institut für populär-  
wissenschaftlichen Diskurs

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung: Wechselwirkungen zwischen Physik und Philosophie</b>	1
<i>Helmut Fink</i>	
<b>Revolution mit Hindernissen: Der steinige Weg von der neuen Physik zu einem neuen Weltbild</b>	15
<i>Manfred Stöckler</i>	
<b>Vom geometrischen zum dynamischen Ansatz: Relativitätstheorien und die Natur von Raum und Zeit</b>	51
<i>Andreas Bartels</i>	
<b>Das Messproblem der Quantentheorie und die Vielfalt der Interpretationen – eine kritische Bewertung</b>	65
<i>Meinard Kuhlmann</i>	
<b>Bloß ungenau oder falsch? – Laborsprache und verborgene Variablen</b>	93
<i>Reinhard Werner</i>	
<b>Von Einzelgängern und Teamplayern: Wie sich Fermionen und Bosonen in unserer Alltagswelt bemerkbar machen</b>	113
<i>Gert-Ludwig Ingold</i>	
<b>Lichtteilchen?: Ein Versuch, etwas Licht auf Photonen zu werfen</b>	127
<i>Oliver Passon</i>	

<b>Symmetrie und Symmeriebrechung: Grundlagen und Weltbild der Physik</b>	149
<i>Klaus Mainzer</i>	
<b>Das Standardmodell – Oder: Nichts hält länger als ein Provisorium</b>	167
<i>Robert Harlander</i>	
<b>Gibt es Grenzen der physikalischen Naturbeschreibung? – Die Sehnsucht nach einer vereinheitlichten Theorie</b>	181
<i>Claus Kiefer</i>	
<b>Gibt es grundsätzliche Erkenntnisgrenzen der Physik? – Realistische vs. instrumentalistische Interpretationen</b>	193
<i>Paul Hoyningen-Huene</i>	
<b>Kontroversen um Universen: Sind Multiversum-Szenarien ein legitimer Teil der Wissenschaft?</b>	209
<i>Rüdiger Vaas</i>	
<b>Die Autoren</b>	225



# Einleitung

## Wechselwirkungen zwischen Physik und Philosophie

Helmut Fink

### 1 Unbestimmt und relativ?

Die Physik hat im 20. Jahrhundert zwei große Revolutionen erlebt. Relativitätstheorie und Quantentheorie haben die mathematische Naturbeschreibung und in der Folge das Bild vom Aufbau der Natur gründlich „durchgeschüttelt“. Ehemals festgefügte Überzeugungen sind ins Wanken geraten: Der universelle Determinismus der Naturvorgänge, der universell ordnende Zeitablauf sowie die Vorstellung eines „gefäßartigen“ Raumes, der als ewige und starre Arena des physikalischen Geschehens der Lichtausbreitung ein Medium und jeder Beschleunigung einen objektiven Status gibt, sind seither verloren. Man hört, in Wahrheit sei alles Naturgeschehen „unbestimmt“ und alles Wissen über die Welt „relativ“. Das sage die moderne Physik. Sagt sie es wirklich? Sehen wir genauer hin.

Die spezielle Relativitätstheorie bringt die „Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ nicht nur zur Geltung, sondern setzt sie voraus und denkt sie zu Ende. Das war eine der großen Leistungen Albert Einsteins. „Konstanz“ bedeutet hier, dass sie in jedem beliebigen Bezugssystem stets denselben Wert hat. Nichts daran ist „relativ“, im Gegenteil: Die Lichtgeschwindigkeit ist im uns bekannten Universum eine „absolute“ Größe.

---

H. Fink (✉)

Institut für Theoretische Physik I, Universität Erlangen, Erlangen, Deutschland

E-Mail: [helmut.fink@physik.uni-erlangen.de](mailto:helmut.fink@physik.uni-erlangen.de)

Dies hat fundamentale Auswirkungen für alle Vorgänge in Raum und Zeit und begründet die „Lichtkegel“-Struktur der relativistischen Raumzeit.

Die spezielle Relativitätstheorie gibt an, wie beliebige physikalische Größen umzurechnen sind, wenn sie in einem raumzeitlichen Bezugssystem beschrieben werden, das bezüglich des ersten gleichförmig bewegt ist. Die Theorie drückt somit aus, wie sich *dieselben* physikalischen Objekte und Phänomene unter *verschiedenen* Geschwindigkeitsperspektiven darstellen. Sie ermöglicht die *eindeutige* Umrechnung zwischen *relativ* zueinander bewegten Bezugssystemen.

Die Menge der Raumzeitpunkte, die zu einem gegebenen Punkt der Raumzeit gleichzeitig sind, hängt in der speziellen Relativitätstheorie vom gewählten Bezugssystem ab (Relativität der Gleichzeitigkeit), ebenso hängen rein räumliche und rein zeitliche Abstände zwischen zwei Raumzeitpunkten davon ab, in welchem Bezugssystem sie gemessen werden (Längenkontraktion bzw. Zeitdilatation). Es gibt jedoch einen raumzeitlichen Abstandsbegriff, der invariant ist, d. h. der gerade *nicht* vom Bezugssystem abhängt (Minkowski-Metrik). Wir sehen: Keineswegs ist „alles relativ“.

Die allgemeine Relativitätstheorie bezieht die Gravitation ein und beschreibt ihre Wirkung in geometrischen Begriffen: Die Materie krümmt die Raumzeit in einem mathematisch präzisen Sinn. Auch beschleunigte Bezugssysteme sind nun für die Naturbeschreibung grundsätzlich gleichwertig, d. h. die mathematische Form der Naturgesetze bleibt auch in ihnen unverändert (allgemeines Relativitätsprinzip). Beschrieben werden dabei stets objektive physikalische Prozesse in der Raumzeit.

Die Quantentheorie bietet nicht weniger Missverständnismöglichkeiten als die Relativitätstheorie. Eine ihrer bekanntesten Folgerungen ist die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation, oft auch „Unschärferelation“ genannt. Sie schätzt das Mindestmaß der Streuung der Messwerte bei Messung komplementärer Größen ab. Das bekannteste solche Größenpaar ist Ort und Impuls: Da nicht beiden zugleich durchgängig Werte zugeordnet werden können, löst sich für Quantenobjekte der klassische raumzeitliche Bahnbegriff auf. Zudem gibt es Unbestimmtheitsrelationen auch für andere Paare von Beobachtungsgrößen: für Winkel und Drehimpuls, für zwei Spinkomponenten, für Zeitspanne und Energie. Quantenzustände sind nicht „universell schwankungsfrei“. Flapsig gesagt: Irgendeine Größe streut immer.

Aber was besagt das? Ist die Theorie deswegen unpräzise? Keineswegs, ganz im Gegenteil: Die Quantentheorie erlaubt hochpräzise Berechnungen und ist experimentell mit geradezu unglaublicher Genauigkeit bestätigt. Sie liefert die bestmöglichen Voraussagen für diffizile physikalische Situationen,

auf atomaren Skalen und bei stellaren Objekten, in der Hochenergie- und Elementarteilchenphysik, in der Halbleiterphysik und Quantenoptik – um nur einige Anwendungsfelder zu nennen. Typischerweise beinhalten diese Voraussagen jedoch Wahrscheinlichkeitsverteilungen für mögliche Messwerte. Jeder Quantenzustand gestattet nämlich die Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten aller am jeweiligen Quantenobjekt erwartbaren Messwerte für alle dort wählbaren Messgrößen. So ist die Theorie gemacht.

Den Zufall wird man in der Quantentheorie nicht los – dies ist jedenfalls die verbreitete Standardauffassung, der wir hier folgen wollen. In der klassischen Physik konnte man sagen: Wenn man genau dasselbe macht, kommt auch genau dasselbe heraus. Das ist in der Quantenphysik nicht mehr so. Hier zeigt sich „echter“ Zufall, auch „primärer“ oder „ontischer“ Zufall genannt. Die Rolle der Wahrscheinlichkeit liegt dann nicht mehr – wie z. B. in der klassischen statistischen Mechanik – in praktischen Erwägungen oder in „subjektiver Unkenntnis“ des genauen Geschehens begründet, sondern in „objektiver Unbestimmtheit“. Plakativ könnte man sagen: Vor der (Quanten-)Messung weiß die Natur selbst nicht, welcher Messwert herauskommt. Der universelle Determinismus der klassischen Physik ist tot. Die Natur ist (auf der Quantenskala) indeterministisch.

Ähnlich wie bei der Relativität muss man auch hier genauer hinschauen: Trotz Zufall ist nicht etwa „alles unbestimmt“. Messungen haben klare und eindeutige Ergebnisse. Die Quantentheorie setzt das voraus, und im Labor sieht man es. Messergebnisse entstehen als Fakten und liegen nach der Messung als Dokumente vor. Die Unbestimmtheit endet mit der Messung. Sie endet – das sei hier betont – am Messapparat, nicht erst „im Bewusstsein des Beobachters“, wie eine spektakuläre, aber haltlose Deutungstradition glauben machen will. Quantenphänomene sind daher eingebettet in eine klassisch immer noch ziemlich gut beschreibbare und verstehbare Welt, in der nicht zuletzt Präparationsapparate für Quantenzustände (z. B. Elektronenquellen oder Laser) und Registrierapparate für Quanteneffekte (z. B. Detektoren oder Beobachtungsschirme) beheimatet sind.

Zwar gibt es auch makroskopische Quantenphänomene und die Experimentierkunst macht gerade bei deren Hervorbringung Fortschritte – aber dass die ganze Welt „irgendwie unscharf“ oder „fundamental mehrdeutig“ sein soll oder dass „alles mit allem zusammenhängt“, wird man daraus nicht ableiten können. Schließlich sind die Eigenschaftszuschreibungen für die unterscheidbaren makroskopischen Objekte der klassischen Physik in ihrem bewährten Geltungsbereich nicht plötzlich falsch geworden.

## 2 Weltbildfragen

Nicht alle Aussagen der letzten beiden Absätze werden von allen Quanteninterpretieren in dieser Form geteilt. Tatsächlich gibt es immer noch eine *Deutungsdebatte um die Quantentheorie*, die keineswegs abflaut, sondern in den letzten Jahrzehnten eher noch zugelegt hat. Das ist erstaunlich bei einer physikalischen Theorie, deren mathematische Formulierung seit über 90 Jahren in den Grundzügen vorliegt und deren Anwendung unstrittig höchst erfolgreich und überaus fruchtbar ist.

Eine zentrale Frage in dieser Deutungsdebatte ist von jeher, ob die objektive Unbestimmtheit quantenmechanischer Eigenschaften, die erst durch „Messung“ der entsprechenden Größe zu Ende geht, wirklich das letzte Wort ist. Kann man die Quantentheorie vielleicht durch „verborgene Variablen“ so ergänzen, dass die allgegenwärtigen Wahrscheinlichkeiten doch nur Ausdruck mangelnder Kenntnis wohldefinierter Werte dieser Variablen sind – ähnlich wie bei Wahrscheinlichkeiten in der klassischen Physik? Dann wäre die Quantentheorie nur eine summarische, letztlich unvollständige Beschreibung der Natur.

Höchst fraglich ist auch der Mechanismus, der zur Entstehung von Fakten am Messgerät führt. Sind die Werte gemessener Größen dem Quantenobjekt nur näherungsweise zuschreibbar oder liegen sie (nach der Messung!) mit derselben Sicherheit vor, die man in der klassischen Physik voraussetzen würde? Was zeichnet „Messwechselwirkungen“ mit Quantenobjekten innerhalb der Vielzahl physikalischer Wechselwirkungen aus? Welche Materieansammlung, die ja selbst aus Quantenobjekten zusammengesetzt ist, taugt als Messgerät? Generell ist gar nicht so klar, wie man sich den Übergang vom Geltungsbereich der Quantentheorie zur „klassischen Welt“, die uns umgibt, vorstellen soll.

All diese Fragen haben zu sehr unterschiedlichen Auffassungen darüber geführt, was die Quantentheorie über die Struktur der physikalischen Realität aussagt. Es geht dabei – daran sei noch einmal erinnert – nicht um irgendwelche technischen Nutzenwendungen, mit denen schlaue Leute Geld verdienen, sondern um fundamentale Erkenntnisse über den Aufbau der Natur. Woran kann man sich orientieren, wenn auf dieser Ebene ein Meinungsstreit tobt?

Ein verlässlicher Ausgangspunkt ist der mathematische Formalismus der Quantentheorie, denn er ist präzise, umfassend und unstrittig. Auch seine Anwendung in konkreten physikalischen Situationen im Sinne einer Minimalinterpretation (Vergleich der berechneten Wahrscheinlichkeiten mit

den relativen Häufigkeiten experimentell erzeugter Messwerte) unterliegt keinem Zweifel. Erst bei weitergehenden Folgerungen beginnt der Streit. Gleichwohl liefert die Mathematik strenge Vorgaben, die bei Deutungsansagen berücksichtigt werden müssen. So gibt es aussagekräftige Theoreme zur Nichtexistenz von verborgenen Variablen, sofern diese mit der Relativitätstheorie verträglich sein sollen (d. h. keiner Beeinflussung mit Überlichtgeschwindigkeit unterliegen).

Dieses Herangehen an Weltbildfragen lässt sich wie folgt verallgemeinern: Man nehme die am besten bestätigten Theorien der Physik und frage danach, welche Vorstellungen von den beschriebenen Gegenständen und ihren Eigenschaften die jeweilige Theorie erlaubt, wenn sie als exakt wahr angenommen wird. Dies ist ein idealisierter Standpunkt, der die Aussagen der Theorie zu Ende denkt. Die Elemente des mathematischen Formalismus der Theorie werden dabei gedanklich auf (mögliche) Elemente der physikalischen Realität bezogen. Auf diese Weise wird konkretisiert, was mit „Interpretation einer physikalischen Theorie“ gemeint ist.

Da sowohl die Relativitätstheorie als auch die Quantentheorie mathematisch anspruchsvoll formuliert sind (die erste setzt Differentialgeometrie voraus, die zweite Funktionalanalysis), erleichtert ein solcher Zugang nicht gerade die populärwissenschaftliche Vermittlung. Wer etwa die Vektorraumstruktur des quantenmechanischen Zustandsraums (Hilbertraums) nicht kennt, wird sich kaum ein eigenes, begründetes Urteil über verschiedene Interpretationsansätze bilden können. Dennoch sollte hier nicht verheimlicht werden, dass der Interpretationsbegriff in der theoretischen Physik unter härteren Randbedingungen steht als in der Lyrik, der Musik oder der bildenden Kunst.

Das Ringen um die Feinheiten des physikalischen Weltbildes ist seit der frühen Neuzeit voraussetzungsreicher geworden: Zwischen Galileis Entdeckung der Jupitermonde und dem Nachweis von Gravitationswellen ist die Bedeutung von Zufallsfunden gesunken und die technologische Komplexität der Beobachtungsmittel gestiegen. Vor allem aber ist die Rolle des theoretischen Vorwissens immer offensichtlicher geworden: Ohne Einsteins Relativitätstheorie hätte man z. B. niemals nach Gravitationswellen gesucht. Notgedrungen bleibt das Weltbild der Physik dort vorläufig und lückenhaft, wo es noch gar keine empirisch bestätigte Theorie gibt (etwa bei der Quantengravitation als erstrebter Vereinheitlichung von Quantentheorie und allgemeiner Relativitätstheorie). Aber auch in Bereichen, in denen die Physik weit genug entwickelt ist, um verlässliche Antworten zu liefern, ist bei Weltbildfragen neben der Expertise der Physiker die Einbeziehung naturwissenschaftsnaher Philosophen anzuraten.

### 3 Philosophie der Physik

Philosophen sind Spezialisten für Begriffe, Argumente und Methoden – und dies in den unterschiedlichsten Bereichen. Dass diese Kompetenz bei Deutungs- und Weltbildfragen nutzbringend eingesetzt werden kann, leuchtet sofort ein. Zugleich ist selbstverständlich Vertrautheit mit der von der jeweiligen Fragestellung berührten Fachwissenschaft nötig: Wer das Erklärungsschema der Evolutionsbiologie methodisch einordnen und erläutern will, sollte biologische Kenntnisse haben. Wer die Auswirkungen der Hirnforschung auf das Menschenbild untersuchen oder kritisieren will, sollte die neurowissenschaftlichen Forschungsergebnisse kennen. Und wer als Philosoph die Aussagekraft physikalischer Theorien beurteilen will, sollte mit der Physik ernsthaft in Berührung gekommen sein. Diese Anforderungen sind heute in der akademischen Philosophie zumeist gut erfüllt. Die Zeiten des autonomen Spekulierens fernab der Naturwissenschaften sind vorbei.

Die großen Fragen nach der Rolle des Menschen im Kosmos, nach dem Verhältnis von Natur und Kultur oder von Körper und Geist werden dann oftmals heruntergebrochen auf kleinteilige Fragestellungen und Kritikpunkte, die für Außenstehende unspektakulär, vielleicht sogar uninteressant erscheinen. Naturphilosophie wird auf Naturwissenschaft bezogen. Der große Vorteil dieses wissenschaftsbasierten Vorgehens liegt aber in der größeren Verbindlichkeit und Verlässlichkeit der gewonnenen Erkenntnisse, auch wenn die Fortschritte dabei nur langsam und mühsam zustande kommen. Der Austausch zwischen Fachwissenschaftlern und Philosophen kann dabei jedenfalls – gegenseitige Aufgeschlossenheit vorausgesetzt – sehr fruchtbar sein.

Der Teil der Philosophie, der sich mit dem „Funktionieren“ des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns befasst, heißt *Wissenschaftsphilosophie* (engl. *philosophy of science*). Wissenschaftsphilosophen versuchen zu ergründen, worin die Verlässlichkeit wissenschaftlicher Erkenntnis besteht, worauf sie beruht und wie weit sie reicht. Sie untersuchen, wie sich Theorie, Beobachtung und Experiment zueinander verhalten, welche Rolle Idealisierungen und Modellbildungen spielen, was Beschreibungen von Erklärungen unterscheidet oder welches Verständnis von Kausalität angemessen ist. Dabei geraten sowohl die Gemeinsamkeiten als auch die Unterschiede verschiedener Wissenschaften in den Blick. Mit spezifischen Fragen zu einzelnen Wissens- bzw. Wissenschaftsbereichen befassen sich

dann die jeweiligen Bereichsphilosophien, so etwa die Philosophie der Biologie, die Philosophie der Psychologie – oder eben die *Philosophie der Physik*.

Generell sind drei Arten der Wissenschaftsreflexion zu unterscheiden, zwischen denen enge Bezüge bestehen: Die oben genannte Wissenschaftsphilosophie oder (allgemeine) *Wissenschaftstheorie* fragt vorrangig nach den Geltungsbedingungen wissenschaftlicher Aussagen und untersucht systematische Aspekte wissenschaftlicher Erkenntnis (z. B. Hypothesenbildung und Falsifizierbarkeit, wie einst von Karl Popper betont). Die *Wissenschaftsgeschichte* fragt dagegen nach den konkreten Entstehungsbedingungen wissenschaftlicher Aussagen und untersucht historische Zusammenhänge beim Erkenntnisgewinn. Hierzu dienen insbesondere Fallstudien zu bedeutsamen Entdeckungen oder zur Entwicklung bestimmter theoretischer Konzepte. Die Wissenschaftsgeschichte liefert Prüfsteine und Beispiele (oder Gegenbeispiele) für wissenschaftstheoretische Thesen und Programme. Und schließlich fragt als drittes die *Wissenschaftssoziologie* nach dem tatsächlichen Verhalten von Wissenschaftlern und dessen gesellschaftlichen und organisatorischen Voraussetzungen.

Für die Weltbildfragen, die von Relativitätstheorie und Quantentheorie aufgeworfen werden, sind weniger die historischen oder soziologischen Aspekte von Interesse, sondern eher systematische Betrachtungen, insbesondere zum Theorieverständnis. Von jeher sind in der Philosophie der Physik außerdem die Debatte um ein angemessenes physikalisches Realitätsverständnis angesichts der relativistischen Raumzeit und die verästelte Interpretationsdebatte um die Quantentheorie zuhause. Somit lassen sich innerhalb der Philosophie der Physik zwei Typen von Fragestellungen unterscheiden: einerseits die wissenschaftstheoretischen und andererseits die naturphilosophischen – je nachdem, ob in erster Linie nach der Arbeitsweise der Physik oder nach dem Aufbau der Natur gefragt wird. Beides wird jedoch bei der Interpretation von Theorien auch wieder aufeinander bezogen.

Die Philosophie der Physik steht zur Physik in einem Meta-Verhältnis und manche ihrer Aussagen wären früher vielleicht in den Bereich der „Metaphysik“ gefallen. In Zeiten einer sinnvollen Arbeitsteilung zwischen Physikern und Philosophen auf der Grundlage eines weithin gesicherten (wenngleich nie völlig sicheren) physikalischen Wissens über die Natur ist es aber wohl treffender, hier von „wissenschaftsbasierter Naturphilosophie“ zu sprechen. Sie umfasst interpretationsbewusste Aussagen über das „Mobilier der Welt“ und deren inhaltliche Synthese zu einem „Weltbild der Physik“.

Die Rolle der Philosophie sei zuletzt noch gegen mögliche Missverständnisse in Schutz genommen: Zwar ist die Wissenschaftsphilosophie

gegenüber der modernen Physik alles andere als sprachlos, aber das heißt keineswegs, dass die analytische Kritikfähigkeit und Methodenkompetenz der Wissenschaftsphilosophie normative Vorgaben gegenüber der Physik begründen würden, etwa in Gestalt von Ratschlägen, „wie am besten zu forschen ist“. Diese werden nicht gegeben und wären nicht willkommen. Andererseits beschränkt sich die Rolle der Philosophen auch nicht darauf, lediglich die Ergebnisse der Physik zusammenzufassen und zu popularisieren. Vielmehr liegt die Schnittstelle von Physik und Philosophie in einer Zone gemeinsamen Interesses mit Fragen und Antworten von beiden Seiten. So ist es auch in diesem Buch.

## 4 Der Reigen der Beiträge

Der Naturwissenschaftsphilosoph *Manfred Stöckler* gibt in seinem einleitenden Beitrag einen Überblick zur Weltbildrelevanz der Quantentheorie. In diesem Rahmen werden quantentheoretische Grundbegriffe wie etwa Zustandsvektor, Superpositionszustand, Verschränktheit, aber auch Unbestimmtheitsrelation und Messprozess erläutert. Wir begegnen dabei Schrödingers Katze und dem berühmten Einstein-Podolsky-Rosen-(EPR-)Paradoxon, das bestimmte Eigenschaftszuschreibungen für quantenmechanische Teilsysteme in einem (gemeinsamen) verschränkten Zustand in Frage stellt. Frühere Weltbilderwartungen in Bezug auf Willensfreiheit, Beobachterbewusstsein, Realismus und Lokalität der fundamentalen Naturbeschreibung werden zu Beginn vorgestellt und am Ende vor dem Hintergrund des heutigen Theorieverständnisses bewertet. Dabei zeigt sich, dass manche ursprünglichen Erwartungen naiv waren und etliche Fragen bis heute umstritten sind. Als besonderes Problem erweist sich die schlüssige Einbettung von Quantenobjekten in Raum und Zeit.

Danach widmet sich der Wissenschaftsphilosoph *Andreas Bartels* der anderen großen Rahmentheorie der modernen Physik, der Relativitätstheorie. Auch hier gibt es Deutungsfragen, die bis heute Diskussionsgegenstand sind und grundlegende Aspekte des Naturverständnisses betreffen. Ganz ohne Formeln nimmt der Beitrag auf die physikalischen Prinzipien Bezug, die der Theoriestructur zugrunde liegen. Diese sind das Relativitätsprinzip für die Wahl des Bezugssystems, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und das Äquivalenzprinzip für Beschleunigung und Gravitation, wobei bei Letzterem eine schwache, eine Einstein'sche und eine starke Version zu unterscheiden sind. Die spannende Frage ist nun, ob die weitverbreitete geometrische Auffassung der Raumzeit, die große Erklärungskraft für

Gravitationseffekte hat, auch nicht-gravitativ Wechselwirkungen umfasst und damit das starke Äquivalenzprinzip impliziert oder nicht. Als Alternative zum rein geometrischen wird ein dynamischer Zugang diskutiert.

Auf diese beiden Grundlagenbeiträge zu Quantentheorie und Relativitätstheorie folgen Vertiefungen, die zwar speziellere Aspekte ansprechen, aber für ein Gesamtverständnis der Theorien und ihrer Aussagekraft gleichwohl wesentlich sind. Den Anfang macht hier der Wissenschaftsphilosoph *Meinard Kuhlmann*. Er geht vom Messproblem der Quantenmechanik aus, das er inhaltlich und mit Bezug auf den quantentheoretischen Formalismus erläutert. Dieses Problem ist Dreh- und Angelpunkt vieler Kontroversen um das Verständnis der Quantenmechanik. Es besteht darin, dass die als vollständige Theorie angesehene Quantenmechanik mit der Schrödinger-Gleichung als einziger Form der Zeitentwicklung von Zuständen keine Beschreibung für das Zustandekommen eindeutiger Messergebnisse liefert. Als Reaktion darauf werden drei Vorschläge für Erweiterungen bzw. Deutungen der Theorie vorgestellt, die in der gegenwärtigen Literatur als aussichtsreich gelten: die stochastische (Zusatz-)Dynamik von Ghirardi, Rimini und Weber (GRW), die Unterfütterung durch nichtlokale verborgene Variablen in der Bohmschen Mechanik (bzw. De-Broglie-Bohm-Theorie) und die Everett- oder Viele-Welten-Interpretation. Der Beitrag verweist zum Schluss auf die philosophischen Bewertungskriterien für solche Theorieansätze und nimmt eine vergleichende Bewertung der drei Vorschläge beispielhaft vor.

Der anschließende Beitrag des Mathematischen Physikers und Quanteninformatikers *Reinhard Werner* setzt sich ausführlich mit den Vorstellungen und Sprechweisen auseinander, die der Quantentheorie angemessen sind und die in der Laborsprache der Physiker tatsächlich verwendet werden. Beides ist nicht deckungsgleich, was aber unter Fachleuten nur selten zu echten Problemen führt. Eine Schlüsselrolle spielt die Frage, inwieweit klassische Eigenschaften zur Beschreibung von Quantensystemen herangezogen werden können. Dies ist bei der Experimentbeschreibung für die Präparier- und Messapparate nützlich und wird hier letztlich pragmatisch gerechtfertigt. An die untersuchten Quantenobjekte klassische Vorstellungen heranzutragen, kann jedoch schnell zu Fehlschlüssen führen. Die Erfahrungen des Autors stützen sich auf die mathematische Struktur der Theorie. So zeigt etwa die Verletzung Bell'scher Ungleichungen die Nichtexistenz lokaler verborgener Variablen, während die stets mögliche statistische Beschreibung von Teilsystemen die Beibehaltung von Lokalitätsannahmen in der Quantentheorie ermöglicht. Zu den kritisch kommentierten Themen gehören ferner das Doppelspalt-Experiment, die

sog. wechselwirkungsfreie Messung, die Bohm'sche Mechanik, Kollaps-theorien und die Wellenfunktion des Universums.

Der Beitrag des Theoretischen Physikers *Gert-Ludwig Ingold* führt zu Eigenheiten der Quantenphysik zurück, die gar nicht umstritten, aber dafür sehr lehrreich sind. Elementarteilchen derselben Sorte, etwa Elektronen, sind ununterscheidbar. Anhand des Verhaltens solcher „Teilchen“ (gemeint sind Quantenobjekte) am halbdurchlässigen Spiegel wird didaktisch aufbereitet, wie sich Bosonen von Fermionen unterscheiden. Der Vorzeichenwechsel der Zweiteilchen-Wellenfunktion bei (formalem) Vertauschen zweier Fermionen begründet, dass sich nie zwei Fermionen in demselben Quantenzustand befinden können – ganz anders als bei Bosonen. Nach Hinweis auf den stets halbzahligen Spin der Fermionen und den stets ganzzahligen Spin der Bosonen werden Grundzüge der Quantenstatistik durch die verschiedenen Möglichkeiten erläutert, wie Energieniveaus besetzt werden können. In der Anwendung auf das Periodensystem der Elemente durch sukzessive Besetzung von Energiezuständen im Atom durch Elektronen zeigt sich die Erklärungskraft der eingeführten Konzepte.

Der Beitrag des Physikdidaktikers *Oliver Passon* ist dem Photonenkonzept gewidmet. Im Gegensatz zur üblichen Einführung des Photons im Schulunterricht durch Planck'sche Energieportionen, Einsteins Lichtquantenhypothese, Photoeffekt und Comptoneffekt wird hier betont, dass Photonen erst im Rahmen der Quantenelektrodynamik auftreten, die relativistisch formuliert ist und zur Beschreibung der genannten Effekte gar nicht benötigt wird. Anders als Elektronen sind Photonen nicht lokalisierbar. Sie können nicht im selben Sinn wie Elektronen durch eine (Einteilchen-)Wellenfunktion beschrieben werden. Daher sind beliebte Analogien zwischen Elektron und Photon im Rahmen des Welle-Teilchen-Dualismus oder beim Doppelspalt-Experiment häufig überzogen. Hinzu kommt, dass die Photonenanzahl in den meisten Zuständen des Lichtfeldes gar keinen scharfen Wert hat, sondern einer quantenmechanischen Überlagerung unterworfen ist. Nach erhellenden physikgeschichtlichen Richtigstellungen und dem eindringlichen Hinweis auf die mangelnden Teilcheneigenschaften des Photons mündet der Beitrag in didaktische Empfehlungen, speziell zum quantenelektrodynamischen Effekt der spontanen Emission.

Die folgenden Beiträge nehmen „das große Ganze“ in den Blick, ohne ausschließlich auf Quantentheorie oder Relativitätstheorie fokussiert zu sein. Der Wissenschaftsphilosoph *Klaus Mainzer* gibt einen Überblick zum grundlegenden Konzept der Symmetrie in der Naturbeschreibung. Von den platonischen Körpern in der antiken Naturphilosophie über die Epizykel- und Deferententechnik in der mittelalterlichen Astronomie bis zu den

Transformationen zwischen Bezugssystemen in der Relativitätstheorie und der (Eich-)Freiheit in der quantentheoretischen Beschreibung der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkung zeigen sich erkenntnisleitende Symmetrieprinzipien. Nach Erläuterung der mathematischen Begriffe Äquivalenzrelation und Transformationsgruppe wird im Beitrag auf die formale Vereinheitlichung der fundamentalen Wechselwirkungen und ihre Relevanz für die Elementarteilchenphysik und Kosmologie eingegangen. Neben den Symmetriegruppen spielen auch Symmetriebrechungen eine entscheidende Rolle, denn ohne sie ließe sich die Vielfalt der Erscheinungen nicht erklären. Das Wechselspiel von Symmetrie und Symmetriebrechung gestattet es dem menschlichen Geist auf einer sehr abstrakten Ebene, dem Aufbau der Natur durch mathematisch formulierte Theorien auf die Schliche zu kommen.

Der Theoretische Physiker *Robert Harlander* behandelt in seinem Beitrag das Standardmodell der Elementarteilchen. Es wurde schrittweise entwickelt mit dem Ziel, alle fundamentalen Wechselwirkungen konsistent zu beschreiben – wobei die Gravitation bisher nicht einbezogen werden konnte. Als nützliches Werkzeug wird das Konzept der Feynman-Diagramme vorgestellt, die keine realen physikalischen Prozesse zeigen, sondern Summanden in der Wahrscheinlichkeitsamplitude zwischen Anfangs- und Endzustand eines Streuprozesses illustrieren. Das Higgs-Boson, die Verletzung der Spiegelsymmetrie und die CKM-Matrix kommen zur Sprache. Die Leitfrage ist dabei, wie sich die unerwarteten Eigenschaften des Standardmodells verstehen lassen und ob es trotz seiner hervorragenden Bewährung als unfertig betrachtet werden muss. Angesichts seiner 19 freien Parameter und seiner Nichtberücksichtigung der Gravitation ist das Bestreben verständlich, eine große vereinheitlichte Theorie zu finden, die über das Standardmodell hinausgeht. Die Forschung hierzu muss und wird weitergehen.

Der nachfolgende Beitrag des Theoretischen Physikers *Claus Kiefer* zeichnet die Erfolge und Probleme nach, die auf dem bisherigen Weg zu einer vollständigen und vereinheitlichten Theorie aller Wechselwirkungen zu beobachten waren. Dabei wird die Rolle von Anfangs- und Randbedingungen in der mathematischen Naturbeschreibung erläutert und auf programmatische Äußerungen Stephen Hawkings Bezug genommen. Das Standardmodell der Teilchenphysik mit seinen Eichsymmetrien wäre mit der Allgemeinen Relativitätstheorie zu vereinheitlichen, die u. a. Gravitationswellen und Schwarze Löcher beschreibt und die Grundlage der modernen Kosmologie bildet. Die Stringtheorie als prominenter Kandidat

für eine Theorie der Quantengravitation leidet jedoch bis heute unter ihrer mangelnden Anbindung an die Empirie.

Der Wissenschaftsphilosoph *Paul Hoyningen-Huene* verfolgt die Frage nach den Erkenntnisgrenzen der Physik in anderer Hinsicht: Nicht innerphysikalische Begrenzungen des Beobachtbaren oder Beschreibbaren sind sein Thema, sondern die grundsätzliche erkenntnistheoretische Frage, ob sich die Physik der Wahrheit über die Natur annähert. Hierbei kann idealtypisch unterschieden werden zwischen einer realistischen Position (die mit „Ja“ antwortet) und einer instrumentalistischen Position (die die Frage für sinnlos erklärt oder verneint). Im Beitrag werden Argumente für die beiden Positionen einander gegenübergestellt: In der Physikgeschichte finden sich Züge der Theorienkonvergenz, aber auch Brüche in den Vorstellungen über die Natur. Erfolgreiche Vorhersagen physikalischer Theorien erscheinen nur dann nicht als Wunder, wenn ihr Gegenstand real ist – andererseits haben sich immer wieder Irrtümer ergeben und Theorien sind durch empirische Daten nie eindeutig festgelegt. Daher bleibt umstritten, wie der Fortschritt der Physik zu verstehen ist.

Der letzte Buchbeitrag ist dem spektakulären Konzept des Multiversums gewidmet. Der Wissenschaftsjournalist *Rüdiger Vaas* nimmt die vielfältigen physikalischen Kontexte in den Blick, in denen in der Literatur Multiversum-Hypothesen vorgeschlagen wurden. Diese reichen von den Singularitäten in der Allgemeinen Relativitätstheorie über die Richtung der Zeit bis zur „Feinabstimmung“ von Naturkonstanten, die in unserem Universum erst Leben ermöglichen. Multiversum-Szenarien könnten eine Erklärung finden im Vielwelten-Zugang zum Messproblem der Quantenmechanik oder im Rahmen der kosmischen Inflation oder in der mathematischen Vielgestaltigkeit der Stringtheorie. Der Beitrag verheimlicht nicht, dass alle diese Szenarien höchst spekulativ sind. Neben begrifflichen Abweichungen und charakteristischen Merkmalen der verschiedenen Multiversum-Vorschläge wird auf die wissenschaftstheoretischen Kriterien eingegangen, die zur Beurteilung solcher Vorschläge nötig sind und bereitstehen.

Der Gang durch die Beiträge macht deutlich, dass das Weltbild der Physik auf der Grundlage unserer empirisch am besten bestätigten Theorien einerseits rational verhandelt werden kann und andererseits trotzdem keineswegs unstrittig ist. Der Präzision des mathematischen Formalismus steht eine gewisse Argumentationsfreiheit bei Deutungsfragen gegenüber. Im vorliegenden Buch wird dies etwa beim Vergleich spürbar, wie sich Kuhlmann, Werner und Vaas jeweils zur Vielwelten-Interpretation der Quantenmechanik äußern oder wie Bartels, Kuhlmann und Werner auf den

jeweils zitierten Maudlin Bezug nehmen. Doch nicht nur im Bereich der Deutung, auch im Theoriengefüge der Physik selbst sind fundamentale und spannende Fragen offen – etwa zur Vereinheitlichung, zur Dunklen Materie oder zur Dunklen Energie. Die Arbeit am Weltbild der Physik kann daher nicht abgeschlossen sein. Möge sie weiterhin profitieren vom engen Kontakt zwischen Natur- und Geisteswissenschaft, von fruchtbaren Wechselwirkungen zwischen Physik und Philosophie.

## Weiterführende Literatur

Die folgenden Literaturtipps nennen knappe populärwissenschaftliche Einführungen zu den physikalischen Grundlagen der in diesem Buch behandelten Themen, die trotz ihres Alters weiterhin empfehlenswert bleiben:

Audretsch, Jürgen: Die sonderbare Welt der Quanten. Eine Einführung. Beck'sche Reihe, C.H. Beck, München (2008).

Giulini, Domenico: Spezielle Relativitätstheorie. Reihe Fischer Kompakt, S. Fischer, Frankfurt a. M., 2. Aufl. (2006), unv. Nachdruck (2014).

Ingold, Gert-Ludwig: Quantentheorie. Beck'sche Reihe, C.H. Beck, München, 5. Aufl. (2015).

Kiefer, Claus: Gravitation. Reihe Fischer Kompakt, S. Fischer, Frankfurt a. M. (2003).

Scarani, Valerio: Physik in Quanten. Eine kurze Begegnung mit Wellen, Teilchen und den realen physikalischen Zuständen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2007).

Zeilinger, Anton: Einsteins Schleier. Die neue Welt der Quantenphysik. C.H. Beck, München 2003. Als Taschenbuch: Goldmann, München (2005).

Zu grundlegenden Themen der Philosophie der Physik sei auf die folgenden Buchveröffentlichungen hingewiesen:

Esfeld, Michael (Hrsg.): Philosophie der Physik. Reihe stw, Surkamp, Berlin (2012).

Friebe, Cord, Kuhlmann, Meinard, Lyre, Holger, Näger, Paul, Passon, Oliver und Stöckler, Manfred: Philosophie der Quantenphysik. Einführung und Diskussion der zentralen Begriffe und Problemstellungen der Quantentheorie für Physiker und Philosophen. Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg (2014), 2. Aufl. mit neuem Untertitel: Zentrale Begriffe, Probleme, Positionen (2018).

Mittelstaedt, Peter: Philosophische Probleme der modernen Physik. Bibliographisches Institut, Mannheim (1961), 7. Aufl. (1989).

Sieroka, Norman: Philosophie der Physik. Eine Einführung. Beck'sche Reihe, C.H. Beck, München (2014).

Schließlich seien noch zwei einschlägige Veröffentlichungen der Herausgeber dieses Buches genannt:

Fink, Helmut: Die Quantenwelt – unbestimmt und nichtlokal? Physik in unserer Zeit **35**(4), 168–173 (2004).

Kuhlmann, Meinard: Was ist real? Spektrum der Wissenschaft, Juli 2014, 46–53 (2014).



# Revolution mit Hindernissen

## Der steinige Weg von der neuen Physik zu einem neuen Weltbild

Manfred Stöckler

### 1 Einleitung

Man hat oft von der Revolution im Weltbild der Physik gesprochen, die durch die Relativitätstheorie und die Quantentheorie ausgelöst worden ist. Bücher über das Naturbild der heutigen Physik beschränken sich meist nicht auf die Darstellung von Grundstrukturen und Ergebnissen der Physik in einer Sprache, die einem größeren Kreis von Leserinnen und Lesern zugänglich ist, sondern thematisieren auch die Folgen, die die neuen physikalischen Theorien für allgemeinere Fragen haben. Zeigt die Quantentheorie z. B., dass der Determinismus der klassischen Physik aufgegeben werden muss? Können Teilchenbahnen und zeitlich sich verändernde Felder weiter als grundlegende Werkzeuge zur Beschreibung von Bewegungen verwendet werden? Müssen wir uns vielleicht sogar von der Vorstellung der objektiven Realität der Elementarteilchen verabschieden? Zweifellos sind Relativitätstheorie und Quantentheorie relevant für die Naturphilosophie und wichtig, wenn man nach einer kohärenten Gesamtansicht der Natur strebt. Aber sind die Änderungen in den metaphysischen, erkenntnistheoretischen und methodischen Annahmen, die in die naturwissenschaftliche Forschung eingehen, wirklich so einfach aus den Theorien der Physik ablesbar?

---

M. Stöckler (✉)

Institut für Philosophie, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

E-Mail: [stoeckl@uni-bremen.de](mailto:stoeckl@uni-bremen.de)