PERFORMANCE
PHILOSOPHY

IMMANENZ IN DER PHYSIK

TANJA TRAXLER UNIVERSITÄT WIEN

Von der Autorin vom Englischen ins Deutsche übersetzt

Einleitung

Der Raum ist nicht nur ein sehr spezielles Forschungsthema in der Physik, da er nicht erlaubt, mit der gängigen Methode der physikalischen Forschung fortzufahren, wonach die beobachteten Objekte so gut als möglich von ihrer Umwelt isoliert werden. Dadurch treffen philosophische Betrachtungen ins Herz der Physik. Weiters ist der Raum derzeit ein hochrelevantes Forschungsthema, da er von zentraler Bedeutung ist, um eine Vereinheitlichung von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie zu entwickeln. Die Tatsache, dass eine solche Theorie bisher noch nicht gefunden worden ist, liegt auch darin begründet, dass diese beiden Theorien auf vollkommen unterschiedlichen Raumkonzeptionen basieren.

Albert Einstein hat zwischen zwei Raumkonzepten differenziert, die sich vor allem in der Relation von Raum und Objekten unterscheiden. Diese sind (a) der Raum als eine Qualität der Position in der Welt von materiellen Objekten und (b) der Raum als Container von allen materiellen Objekten (Vgl. Jammer (1954) 1993, xv).

In Konzept (a) ist der Raum ohne materielle Objekte undenkbar, daher sind die Objekte in gewisser Weise dem Raum überlegen. Im Fall (b) dagegen kann ein Objekte nur als im Raum existierend erdacht werden, daher erscheint der Raum wie eine Realität, die der materiellen Welt überlegen ist.

Die gängige Struktur, die Geschichte der Raumkonzeptionen in der Physik zu präsentieren, ist der Gegensatz von *absolutem* und *relativem* Raum. Das ist zwar prinzipiell ein vernünftiger Zugang, aber wie viele Autor*innen gezeigt haben, ist diese anhaltende Klassifizierung zu einer Falle für die Untersuchung der Raumkonzepte geworden. Daher erscheint es aussichtsreicher, die Geschichte der Raumkonzepte mit einem anderen Framework erneut zu lesen, das in diesem Aufsatz vorgestellt werden soll, nämlich *immanente* und *transzendente* Raumkonzepte. Dabei korrespondieren transzendente Raumkonzepte mit Einsteins Konzept (b), während der Begriff von Immanenz in Referenz zu Einsteins Konzept (a) entwickelt werden wird.

Sowohl Transzendenz wie auch Immanenz haben eine lange Geschichte als philosophische Konzepte, die in sehr verschiedenen Bereichen Anwendung gefunden haben, beginnend bei theologischen Diskursen bis zu künstlerischer Forschung—kaum hingegen im Kontext von Raumforschung. Was den Raum betrifft, waren die Konzepte von absolut und relativ bei weitem dominanter in den vergangenen Jahrhunderten. Als Folge ihrer beständigen Anwendung erscheinen sie zum jetzigen Zeitpunkt zu abgenutzt, um davon einen neuen Beitrag in der Konzeptualisierung von Raum zu erwarten.

Komplementäre statt widersprüchliche Raumkonzepte

In einer jahrhundertealten Debatte gefangen, erscheint es, dass absolute und relative Betrachtungen des Raums eher ein *widersprüchliches* als ein *komplementäres* Framework bieten. Die Komplementarität wurde von Niels Bohr entwickelt und obwohl die Bedeutung dieses Konzepts für die Interpretation der Quantentheorie weithin anerkannt ist, sollte nicht vergessen werden, dass es schwer verständlich ist; seine Interpretation ist fortwährend Gegenstand der Literatur. Eine prominente Kritik kam von Einstein, der sich beschwerte, dass er „trotz enormer Anstrengung“, die er für Bohrs Komplementaritätsprinzip aufgewendet hatte, „nicht in der Lage war, eine scharfe Formulierung davon zu erreichen“ (vgl. Schilpp 2000, eigene Übersetzung).

Bohr hat das Konzept der Komplementarität erstmals bei einem Vortrag beim *International Physics Congress* in Como, Italien, im Jahr 1927¹ vorgestellt. Kurze Zeit später wurde es publiziert—auf Deutsch in *Naturwissenschaften* und in Englisch in *Nature*. Diese Publikation beginnt Bohr mit dem *Quantenpostulat*—ein Prinzip, das auf die Bohr-Sommerfeld-Quantisierungsregeln zurückgeht, wonach jede Veränderung in der Bewegung in der Einheit von Drehmomenten ein ganzzahliges Vielfaches der Planck-Konstante sein muss (vgl. Saunders 2005, 421). Von diesem Quantenpostulat leitet Bohr ab, dass „jede Beobachtung atomarer Phänomene eine nicht zu vernachlässigende Wechselwirkung mit dem Messungsmittel fordert“ (Bohr 1927, 35). Daher erachtet es Bohr als unmöglich, den beobachteten Phänomenen eine eigenständige Realität zuzuschreiben. Als Folge davon haben Objekte komplementäre Eigenschaften, die nicht exakt zur selben Zeit gemessen werden können. Bohr fasst das Konzept der Komplementarität mit folgenden Worten zusammen:

In der Tat stellt uns bei der Beschreibung der atomaren Phänomene das Quantenpostulat vor die Aufgabe der Ausbildung einer „Komplementaritätstheorie“, deren Widerspruchsfreiheit nur durch das Abwägen

der Definitions- und Beobachtungsmöglichkeiten beurteilt werden kann. (Bohr 1927, 36)

Laut Bohr ist nicht der Widerspruch, sondern die Komplementarität ein wesentliches Prinzip der Quantenphysik. Für ihn gab es keinen Zweifel, dass das Konzept der Komplementarität wichtig für die Physik und für die Philosophie ist (vgl. Saunders 2005, 418). *Die These dieses Papers ist, dass es eher die Begriffe von Immanenz und Transzendenz als von Absolutheit und Relativität sind, die ein komplementäres Framework der Beschreibung des Raums bieten.* Dabei ist es wichtig anzumerken, dass Komplementarität hier nicht im strikten Bohrschen Sinn gemeint ist. Bezieht sich Bohrs Prinzip der Komplementarität in erster Linie auf Größen, die gemessen und beobachtet werden, wie Ort und Impuls, wird in diesem Aufsatz das Konzept der Komplementarität in einem übertragenen Sinn verwendet—es bezieht sich nicht auf streng messbare Größen, sondern auf konzeptuelle Aspekte.

Die Gegensätzlichkeit von absoluten und relativen Raumkonzepten scheint keinen Platz für Komplementarität zu lassen: Eine absolute Konzeption, in der der Raum nicht von Objekten beeinflusst ist, erlaubt unter keinen Umständen eine relative Konzeption. Im Gegensatz dazu können transzendente und immanente Raumkonzepte als komplementäres Framework verstanden werden. Dabei bezeichnen transzendente Raumkonzepte eine umgebende Metastruktur, die vor oder unabhängig von materiellen Phänomenen existiert, während der Raum in einer immanenten Konzeption nicht unabhängig von den Objekten existiert und erst durch ihre Relationen geschaffen wird. In diesem Sinne ist die immanente Konzeption näher an der relativen Konzeption, während die transzendente Konzeption viele Ähnlichkeiten mit der absoluten Raumkonzeption zeigt—abgesehen vom absolut unveränderlichen Charakter, die mit jeder relativen oder immanenten Beschreibung unvereinbar ist.

Als Paradebeispiel einer transzendenten Raumkonzeption wird in diesem Paper Isaac Newtons Raumtheorie diskutiert werden, wie auch das mathematische Framework, in dem Newton seine Physik entwickelt hat: der Euklidische Raum. Andererseits wird als Rolemodel für eine immanente Raumkonzeption Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie analysiert werden, wie auch die Geometrie, die ihr zugrunde liegt: Riemanns Differentialgeometrie.

Wie hält man's mit Geschichte?

Es stellt sich allerdings die Frage, inwiefern eine historische Analyse relevant ist für die heutige Forschungspraxis. Als Philosoph*in der Physik ist man gleich zu Beginn mit der Gretchenfrage konfrontiert: „Wie hält man's mit Geschichte?“ Während in der disziplinären Praxis der Physik das Wissen des aktuellsten wissenschaftlichen Paradigmas das Wissen aller früheren Konzeptionen als überholt erscheinen lässt, verhält es sich in der Philosophie offenbar ganz umgekehrt. Ein tiefes Verständnis der aktuellsten Konzepte kann nur erreicht werden im Wissen um deren etymologische Geschichte.

Damit soll gesagt werden, dass die Physik im Gegensatz zur Philosophie eine ahistorische Disziplin ist in dem Sinne, dass in ihrer Forschungspraxis historisches Wissen über die verwendeten Konzepte nur eine untergeordnete Rolle spielt. Aber was bedeutet das für die Philosophie der Physik, in der eine Methodologie, die fundamental in historischen Studien begründet liegt, auf eine wissenschaftsgeschichtliche Vergessenheit stößt?

In der derzeit vorherrschenden Verbindlichkeit zu ihrem Fortschritt lässt die Wissenschaft ihre eigene Geschichte zurück. In ihrer Jagd nach frischen Resultaten scheint die Wissenschaft zu vergessen, dass es nur eine Minderzahl an wissenschaftlichen „Wahrheiten“ sind, die erhalten bleiben. Aber diese ahistorische und kurzfristig ausgerichtete Tendenz der Wissenschaft sollte nicht unhinterfragt akzeptiert werden; es gibt einen Bedarf an Untersuchungen und Interpretationen von einer Art, wie sie die Wissenschaft selbst nicht leisten kann (vgl. Olby, Cantor, Christie und Hodge 1990, xix).

Auch wenn sich Physiker*innen in der Praxis des Experimentierens und Rechnens nicht immer dessen bewusst sind, die Physik ist als Teil der Wissenschaft ein Projekt, dass Menschen über Generationen hinweg und jahrhundertlang verfolgt haben. Arkady Plotnitsky rezipiert die Geschichte der Wissenschaft als *Trajektorien*² (*trajectories*)—manche von ihnen sind kürzer, andere länger—und weist darauf hin, dass jede physikalische Theorie ihre Trajektorie hat:

History is unavoidable in physical thinking, which always builds on preceding thinking in physics, even at the time of new discoveries, however revolutionary or historically unexpected the latter may be. Every physical idea has a history, some trajectories of which may be short and others quite long, sometimes, as in the case of the idea of motion, extending to ancient thought. (Plotnitsky 2012, ix–x)

Anders gesagt: Ein Argument für die Wissenschaftsgeschichte kann aus der Erklärungskraft der Geschichte für die Gegenwart abgeleitet werden (vgl. Olby et al. 1990, xviii). Der/Die Wissenschaftler*in ist abhängig von Mitteln, die es erlauben, weite Zeitabschnitte zu überblicken, da die wissenschaftlichen Resultate nicht nur für den Moment halten sollten, sondern im besten Fall ganz generell. Und da „die Gegenwart eine kurzweilige Angelegenheit und die Zukunft unzugänglich ist, ist die Vergangenheit die einzige Langfristigkeit, zu der wir Zugang haben“ (ebenda, xviii, eigene Übersetzung).

Klarerweise sollte die historische Analyse nicht annehmen, dass Raum und Ort dieselbe Bedeutung haben, beispielsweise in Newtons Physik wie in Einsteins, aber die Relevanz von Einsteins Konzeptionen von Raum und Ort gewinnt an Bedeutung durch die Betrachtung der Kritik, die sie an Newton leistet.

Wenn man die Bezüge der Newtonschen Mechanik mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie betrachtet, ist es entscheidend zu erkennen, dass Einstein Newtons Theorie nicht abgeschafft hat—wie oftmals fälschlicherweise behauptet wird. Im Gegenteil, Newtons Theorie ist immer noch ein Bestandteil von Einsteins Theorie für den Grenzfall von niedrigen Geschwindigkeiten (im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit) und Durchschnittsmassen (nicht so klein wie ein Atom, nicht so groß wie ein Planet). In diesem Sinne erscheint der Übergang von Newton zu Einstein nicht als ein

strenger Paradigmenwechsel, im Zuge dessen das einstige wissenschaftliche Paradigma vollständig von einem neuen Paradigma ersetzt wird, sondern vielmehr hebt die neue Theorie die Gültigkeitsgrenzen der alten hervor.

In seinem Vorwort zu Jammers Abhandlung drückt Albert Einstein seine Dankbarkeit als Wissenschaftler zu historischen Aufarbeitungen wissenschaftlicher Konzepte aus. Laut Einstein ist der Historiker in der Lage, Sichtweisen der Wissenschaftler*innen zu korrigieren, die „rein intuitiven Ursprung“ (Jammer 1954, 1993, xiv, eigene Übersetzung) haben. Das vollständige Zitat seiner Aussage soll als Prolog der folgenden Analysen vorangestellt werden:

If two different authors use the words "red," "hard," or "disappointed," no one doubts that they mean approximately the same thing, because these words are connected with elementary experiences in a manner which is difficult to misinterpret. But in the case of words such as "place" or "space," whose relation with psychological experience is less direct, there exists a far-reaching uncertainty of interpretation. The historian attempts to overcome such uncertainty by comparison of the texts, and by taking into account the picture, constructed from literature, of the cultural stock of the epoch in question. The scientist of the present, however, is not primarily trained or oriented as a historian; he is not capable of forming nor willing to form his views on the origin of the fundamental concepts in this manner. He is more inclined to allow his views on the manner in which the relevant concepts might have been formed, to arise intuitively from his rudimentary knowledge of the achievements of science in the different epochs of history. He will however, be grateful to the historian if the latter can convincingly correct such views of purely intuitive origin. (ebenda, xiv)

Transzendente Raumkonzepte

In der modernen Wissenschaftssprache erscheinen Charakterisierungen des Raumes als kontinuierlich, quantisiert, homogen, isotrop, flach oder gekrümmt als selbstverständlich. Nichtsdestotrotz müssen wir bedenken, dass diese Eigenschaften unserer sinnlichen Wahrnehmung nicht direkt zugänglich sind. Sie sind daher das Ergebnis eines langen Abstraktionsprozesses, dessen Ursprünge sogar noch vor der antiken griechischen Philosophie beginnen (ebenda, 138).

Mit der Formalisierung durch Euklid von Alexandria im sechsten Jahrhundert v. Chr. basierte die Konzeption von Raum in der Geometrie. Euklid beschrieb sein mathematisches System in einem Lehrbuch über Geometrie mit dem Namen *Elemente*, das mit der Annahme von einer kleinen Anzahl an Axiomen beginnt und daraus eine Reihe an Propositionen ableitet. Da die *Elemente* zu großen Teilen eine Sammlung von Erkenntnissen früherer Mathematiker sind, sind manche der bekanntesten Propositionen des Buches keine Entdeckungen Euklids, wie etwa der Satz des Pythagoras, demzufolge in einem rechtwinkligen Dreieck die Summe der Flächeninhalte der Kathetenquadrate gleich dem Flächeninhalt des Hypotenusenquadrats ist; oder der Satz des Thales, der besagt: Wenn A, B und C die Eckpunkte eines Dreiecks sind und AC ein Kreisdurchmesser ist, dann ist bei B immer ein rechter Winkel.

Laut Euklid ist der Raum unendlich, homogen (was bedeutet, dass jeder Punkt in ihm wie jeder andere ist) und isotrop, daher sieht er aus allen Richtungen gleich aus (vgl. Riemann und Jost 2016, 9).

Newton's transzendente Raumkonzeption

Eine physikalische Theorie, die auf der Euklidischen Geometrie beruht, ist die Newtonsche Mechanik. Im Verständnis von Isaac Newton ist der physikalische Raum fundamental unabhängig von den Körpern,³ von denen er bevölkert ist. Weiters besitzt der Raum ontologische Priorität gegenüber den Körpern: Weder krümmen oder verzerren Körper Gegenden im Raum, die sie besetzen, noch sind sie eine Voraussetzung für die Existenz von Raum. Für Newton dient der Euklidische Raum als unveränderlicher Container, in dem Objekte—stimuliert durch Kräfte—, bewegt werden können (vgl. ebenda, 12). Durch die Formulierung der Klassischen Mechanik in seiner *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (erstmalig 1687 publiziert) hat Newton nicht nur den Weg für die moderne Naturwissenschaft bereitet, sondern auch Philosophen inspiriert. Am bemerkenswertesten ist an seiner Mechanik, dass es die erste wissenschaftliche Theorie war, die Bewegungen von Planeten mit denselben Mitteln und im selben Framework beschrieben hat wie die Bewegung von Körpern auf der Erde.

Daher gilt die Newtonsche Mechanik bis heute als Paradebeispiel für den ökonomischen Charakter einer wissenschaftlichen Theorie: Newtons Gravitationsgesetze sind in der Lage, sehr verschiedene Phänomene zusammenzudenken, angefangen beim berühmten Apfel, der vom Baum fällt, bis hin zu Planetenbewegungen, und diese mit Mitteln von wenigen und simplen Prinzipien zu beschreiben.

Verschiedene Phänomene auf ein paar einfache Prinzipien zurückführend, entwarf Newton die Idee, dass die Gravitation im Prinzip als Kraft verstanden werden kann. Das wird im Abschnitt XI von Newtons *Principia* explizit, wo er feststellt, dass „Anziehungskräfte auf Körper wirken“ (Newton (1687) 1846, 218, eigene Übersetzung), was der Gravitation entspricht. Im Vorwort zur zweiten Ausgabe der *Principia*, lobt Roger Cotes Newtons Konzept der Gravitation: „This is that incomparably best way of philosophizing, which our renowned author most justly embraced before the rest; and thought alone worthy to be cultivated and adorned by his excellent labours. [...] That the virtue of gravity of found in all bodies, others suspected, or imagined before him; but he was the only and the first philosopher that could demonstrate it from appearances, and make it a solid foundation to the most noble speculations.“ (Newton (1687) 1729, xvi)

Newton hat das Verständnis des Raumes vom 17. Jahrhundert an dominiert, bis es Anfang des 20. Jahrhunderts von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie zur Seite gedrängt worden ist. Nichtsdestotrotz hat die Newtonsche Mechanik immer noch enorme Bedeutung, bis heute wird in Debatten auf sie Bezug genommen.⁴

In der Übersetzung der *Principia* von Jakob Philipp Wolfers vom Lateinischen ins Deutsche, lesen sich die Gesetze der Newtonschen Mechanik wie folgt (Newton (1687) 1872, 32):

1. **Gesetz.** Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.
2. **Gesetz.** Die Aenderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.
3. **Gesetz.** Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkung zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

Interessanterweise verlangt oder basiert keines dieser drei Gesetze der Newtonschen Mechanik explizit auf einer absoluten Raumkonzeption. Vielmehr macht es den Anschein, dass es Newtons persönliche Wahl ist, den absoluten Charakter des Raumes vorzuschlagen—es ist kein Argument, dass sich unmittelbar aus den Gesetzen seiner Mechanik ergibt.

Dass der absolute Charakter von Newtons Raum fraglich ist, kann noch durch ein weiteres Argument erkannt werden: Zu Beginn des 20. Jahrhunderts hat Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie gezeigt, dass Newtons Theorie nicht gänzlich falsch ist, sondern dass sie nur in einem relativ kleinen Bereich funktioniert, nämlich für Geschwindigkeiten, die viel kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit, und für Massen, die wesentlich größer sind als Atome aber kleiner als Planeten. Nachdem sich die absolute und die relative Konzeption gegenseitig ausschließen, können sie nicht graduell in einander überführen, folglich ergibt sich ein Widerspruch, wenn man einen Körper betrachtet, etwa eine Rakete, die sich graduell von einer Newtonschen Bewegung zu einer Geschwindigkeit, die nur noch adäquat mit den Gesetzen der Relativitätstheorie beschrieben werden kann. Diese graduelle Veränderung würde einen stetigen Übergang von einer absoluten Raumbeschreibung zu einer relativen erfordern, was per Definition unmöglich ist.

Vielmehr als der fragwürdige absolute Charakter von Newtons Raum ist für diesen Aufsatz sein offensichtlicher transzendenter Charakter von Interesse: In Newtons Verständnis fungiert der Raum als umgebende Metastruktur, die die materiellen Körper übersteigt—eine Konzeption, die zurückgeht auf antike Denker wie Euklid, die aber auch in zeitgenössischen Raummodellen zu finden ist.

Die transzendente Konzeption des Raums, die hinter Newtons Physik liegt, ist die Euklidische Geometrie, derer sich Newton eloquent bedient hat, um das physikalische Universum mathematisch zu beschreiben. Im Gegensatz zur Riemannschen Geometrie basiert die Euklidische Geometrie auf der Annahme, dass es stets einer weiteren Dimension bedarf, um die Geometrie eines Objektes zu beschreiben: ein eindimensionales Objekt wie ein Punkt bedarf eines zweidimensionalen Koordinatensystems, um es in der Euklidischen Geometrie beschreiben zu können; ein zweidimensionales Objekt verlangt ein dreidimensionales Koordinatensystem und so weiter. Der transzendente Charakter der Newtonschen Raumkonzeption wird ersichtlich in seiner zentralen Annahme, dass der Raum fundamental verschieden von Materie und Zeit ist. Aus dieser

Annahme leitete Newton den „absoluten Raum“ ab. Zur Illustration von Newtons Konzept eines festen und absoluten Raumes siehe Abb. 1.

(a) Ohne massive Körper.

(b) Mit massivem Körper.

Abbildung 1: In Newtons Konzeption des absoluten Raums verändert sich die Struktur des Raums nicht abhängig davon, ob er von Körpern bevölkert ist (b) oder nicht (a). Credit: Tanja Traxler.

Im *Scholium* der *Principia* unterscheidet Newton den absoluten Raum von der Art, wie Raum gemessen wird, was er „relative Räume“ nennt. Der absolute Raum bleibt „stets gleich und unbeweglich“ (ebenda, 25) ohne Beziehungen zu äußeren Körpern⁵ —damit erfüllt er die Eigenschaften einer transzendenten Konzeption, wie sie zuvor beschrieben worden ist. Diese Art von Raum ist nicht zugänglich mittels Beobachtung, sondern eine rein theoretische Entität. Daher kann die Struktur des absoluten Raums als absolutes Bezugssystem aufgefasst werden, eine absolute Struktur, die notwendigerweise den physikalischen Ereignissen zugrunde liegt und daher nicht aufgegeben werden kann. Mathematisch gesprochen ist man damals davon ausgegangen, dass es sich bei dieser unveränderlichen Struktur um den dreidimensionalen Euklidischen Raum handelt, der gewöhnlich mit dem Zeichen E^3 beschrieben wird (vgl. Earman 1989, 9).

Im Gegensatz dazu ist der relative Raum für Newton „ein Maass oder ein beweglicher Theil“ (Newton (1687) 1872, 25) des absoluten Raums. In der modernen Wissenschaftssprache ähneln Newtons relative Räume einem Maßstab. Sie sind daher die Hilfsmittel, die unserer Beobachtung Räumlichkeit zugänglich machen. Relative Räume sind in Bezug auf Körper definiert, daher befinden sie sich mit großer Wahrscheinlichkeit in Bewegung (vgl. Rynasiewicz 2014)—ganz im Gegensatz zum absoluten Raum.

Newtons absoluter Raum bleibt unverändert durch die Anwesenheit eines/einer Beobachter*in (eine Hypothese, die einige Jahrhunderte später von der Quantenmechanik in Frage gestellt werden wird) oder Objekten (eine Hypothese, die von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie attackiert werden wird). Laut Newton bewegt sich jeder Körper relativ zum absoluten Raum.

Im *Scholium* entwirft Newton ein Argument für die Absolutheit des Raums im Abschnitt VI. Dieses Argument basiert auf der Annahme, dass der Raum analog zur Zeit behandelt werden kann. Wie Newton feststellt, verändern sich Teile des Raums, so wie auch Teile der Zeit, in Beziehung

zueinander: Heute wird immer vor morgen sein. In analoger Weise würde von Räumen, die aus ihrem Ort bewegt werden, verlangt werden, dass sie aus sich selbst heraus bewegt werden, was Newton als *absurd* bezeichnet: „All things are placed in time as to order of succession; and in space as to order of situation. It is from their essence or nature that they are places; and that the primary places of things should be moveable, is absurd.“ (Newton (1687) 1846, 79)

Bevor wir die zeitgenössische transzendente Konzeption des Raumes betrachten, sollte hier erwähnt werden, dass Newtons Konzepte von Raum und Zeit dominant waren, aber seit jeher mit Kritik konfrontiert waren. Während des 17. Jahrhunderts waren Christian Huygens und Gottfried Wilhelm Leibniz Newtons prominenteste Gegner. Während Huygens seine Bedenken in privaten Korrespondenzen ausgedrückt hat, hat Leibniz öffentliche Attacken vorangetrieben, auf die sich Newton geweigert hat, in der Öffentlichkeit zu antworten. Als Folge davon kam es zur berühmten Leibniz-Clarke-Debatte, in der Samuel Clarke als Fürsprecher Newtons fungierte. Obwohl Leibniz' Ideen sich Jahrhunderte später als einflussreicher herausstellen sollten, zur Zeit ihrer Debatte gewann Newton aufgrund der Überlegenheit seines Kraftbegriffs (Vgl. Riemann und Jost 2016, 14).

Bis heute sind Diskurse um Raumkonzepte dominiert von einer absolut-relativ-Dichotomie, die bis zu Newtons Denken zurückreicht. Laut Earman betrifft diese Kontroverse nicht nur den Raum, sondern „berührt einige der fundamentalsten Angelegenheiten der Grundlagen der Physik, Metaphysik und wissenschaftlichen Epistemologie“ (Earman 1989, 2, eigene Übersetzung). Ihm folgend ist das sowohl Grund für Besorgnis wie auch für Hoffnung: „Besorgnis, denn die absolut-relativ-Kontroverse kann nicht gelöst werden, wenn nicht zuvor die großen Fragen der Metaphysik und Epistemologie gelöst worden sind, es ist nicht wahrscheinlich, dass sie gelöst wird; und Hoffnung, da eine Lösung, in der absolut-relativ-Kontroverse voranzukommen, zu einem Fortschritt bei den großen Fragen führen kann.“ (ebenda, 9, eigene Übersetzung)

Transzendente Eigenschaften zeitgenössischer Theorien

Während die Raumkonzeption hinter der Allgemeinen Relativitätstheorie als immanente Beschreibung des Raumes charakterisiert werden kann, ist der Sachverhalt im Falle der Quantenmechanik weniger klar. Für Diskussionen dieser Thematik ist es hilfreich, zwischen dem mathematischen Raum des quantenmechanischen Formalismus,⁶ dem Hilbertraum, und dem Raumkonzept, das sich aus Beobachtungen quantenmechanischer Phänomene ableitet, das in diesem Aufsatz als *phänomenologischer Raum* bezeichnet wird, zu unterscheiden.

Der Hilbertraum kann als Verallgemeinerung des Euklidischen Raums beschrieben werden: Er erweitert die Methoden von Algebra und Infinitesimalrechnung des zwei- oder dreidimensionalen Euklidischen Raums zu Räumen mit einer beliebigen endlichen oder gar unendlichen Anzahl an Dimensionen. Nachdem er die Struktur eines inneren Produkts besitzt, das erlaubt, Längen und Winkel zu messen und da es genügend Grenzwerte im Raum gibt, die erlauben, die Techniken der Infinitesimalrechnung zu nutzen, kann der Hilbertraum wie auch der Euklidische Raum eher als transzendentes denn als immanentes Raumkonzept eingeordnet werden.

Auch wenn man den phänomenologischen Raum der Quantenmechanik betrachtet, wird eher der transzendente als der immanente Charakter augenfällig—zumindest wenn man die Zeichnungen ansieht, die Physiker*innen von ihren experimentellen Setups anfertigen. Aus praktischen Gründen ist die Idee dahinter eher, mit dem Raum zu beginnen, der auf einem Experimentiertisch verfügbar ist und darin die verschiedenen Komponenten, die für das Experiment gebraucht werden wie Polarisationsfilter oder Laser (die transzendente Konzeption), als den Raum des Experimentierens aus den Bezügen der verschiedenen Objekte und Personen, die im Experiment involviert sind, entstehen zu lassen (die immanente Konzeption).

Wozu ist der transzendente Raum aber nun eigentlich gut? In diesem Abschnitt ist demonstriert worden, dass transzendente Raumkonzepte mit dem Postulat beginnen, dass Raum als Metastruktur gesetzt werden kann, die der Beobachtung nicht direkt zugänglich ist, die aber als Ordnungsstruktur materieller Objekte dienen kann.

Die Vorteile der transzendenten Raumkonzeption sind daher eng verbunden mit den Vorteilen, die John Earman im absoluten Raum identifiziert: „Der absolute Raum ist eine theoretische Entität; das bedeutet, eine Entität, die der Beobachtung nicht direkt zugänglich ist. Es gibt dennoch gute wissenschaftliche Gründe, diese Entität zu postulieren, denn die Erklärung verschiedener Phänomene, die beobachtbar sind, besonders jene, die Rotation beinhalten, verlangen nach einem absoluten Konzept von Bewegung, das wiederum in einem absoluten Raum begründet sein muss.“ (ebenda, 10–11, eigene Übersetzung)

Analog dazu gilt für transzendente Konzeptionen des Raums, dass sie—obwohl sie empirisch nicht gut begründet sind—eine Erklärungskraft für bestimmte Konfigurationen haben. Zum Beispiel ist in einer Laborsituation die transzendente Konzeption intuitiver und passender als eine Darstellung, die auf einer immanenten Konzeption basiert, in der der Experimentierraum aus den beteiligten Objekten entstehen würde.

Charakteristika dieser zweiten Konzeption werden im nächsten Abschnitt besprochen.

Immanente Raumkonzepte

Im Gegensatz zu transzendenten Raumkonzepten, in denen Raum eine Metastruktur für die zeitlich veränderliche Anordnung von Körpern und Ereignissen darstellt, basieren immanente Raumkonzepte nicht auf der Annahme, dass Raum ohne Körper überhaupt existiert. Der Raum ist schon in der antiken griechischen Philosophie Gegenstand intellektueller Fragestellungen, und beide Konzepte—das eines transzendenten und eines immanenten Raums—sind bereits dort zu finden.

Sich von den Betrachtungen primitiver Gedanken, in denen Raumkonzepte nicht unabhängig von der Erfahrung des Raumes behandelt worden sind, emanzipierend, hatte auch in der Pythagoreischen Geometrie der Raum noch keine physikalischen Implikationen, abgesehen davon, als limitierende Kraft zwischen Körpern zu dienen (vgl. Jammer (1954) 1993, 9). Somit ist der Raum

das, was verschiedene Körper trennt. Die Maxime lautet: Jeder Körper besetzt einen bestimmten Raum (vgl. Nikolaou 1998, 19–20).

Die Vorstellung von Raum wird hier immer noch mit der von Materie vermischt: Noch in der frühen Pythagoreischen Philosophie wird Raum zumeist als *pneuma apeiron* bezeichnet, nur gelegentlich als *kenon* (vgl. Jammer (1954) 1993, 9). *Pneuma* (πνευμα), Altgriechisch für „Atem“, steht in religiösem Kontext auch für „Geist“ oder „Seele“, *apeiron* (ἄπειρον) lässt sich mit „grenzenlos“ oder „unendlich“ übersetzen. *Pneuma apeiron* kann laut Jammer als Luft verstanden werden—ein grenzenloses Medium des Atems. *Kenon*, abgeleitet vom griechischen Begriff für „leer“, *kenos* (κενοζ), lässt sich als „Leere“ oder leerer Raum übersetzen.

Zur Zeit Newtons schlug Leibniz ein wichtiges immanentes Raumkonzept vor. Der deutsche Mathematiker, Philosoph und Politikberater war einer der wichtigsten Vordenker der Aufklärung und hinterließ ein umfangreiches intellektuelles Erbe: Es reicht von politischen Empfehlungen betreffend die Straßenbeleuchtung in Wien über die Erfindung eines haltbaren, transportablen Snacks für Soldaten (das deutsche Backwarenunternehmen Bahlsen zollt ihm dafür in Form des „Leibniz Butterkekses“ Tribut) und der Schaffung bedeutender philosophischer Werke wie der *Monadologie* und die *Theodizee* bis hin zur Verfeinerung des binären Zahlensystems, auf dem heutige Informationstechnologien beruhen.

Wenn es um die Konzeption des Raumes geht, ist dieser für Leibniz im Gegensatz zu Newton nicht *absolut* sondern *relativ*—allerdings in fundamental anderer Hinsicht als Newtons Konzeption des relativen Raumes.

Was bedeutet das? In Newtons Konzept des absoluten Raums ist Raum ein Container, eine Box, die Körper beinhalten kann. Ihre Bewegung wird in Relation zum absoluten Raum definiert. Leibniz' Konzeption stellt diese Vorstellung auf den Kopf: In seinem Verständnis erwächst der Raum als Struktur aus der Beziehung der Körper zueinander. Anders gesagt: Raum ist die Ordnung der Koexistenz von Objekten. Demnach ist die Existenz von Raum von der Existenz von Objekten abhängig—ein Gedanke, der Newtons Konzept völlig fremd ist.

Riemanns immanente Geometrie

Als Musterbeispiel einer immanenten Konzeption von Raum wird in diesem Aufsatz die von Carl Friedrich Gauss und Georg Bernhard Riemann entwickelte Differentialgeometrie herangezogen. Nicht nur Philosophen wie Henri Bergson und Gilles Deleuze nehmen in ihrem Denken auf den Riemannschen Raum Bezug; Er bildet auch das Fundament von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie.

Im Gegensatz zur Analytischen Geometrie, die auf einem Koordinatensystem basiert und Werkzeuge der Algebra und Analysis verwendet, löst die Differentialgeometrie geometrische Probleme mit Techniken der Differential- und Integralrechnung. Während Gauss noch auf

zweidimensionale Überlegungen beschränkt blieb, beschäftigte sich sein Schüler Riemann mit der Erweiterung der Differentialgeometrie in höhere Dimensionen.

Basierend auf den Oberflächenstudien von Leonhard Euler und Gaspard Monge, begann Gauss seine Studien mit der traditionellen Kartesischen Methode und betrachtete eine gekrümmte zweidimensionale Fläche, die in einem dreidimensionalen Raum eingebettet ist. Die Kurven der Oberfläche betrachtend und auf einige Theoreme Bezugnehmend,⁷ konnte Gauss zeigen, dass eine Oberfläche als „Raum in sich selbst betrachtet werden kann“ (Kline 1990, 888, eigene Übersetzung). Morris Kline betonte, dass man in diesem Fall „das Faktum vergessen kann, dass die Oberfläche in einem dreidimensionalen Raum liegt“ (ebenda, 888, eigene Übersetzung), was bedeutet, dass die Beschreibung der zweidimensionalen Oberfläche nicht notwendigerweise in einer höheren Dimensionalität, nämlich in einem dreidimensionalen Koordinatensystem eingebettet sein muss.

Indem er die Koordinatenachsen mit einer nicht-Euklidischen Geometrie in die Oberfläche selbst legte, „entwickelte Gauss das vollkommen neue Konzept, dass eine Oberfläche ein Raum in sich selbst ist“ (ebenda, 882, eigene Übersetzung). Seine Methode wurde von Riemann weiterentwickelt, der sich nicht nur mit dem Problem der drei Dimensionen, sondern auch mit Oberflächen beschäftigte, die eine beliebige Anzahl von Dimensionen beinhalten.

Eher aus Zufall⁸ bereitete Riemann für seine Habilitation einen Vortrag über die Grundlagen der Geometrie vor. In dem 16-seitigen Manuskript mit dem Titel *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*—das nur eine einzige Formel enthält—entwickelte er eine neue Form der Geometrie, die als Riemannsche Geometrie in die Wissenschaftsgeschichte eingehen sollte: Sie bildet die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie ebenso wie der Quantenfeldtheorie und der Stringtheorie.

Ausgehend nicht allein von rein mathematischen, sondern auch von philosophischen Überlegungen, transferierte Riemann das globale Koordinatensystem des Kartesischen Raumes in eine lokale Koordinatenbeschreibung eines mathematischen Objekts genannt *Mannigfaltigkeit* (vgl. Riemann und Jost 2016, 24). Wie Plotnitsky zeigt, erlaubte das Konzept der Mannigfaltigkeit Riemann, bestimmte Räume als Flickwerk lokaler Räume zu definieren, ohne dass „der globale Raum denselben Typ von Struktur besitzt wie diese lokalen Subräume“ (Plotnitsky 2009, 192, eigene Übersetzung). Dabei können „diese lokalen Räume als infinitesimal euklidisch betrachtet werden, während der globale Raum generell nicht-euklidisch ist“ (ebenda, 192, eigene Übersetzung).

Was Riemann mit seiner Geometrie gelang, lässt sich etwa so auf den Punkt bringen: Er schuf eine Verallgemeinerung, die sowohl euklidische wie auch nicht-euklidische Geometrie miteinschließt. Für einen globalen Raum ohne Krümmung reduziert sich der Riemannsche Raum zu einem flachen Euklidischen Raum; im allgemeineren Fall für einen globalen Raum mit Krümmung sind nur die lokalen Räume infinitesimal euklidisch. Das bedeutet, dass der Riemannsche Raum nur in infinitesimalen Regionen als transzendent konzeptualisiert werden kann, während die Krümmung des globalen Raumes eine immanente Konzeption erfordert.

Da Riemanns Geometrie (siehe Abb. 2) „unabhängig vom umgebenden (dreidimensionalen)

euklidischen Raum“ (ebenda, 202, eigene Übersetzung) ist, bietet sie ein mathematisches Modell für Leibniz' Theorien zum relationalen Charakter von Räumlichkeit (vgl. ebenda, 202). Hier wird der der immanente Charakter von Raum deutlich: Raum wird eindeutig nicht mehr als externe, gegebene Superstruktur gedacht, in der materielle Objekte Orte bilden. Vielmehr erscheint Raum als Mannigfaltigkeit, deren Struktur intern entsteht (vgl. ebenda, 202). In seiner Allgemeinen Relativitätstheorie identifizierte Einstein Masse und Energie als Ursache für die Krümmung des Raums.

Abbildung 2: Diese Figur zeigt die Riemannsche Oberfläche für die Funktion $f(z)=\sqrt{z}$.

Credit: Wikimedia Commons/Leonid 2, Open source:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Riemann_sqrt.svg

Hier wird erneut klar, dass der strikte Gegensatz eines absoluten und eines relativen Raumkonzepts versagt, sobald räumliche Konfigurationen im Detail untersucht werden; sinnvoller ist, Raum im Kontext einer Komplementarität von transzendenten und immanenten Charakteristika zu konzeptualisieren. Die infinitesimalen Teile eines Riemannschen Raums erlauben eine transzendente Konzeptualisierung, während generell der immanente Charakter benötigt wird, um die Krümmung des globalen Raumes zu beschreiben.

Immanente Raumkonzepte in der modernen Physik

Indem er ein Reich von abstrakten Räumen schuf, die studiert werden können, ohne sie in höherdimensionale Räume einzubetten, wurde Riemanns Geometrie zentral für Deleuze. Wie Manuel DeLanda hervorhebt, ist die Methode von Riemanns Geometrie, alle global einbettenden Räume zu eliminieren und alle Räume rein lokal zu beschreiben, ist für Deleuze „nicht nur ein Formalakt in der Philosophie der Mathematik, sondern von ontologischer Bedeutung“ (DeLanda 2004, 85, eigene Übersetzung). Das wird explizit in *Tausend Plateaus*, wo Deleuze und Félix Guattari das Konzept der Mannigfaltigkeit einführen, dass eng mit ihrem Konzept des Rhizoms verbunden ist: „The point is that a rhizome or a multiplicity never allows itself to be overcoded, never has available a supplementary dimension over and above its number of lines.“ (Deleuze und Guattari 2005, 9)

60 Jahre nachdem Riemann seine Geometrie entwickelt hatte, stellte sie sich als Fundament für Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie heraus. Als jener seine Theorie 1915 publizierte, führte er eine vierdimensionale Raumzeit ein, die sich wölbte und krümmte, indem sie auf Massen und äquivalent auf Energie reagierte (siehe Abb. 3). Erst danach bot die Riemannsche Geometrie auch die mathematische Struktur der Quantenfeldtheorie und theoretischer Entwicklungen in der Teilchenphysik wie zum Beispiel die Superstring Theorie und

Abbildung 3: Diese Illustration zeigt wie Einsteins Raumzeit durch Massen und Energien gekrümmt wird. Credit: NASA. Open source: https://www.nasa.gov/images/content/172129main_gpb-earth-300dpi%20copy.jpg

Quantengravitation (vgl. Riemann und Jost 2016, 2), die beide bedeutende Kandidaten für eine vereinheitlichte Theorie von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie sind.

Wenn man Abb. 1 und Abb. 3 vergleicht, werden die Unterschiede zwischen Newtons transzendtem und Einsteins immanentem Raum offensichtlich: Während Newtons Raum nicht von Körpern beeinflusst wird und als umgebender Container, in dem Körper eingebettet sind, konzeptualisiert ist, wird der Raum in Einsteins Konzeption relational durch Massen und Energien verändert. Jost fasst zusammen: „Die Anwesenheit der Materie und damit die Veränderungen der Geometrie der Raumzeit und Beschleunigung wird nun gemessen in Relation zu dieser Riemannschen Geometrie anstelle einer unabhängigen absoluten Euklidischen Geometrie.“ (Riemann und Jost 2016, 130, eigene Übersetzung)

Zusammenfassung und Ausblick: Eine Komplementarität von transzenten und immanenten Charakteristika des Raums

Im Gegensatz zu absoluten und relativen Konzeptionen des Raums, die sich als kaum vereinheitlichbar herausgestellt haben, erlaubt das Framework von transzenten und immanenten Konzeptionen des Raums eine komplementäre Konzeption, die Aspekte der beiden vereint.

Das Prinzip der Komplementarität variiert einen der Eckpfeiler der antiken griechischen Philosophie: das Prinzip des Widerspruchs. In seinem Briefwechsel mit Samuel Clarke formulierte Leibniz seine Auffassung dieses Prinzips: „The great foundation of mathematics is the principle of

contradiction or identity, i.e. that a *proposition can't be true and false at the same time*, so that A is A and can't be not-A. This principle is all we need to demonstrate every part of arithmetic and geometry, i.e. to demonstrate all mathematical principles." (Leibniz und Clarke (1717) 2007, 3)

Im Gegensatz zum Prinzip des Widerspruchs, sieht die Komplementarität vor, dass bestimmte Propositionen zur selben Zeit sowohl wahr wie auch falsch sein können. Genauer gesagt, eine Proposition und ihr Gegenteil—in Leibniz' Schreibweise A und non-A—können zur selben Zeit *virtuell wahr* sein, auch wenn beide dieser Wahrheiten zur selben Zeit in einer bestimmten experimentellen Anordnung nicht vollständig *aktualisiert* werden können.

Was den Raum betrifft, beinhaltet ein komplementäres Framework virtuell transzendente wie auch immanente Aspekte, aber abhängig von der speziellen experimentellen Situation schlägt entweder der transzendente oder der immanente Charakter des Raums durch.

Um einen Ausblick zu geben, die Schaffung von Raum um die Komplementarität von transzenten und immanenten Charakteristika des Raums zu beschreiben, könnte sich als hilfreich herausstellen, um räumliche Phänomene, die im phänomenologischen Raum der Quantentheorie auftreten, adäquat zu konzeptualisieren, wie zum Beispiel für Nichtlokalität, für die eine Raumkonzeption, die auch die Relativitätstheorie beinhaltet, immer noch nicht gefunden worden ist. Indem so eine Raumkonzeption geschaffen wird, könnte die jahrhundertelange Dominanz der Transzendenz den Weg frei machen für einen elaborierteren Zugang zur Immanenz in der Physik.

Endnoten

¹ Ohne ins Detail zu gehen, will ich hier anmerken, dass Bohr die Como-Version der Komplementarität kurz nach seiner Vorstellung verändert hat, wie Arkady Plotnitsky in seinem Buch *Niels Bohr and complementarity* gezeigt hat.

² In der Physik wird der Begriff der Trajektorie verwendet, um—mathematisch und geometrisch—den Pfad eines bewegten Objekts durch den Raum als Funktion der Zeit zu beschreiben.

³ In seiner *Principia* verwendet Newton das Wort *Körper* äquivalent zu *Masse*.

⁴ Als Referenz siehe z. B. „The contemporary 20th century physics is based on a foundation which had been mainly invented by two scholars living 300 years ago in the 17th century, Newton and Leibniz, who assembled new rules for mathematics and mechanics being disparate from these known before them.“ (Suiskey 2009, 33)

⁵ Die Einsicht, dass der Raum „absolut unbeweglich“ und unkörperlich ist, sowie dass der Raum eine reale Entität ist, obwohl er „keine der traditionellen Kategorien von Substanzen oder Akzidens“ erfüllt (Rysaniewicz 2014, eigene Übersetzung) verdankt Newton Walter Charletons Buch *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana: Or a Fabrick of Science Natural, upon the Hypothesis of Atoms, "Founded by Epicurus, Repaired by Petrus Gassendus, Augmented by Walter Charleton"*, das 1654 auf Englisch publiziert worden ist.

⁶ In der mathematischen Formulierung der Quantenmechanik von John von Neumann kann der reine Zustand eines Quantenmechanischen Systems durch sogenannte Zustandsvektoren beschrieben werden, die in einem komplexwertigen separablen Hilbertraum leben, ein unendlichdimensionaler Euklidischer Raum, der eine Euklidische Metrik trägt (vgl. Riemann und Jost 2016, 24).

⁷ Für eine detailliertere Ableitung siehe Gauss' Arbeit oder z. B. die Formulierung von Morris Kline.

⁸ Für sein Habilitationskolloquium musste Riemann drei Themen einreichen und zu seinem Bedauern hat sich das Komitee für das Thema entschieden, das er am wenigsten mochte.

Bibliographie

- Bohr, Niels. 1927. „Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik.“ In *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, 34–59. Heidelberg: Springer.
- DeLanda, Manuel. 2004. *Intensive Science and Virtual Philosophy*. London: Continuum.
- Deleuze, Gilles, und Félix Guattari. 2005. *A Thousand Plateaus: Capitalism and schizophrenia*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Earman, John. 1989. *World Enough and Space Time: Absolute versus relational theories of space and time*. Cambridge: MIT Press.
- Jammer, Max. (1954) 1993. *Concepts of Space: The history of theories of space in physics*. Dritte erweiterte Auflage. New York: Dover.
- Kline, Morris. (1972) 1990. *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*. New York: Oxford University Press.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm und Samuel Clarke. (1717) 2007. *Exchange of papers between Leibniz and Clarke*. Abzurufen unter http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1715_1.pdf
- Newton, Isaac. (1687) 1729. *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Bd. 1. Übersetzt von Andrew Motte. London: Benjamin Motte.
- . (1687) 1872. *Mathematische Principien der Naturlehre*. Übersetzt von Jakob Philipp Wolfers. Berlin: Robert Oppenheim.
- Nikolaou, Sousanna-Maria. 1998. *Die Atomlehre Demokrits und Platons Timaios: Eine vergleichende Untersuchung*. Vol. Bd. 112. Stuttgart: B.G. Teubner.
- Olby, Robert C., Geoffrey N. Cantor, John R. R.Christie, und M. Jonathan S. Hodge, Hrsg. 1990. *Companion to the History of Modern Science*. London and New York: Routledge.
- Plotnitsky, Arkady. 2009. „Bernhard Riemann.“ In *Deleuze's Philosophical Lineage*, herausgegeben von Graham Jones und Jon Roffe, 190–208. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- . 2012. *Niels Bohr and Complementarity: An introduction*. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4517-3>
- Riemann, Bernhard und Jürgen Jost. (1868) 2016. *On the hypotheses which lie at the bases of geometry*. Basel: Birkhäuser. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26042-6>
- Rynasiewicz, Robert. 2014. „Newton's views on space, time, and motion.“ In *The Stanford encyclopedia of philosophy (Summer 2014 Edition)*, herausgegeben von Edward N. Zalta. Stanford: Stanford University, Center for the Study of Language and Information, The Metaphysics Research Lab. Abzurufen unter <http://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/newton-stm/>
- Saunders, Simon. 2005. „Complementarity and scientific rationality.“ *Foundations of Physics* 35 (3): 417–447. <https://doi.org/10.1007/s10701-004-1982-x>
- Schilpp, Paul Arthur. 2000. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Bd. 7. New York: MFI Books.
- Suisky, Dieter, Hrsg. 2009. *Euler as Physicist*. Berlin/Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74865-6>

Biographie

Tanja Traxler ist Dissertantin und Universitätslektorin an der Fakultät für Physik der Universität Wien. Ihre interdisziplinäre Dissertation „Entanglement in space—philosophical considerations on space and bodies in quantum physics“ (Arbeitstitel) ist—gemeinsam mit den Dissertationen von Louise Beltzung Horvath und Julia Grillmayr—Teil des PhD-Projekts „Thinking Space“ (gefördert von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 2012–2016 durch ein „DOC-team“-Stipendium). Während sie ihr Diplomstudium auf dem Gebiet der theoretischen Quantenphysik absolviert hat, fokussiert sie sich in ihrer Dissertation auf philosophische Betrachtungen der Quantentheorie. Sie ist als Gastforscherin an die University of Twente, Niederlande, und die University of California/Santa Cruz, USA, eingeladen worden und hat ihre Arbeit bei mehr als 20 internationalen Konferenzen und Workshops präsentiert. Neben ihrer akademischen Karriere arbeitet sie als Wissenschaftsredakteurin für die österreichische Tageszeitung „Der Standard“, vor allem in den Feldern Physik und Philosophie.

© 2017 Tanja Traxler

Dieses Werk ist, sofern nicht anders angegeben, lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](#).