

**Was bedeutet es für unser Weltbild, wenn wir
mit Gödel die Nichtexistenz der Zeit annehmen?**

Gewißheit giebt allein die Mathematik. Aber leider streift sie nur den *Oberrock der Dinge*. Wer je ein gründliches Erstaunen über die Welt empfunden, will mehr. Er philosophirt . . .

Wilhelm Busch in einem Brief an Maria Anderson, 2. Mai 1875

1 Zeit und Gödel-Kosmos

Vom 30. Mai bis 1. Juni 1963 fand an der Cornell-Universität eine kleine Tagung zur Natur der Zeit statt, ausgerichtet von den aus Wien stammenden Astrophysikern Hermann Bondi und Thomas Gold. Die Tagung vereinigte eine illustre Runde von Physikern, Mathematikern und Philosophen, darunter die späteren Nobelpreisträger der Physik Subrahmanyan Chandrasekhar, Roger Penrose und Richard Feynman.¹

Kurt Gödel war nicht anwesend. Dabei hatte der berühmte Mathematiker etwa 15 Jahre zuvor Arbeiten veröffentlicht, die ganz wesentlich und weitreichend mit dem Begriff der Zeit zu tun hatten. Es war ihm gelungen, eine exakte Lösung von Einsteins Feldgleichungen der Gravitation zu finden, die ein *rotierendes* Universum beschreibt, das *geschlossene zeitartige Weltlinien* aufweist.² Vor allem Letzteres hatte für Aufregung gesorgt. Die Existenz solcher Weltlinien bedeutet, dass es in einem solchen Universum Beobachter gibt, die über ihre Zukunft in die eigene Vergangenheit reisen könnten, mit all den damit verbundenen Konsequenzen.

Warum war dann Gödel auf dieser Tagung abwesend? Ein möglicher Grund hierfür deutet sich in dem kurzen Vortrag von Chandrasekhar an, der mit den sich anschließenden Diskussionen in dem Tagungsband abgedruckt ist, siehe GOLD (1967), S. 68. Der Vortragstitel lautet *Geodesics in Gödel's Universe* und bezieht sich daher explizit auf Gödels kosmologische Lösung. Chandrasekhar referiert zunächst einen Vortrag Gödels, den dieser etwa 15 Jahre zuvor in Princeton gehalten hat.³ Dann bringt er eine Kritik ein, die er bereits zuvor in einer Fachzeitschrift publiziert hat. Er zeigt, dass es einem Beobachter, der sich im Gödelschen Universum auf Geodätischen bewegt, also auf kräftefreien Bahnen des „freien Falls“, tatsächlich nicht gelingt, in seine eigene Vergangenheit zu reisen. Das ist korrekt, nur hat Gödel dies nicht behauptet. Seine geschlossenen zeitartigen Weltlinien, denen entlang man in seine Vergangenheit reisen kann, sind gerade keine Geodätischen, sondern beschreiben beschleunigte Bewegungen. Mit solchen Bewegungen sind Zeitreisen möglich. Man hätte erwarten können, dass Gödel die Gelegenheit bekommen hätte, auf Chandrasekhars Kritik zu antworten, doch das ist nicht geschehen. Es steht zu vermuten, dass Chandrasekhars Kritik mitverantwortlich für das Desinteresse war, das lange Zeit gegenüber

¹Letzterer tritt in dem Tagungsband nur als „Mr. X“ auf, siehe GOLD (1967).

²Die Originalveröffentlichung ist GÖDEL (1949); eine ausführlichere und ergänzende Darstellung ist GÖDEL (1952). Beide Arbeiten sind, versehen mit einführenden Worten von Stephen Hawking, abgedruckt in GÖDEL (1990).

³Es handelt sich um den Vortrag vom 7. Mai 1949, der später nach einem im Nachlass gefundenen handschriftlichen Manuskript in GÖDEL (1995, S 261 ff.) veröffentlicht wurde.

Gödels Lösung herrschte.⁴ In den Diskussionsbeiträgen zu Chandrasekhars Vortrag geht es dann hauptsächlich um die prinzipielle Möglichkeit von geschlossenen zeitartigen Weltlinien in Einsteins Theorie. Wie der Physiker Wolfgang Rindler dort betont, gibt es durchaus andere Lösungen mit diesen Eigenschaften. Eine davon ist der sogenannte Anti-De Sitter-Raum, der sich heute in der Stringtheorie großer Beliebtheit erfreut.⁵ In dem Tagungsband findet sich ebenfalls ein Beitrag von John Wheeler, auch er wie Gödel und Einstein in Princeton arbeitend, allerdings nicht am Institute for Advanced Study, sondern an der Universität. Wheeler geht nur kurz auf Gödel ein.⁶ Es geht ihm dabei nicht um Gödels kosmologische Lösung, sondern um dessen philosophische Ansichten, vor allem um die Beziehung von Subjekt und Objekt. Dass diese Ansichten sehr wohl mit Gödels kosmologischen Interessen zu tun haben, werden wir später sehen.

Wie bewerten wir Gödels kosmologische Lösungen aus heutiger Sicht? Der in GÖDEL (1949) vorgestellte „Gödel-Kosmos“ hat – neben der schon diskutierten Präsenz geschlossener zeitartiger Weltlinien – vor allem die Eigenschaft, dass er ein *rotierendes* Universum beschreibt. Im Unterschied zu dem Universum, in dem wir leben, gibt es im Gödel-Kosmos keine Expansion. Die Expansion unseres Universums kannte man bereits 1949, was wohl der Grund dafür war, dass Gödel in der späteren Arbeit GÖDEL (1952) auch eine rotierende Lösung *mit* Expansion vorstellte, bei der die Möglichkeit, in die Vergangenheit zu reisen, nicht besteht. Der Gödel-Kosmos beschreibt ein materiedominiertes Universum mit positivem Druck und negativer Kosmologischer Konstante, also negativer Vakuumenergie; letztere Eigenschaft teilt er mit dem schon erwähnten Anti-De Sitter-Raum, der freilich keine Materie enthält und dessen empirische Relevanz fragwürdig ist. In der einschlägigen Literatur zur Relativitätstheorie hat Gödels Lösung ihren Platz gefunden, siehe etwa das Standardwerk HAWKING und ELLIS (1973, S. 168–170).

Bei Abwesenheit eines absoluten Bezugssystems, und das ist eine der zentralen Eigenschaften von Einsteins Theorie, ist zunächst nicht klar, was Rotation bedeutet. Rotation gegenüber was? Gemeint ist hier, dass lokale Inertialsysteme, die man etwa durch frei fallende Kreisel realisieren kann, gegenüber weit entfernten Objekten, etwa Quasaren, rotieren. Oder in den anschaulichen Worten von Wheeler und Ford: „In Gödels theory, individual galaxies rotate more in one direction than another—just as the hands of

⁴Siehe DAWSON (1997) für eine ausführliche Darstellung der Rezeptionsgeschichte von Gödels Arbeit.

⁵Die geschlossenen zeitartigen Weltlinien können dort allerdings vermieden werden, indem man mathematisch betrachtet zu dem sogenannten Überlagerungsraum übergeht.

⁶Siehe GOLD (1967), S. 91.

clocks on a wall rotate more in one direction than another.“⁷

Gödels Lösung ist vor allem wegen ihrer Folgen für den physikalischen Zeitbegriff von Bedeutung. Das betrifft natürlich zum einen die Möglichkeit der Existenz von Weltlinien, denen entlang man in die eigene Vergangenheit reisen kann. Zum anderen führt die Anwesenheit von Rotation dazu, dass man nicht einmal näherungsweise mehr die Illusion einer globalen Zeit aufrecht erhalten kann. Gewiss, diese Relativierung des Zeitbegriffs ist eine der wesentlichen Konsequenzen von Einsteins Theorie, doch kann man sich vor dieser Konsequenz drücken, wenn man an den kosmologischen Lösungen mit Expansion ohne Rotation als den einzig relevanten Lösungen festhält. Es gibt dann tatsächlich eine ausgezeichnete Zeit t , die für alle mitbewegten Beobachter gilt, und bezüglich der man objektiv von Gleichzeitigkeit sprechen kann. Bei Anwesenheit selbst einer kleinen Rotation gilt das nicht mehr, und zwar unabhängig davon, ob es die Möglichkeit von Zeitreisen gibt oder nicht. Ein rotierendes Universum erlaubt es nicht mehr, von einem objektiven Zeitverlauf zu sprechen. Das ist der springende Punkt.

Doch warum interessierte sich Gödel überhaupt für diese Lösungen?

2 Zeit und Wirklichkeit

Kurt Gödel war Mathematiker und wurde weltberühmt durch seine Unvollständigkeitssätze, welche die Grundlagen der Mathematik erschütterten. Welcher Weg führte ihn von diesen Arbeiten zu seinen Einsichten über Zeit und Kosmologie?

Im Unterschied zu den Gesetzen der Physik sind die Gesetze der Logik zeitlos. Wenn Zeit und Logik dennoch vermischt werden, wie etwa in Aristoteles' Beispiel der morgen stattfindenden Seeschlacht im neunten Kapitel seines *De interpretatione*, so handelt es sich eher um ein sprachliches Problem als um eine Zeitabhängigkeit logischer Gesetze (wie der behaupteten Zeitabhängigkeit des Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten in Aristoteles' Beispiel, das nur für Vergangenheit und Gegenwart, aber nicht für die Zukunft gilt). Wie führt der Weg von der zeitunabhängigen Logik zu den zeitabhängigen Gesetzen der Kosmologie?

Eine Fundgrube auf der Suche nach dem Ursprung von Gödels Interessen bieten seine Notizbücher, mit deren Publikation vor kurzem begonnen wurde.⁸ Stilistisch erinnern sie zuweilen sehr an die *Philosophischen Untersuchungen* seines Landsmanns Ludwig Wittgenstein. Gödel nennt sie *Maximen*, also Leitsätze. So findet sich darin zum Beispiel die Bemerkung, dass

⁷WHEELER und FORD (1998, S. 309).

⁸Siehe GÖDEL (2019, 2020).

die Mathematik die einzige Wissenschaft sei, welche etwas Vollkommenes an sich habe (den exakten Beweis und den exakten Begriff).⁹ An anderer Stelle betont Gödel, dass es sich bei der Logik nicht um Naturgesetze handle.¹⁰

Kein Wunder, dass sich Gödel mehrfach zu einem platonischen Weltbild in der Mathematik bekennt. Deren Strukturen *sind* einfach nur da und entwickeln sich nicht in der Zeit. Aus diesem Grund war auch sein Verhältnis zu dem Wiener Kreis um Moritz Schlick, mit dem er in den zwanziger Jahren in Kontakt stand, gespalten; Gödel konnte sich für den dort propagierten Positivismus einfach nicht erwärmen. Eine platonische Sichtweise der Dinge wird auch heute gerne eingenommen; ein berühmter Vertreter ist Roger Penrose.¹¹

Natürlich war Gödel klar, dass Mathematik und Wirklichkeit und somit auch deren Erkenntnis unterschiedliche Dinge sind. So findet sich beispielsweise in GÖDEL (2019, S. 57) die Stelle:

Mathematische und logische Erkenntnis ist von prinzipiell anderer Art als Wirklichkeitserkenntnis. Nur diese ist eine eigentliche Erkenntnis und für diese interessiert sich die Philosophie in erster Linie.

Es kann kein Zweifel daran bestehen, dass Gödels philosophisches Interesse nicht bei der Mathematik stehengeblieben ist, sondern sich auch auf die Wirklichkeit richtete. Von einem platonischen Gesichtspunkt aus stellt sich dabei aber vornehmlich die Frage nach der Zeit und der damit verbundenen Veränderung der Welt. Gibt es eine solche Veränderung überhaupt? Wie lässt sich das platonische Weltbild der Mathematik mit dem dynamischen Weltbild der Physik in Einklang bringen?

Vordergründig gilt Gödels Beschäftigung mit dieser Frage als Reaktion auf die Einladung Paul Arthur Schilpps, einen Beitrag für die zu Einsteins siebenzigsten Geburtstag geplante Festschrift zu verfassen.¹² Wie Howard Stein in seinen einleitenden Bemerkungen zu diesem Beitrag betont,¹³ ging es Gödel vor allem darum, Argumente für gewisse philosophische Ideen zu liefern, welche die Objektivität einer Veränderung leugnen. Mit diesen Ideen liebäugelte er natürlich schon vor Schilpps Einladung. Aus dem Titel des Artikels wird klar, dass es sich um idealistische Philosophie handelt, womit in erster Linie Kants Philosophie gemeint ist. Dabei vertritt Gödel, so Stein, nicht die

⁹GÖDEL (2020, S. 214).

¹⁰GÖDEL (2019, S. 50).

¹¹Die in HAWKING und PENROSE (1998) abgedruckte Debatte zwischen den beiden Physikern beginnt mit dem folgenden Satz von Hawking: „Diese Vortragsreihe hat ganz deutlich den Unterschied zwischen Rogers und meinen Auffassungen offenbart. Er ist Platoniker und ich bin Positivist.“

¹²Dieser Beitrag ist 1949 erschienen; die deutsche Version ist GÖDEL (1955).

¹³Siehe GÖDEL (1990), S. 199–201.

Ansicht einiger Vertreter dieser Philosophie, dass alles Wirkliche von mentaler Natur sei; vielmehr geht es ihm nur darum, dass unsere Vorstellung einer sich verändernden Welt eine Illusion sei. Das erinnert natürlich an eine berühmte Sentenz von Einstein aus einem Kondolenzbrief an die Familie seines langjährigen Freundes Michele Besso, einen Monat vor seinem eigenen Tod geschrieben, wonach die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer wenn auch hartnäckigen Illusion habe. Existiert Zeit also nur als Illusion?

Man könnte argumentieren, dass Gödel hier nur wiedergibt, was sich auf natürliche Weise aus dem Zeitbegriff in Einsteins Relativitätstheorie ergibt. Dem ist aber nicht so. Die zu Gödels Zeit und auch heute üblicherweise benutzten kosmologischen Lösungen von Einsteins Gleichungen sind von sehr spezieller Natur. Sie enthalten eine ausgezeichnete Klasse von Weltlinien, welche Beobachter beschreiben, die relativ zu dem expandierenden Universum ruhen. Wichtig ist, dass sie keine Rotation erfahren. Für solche Beobachter kann man eine objektive „kosmische“ Zeit einführen, die Ähnlichkeit mit den Newtonschen Vorstellungen aufweist. Alle Vorgänge in der Natur könnte man dann auf diese ausgezeichnete Zeit beziehen. Viele Forscher sahen darin eine Rettung des alten Newtonschen Zeitbegriffs. Einsteins Theorie möge zwar keine objektive Zeit mehr enthalten; auf das Universum, in dem wir leben, so die Forscher, treffe dies aber nicht zu.

Gödel hat eine Lösung mit Rotation gesucht und gefunden, eine Lösung, die zeigt, dass es kosmologische Raumzeiten gibt, welche die Einführung einer objektiven Zeit verbieten. Dass er seine Lösung tatsächlich nicht als reine Mathematik, sondern als mögliches Modell für unser eigenes Universum betrachtete, lässt sich daran erkennen, dass er sich fleißig bemühte, Effekte einer Rotation in vorhandenen Beobachtungen ausfindig zu machen. Um Wheeler und Ford zu zitieren: „He was so passionately interested in the subject and so desperate for facts and figures, it turned out, that he had taken down the great Hubble photographic atlas of the galaxies, lined up a ruler on each galactic image to estimate the galaxy’s axis of rotation, and compiled statistics of the orientation. He found no preferred sense of rotation.“¹⁴

Heutige Beobachtungen sind wesentlich genauer, als dies zu Gödels Zeiten überhaupt vorstellbar war. Effekte einer möglichen Rotation sollten sich zum Beispiel in den Anisotropien der Kosmischen Hintergrundstrahlung finden lassen, deren Spektrum vom Weltraumteleskop PLANCK in den Jahren 2009 bis 2013 sorgfältig ausgemessen wurde. SAADEH *et al.* (2016) finden in den Daten keinen Anhaltspunkt für eine Rotation.¹⁵ Andererseits ergeben sich

¹⁴Siehe WHEELER und FORD (1998), S. 310.

¹⁵Sie geben für die sogenannte Vektormode, die mit einer Rotation assoziiert werden

aus der Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen durchaus Hinweise auf eine mögliche Rotation, siehe WANG *et al.* (2021).

Somit ist nicht ausgeschlossen, dass es eine Rotation gibt oder gegeben hat, zum Beispiel zu Zeiten des sehr frühen Universums, von dem uns nur spärliche Informationen erreichen. Viel wichtiger als die aus der Beobachtung gefundenen Schranken ist jedenfalls die prinzipielle Möglichkeit eines rotierenden Universums, wegen der es einen objektiven Zeitbegriff wie bei Newton nicht mehr geben kann. Dies hat Gödel durch die explizite Konstruktion einer Raumzeit, die ein rotierendes Universum beschreibt, ein für allemal klargestellt.

Die für die Diskussion des Zeitbegriffs wichtigste Eigenschaft des Gödel-Kosmos ist also die Rotation. Dass es in ihm zusätzlich noch geschlossene zeitartige Weltlinien und somit die Möglichkeit von Zeitreisen gibt, scheint Gödels Argument der Nichtexistenz einer objektiven Zeit noch zu verstärken. Schließlich könnten sich durch die mögliche Beeinflussung der eigenen Vergangenheit Paradoxien ergeben. Einstein geht in seiner Antwort auf Gödels Festschriftbeitrag nur auf diesen Punkt ein und drückt dabei sein Unbehagen über die Möglichkeit von Zeitreisen aus. Allerdings hat man in den Jahrzehnten seit Gödels Arbeiten gelernt, dass man durchaus konsistente Lösungen von Einsteins Gleichungen aufstellen kann, die Reisen in der Zeit erlauben und die physikalisch sinnvoll sind, also ohne Paradoxien auskommen¹⁶ Zudem konnte Gödel in seiner Arbeit von 1952 rotierende Raumzeiten ohne Zeitreisen aufstellen. Die Nichtexistenz einer objektiven Zeit folgt alleine aus der Möglichkeit eines rotierenden Universums. Diese Erkenntnis haben wir Gödel zu verdanken. Ein konsistentes Bild unserer Welt muss ihr Rechnung tragen.

3 Zeit und Quantengravitation

Aus Gödels berühmten Theoremen folgt die Unvollständigkeit formaler Systeme. Die Bedeutung dieser Erkenntnis kann kaum überschätzt werden. Jürgen Schmidhuber drückte es in einem Beitrag für die Frankfurter Allgemeine Zeitung so aus: „Gödel sandte seinerzeit Schockwellen durch die akademische Gemeinschaft, als er die fundamentalen Grenzen des Rechnens, der KI¹⁷, der Logik und der Mathematik selbst aufzeigte. Dies hatte enorme

kann, eine obere Schranke von $4,7 \times 10^{-11}$ an.

¹⁶Siehe etwa THORNE (1994). Allerdings benötigen diese Raumzeiten exotische Gebilde wie etwa Wurm Löcher, deren Existenz in der Natur fragwürdig ist.

¹⁷Künstliche Intelligenz

Auswirkungen auf Wissenschaft und Philosophie des 20. Jahrhunderts.“¹⁸

Unvollständigkeit ist auch eine Eigenschaft von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Und auch in diesem Fall folgt sie aus ausgeklügelten mathematischen Theoremen. Wie Roger Penrose, Stephen Hawking, Robert Geroch und andere in den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts beweisen konnten, gibt es in Einsteins Theorie unweigerlich sogenannte *Singularitäten*, Grenzen der Raumzeit, hinter denen die Theorie ihre Gültigkeit verliert.¹⁹ Die wichtigsten Beispiele sind die Singularitäten beim Urknall und im Inneren Schwarzer Löcher. Wie in Gödels Fall wurden die Theoreme aus der Theorie selbst heraus entwickelt, nicht etwa aus der Perspektive einer übergeordneten (noch unbekannt) Theorie. Mathematische Theoreme kommen natürlich nicht ohne Annahmen aus. Und so hat eine der Annahmen zumindest indirekt mit Gödels kosmologischer Lösung zu tun. Die meisten Singularitätentheoreme postulieren als eine ihrer Annahmen die Abwesenheit geschlossener zeitartiger Weltlinien, also die Unmöglichkeit von Zeitreisen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Singularitäten bei Anwesenheit solcher Linien vermieden werden können. Genau dies ist in Gödels Kosmos der Fall – dessen Raumzeit ist vollständig und frei von Singularitäten.

Die Unvollständigkeit formaler Systeme kann behoben werden, indem man zu einem umfassenderen System übergeht, das dann freilich selbst wieder unvollständig ist. Diese Erwartung trifft auch auf Einsteins Theorie zu – eine umfassendere Theorie sollte die bisherigen Singularitäten vermeiden. Im Unterschied zur Mathematik sollte die neue physikalische Theorie idealerweise aber ohne neue Singularitäten auskommen, also keiner umfassenderen Theorie mehr bedürfen. Ob dies der Fall ist, oder ob es womöglich eine unendliche Hierarchie von physikalischen Theorien gibt, entzieht sich unserer Kenntnis. Eine Antwort auf diese Frage wäre von nicht zu unterschätzender Bedeutung.

Gemeinhin nimmt man an, dass eine Quantentheorie der Gravitation die Unvollständigkeit von Einsteins Theorie behebt. Eine solche Theorie liegt erst in Ansätzen vor, doch lassen sich Züge einer „Quantengravitation“ bereits deutlich erkennen. Ein Ansatz geht wesentlich auf Arbeiten des schon erwähnten John Wheeler in Princeton zurück, die dieser in den sechziger Jahren veröffentlicht hatte. Zusammen mit den Arbeiten seines Kollegen Bryce DeWitt aus Austin, Texas, entwickelten die Forscher die Grundlagen dessen, was man heute als Quantengeometrodynamik bezeichnet. Ausgangspunkt ist dabei eine Eigenschaft von Einsteins Theorie, die erst wenige Jahre zuvor erkannt worden war. Man kann die Dynamik der Relativitätstheorie nicht nur

¹⁸SCHMIDHUBER (2021).

¹⁹Siehe HAWKING und ELLIS (1973) für eine ausführliche Behandlung.

durch vierdimensionale Raumzeiten erfassen, sondern durch die Dynamik von dreidimensionalen Geometrien (also „Räumen“), die sich auf sehr unterschiedliche, aber nicht beliebige Weisen in die vierdimensionale Raumzeit einbauen lassen. Die Einschränkungen, die Dreiergeometrien in das Vierdimensionale einzubauen, waren für Wheeler der Ausdruck dafür, dass diese Dreiergeometrien „Information über die Zeit“ enthalten, also Information über deren Lage in der Raumzeit. Zwei unterschiedliche Dreiergeometrien sollten es erlauben, die verstrichene Eigenzeit für alle Beobachter zu ermitteln, die zwischen diesen Geometrien unterwegs sind.

Das ist das Bild der klassischen (Einsteinschen) Theorie. Für die resultierende Quantengravitation hat es drastische Konsequenzen.²⁰ Man weiß aus der Quantenmechanik, dass es dort die aus der klassischen Physik bekannten Bahnen etwa eines Elektrons nicht mehr gibt. Diesen Bahnen entsprechen in Einsteins Theorie aber die vierdimensionalen Raumzeiten. Der gleiche Quantenformalismus, der in der Mechanik das Verschwinden der Bahnen bewirkt, führt dort auf das Verschwinden der Raumzeiten – nur die dreidimensionalen Räume bleiben zurück. Mit der vierten Dimension verschwindet auch die Zeit. Die grundlegenden Gleichungen der Quantengravitation entpuppen sich als zeitlos.

Von Gödel ist leider keine Reaktion auf diese Entwicklungen überliefert. Zusammen mit seinen Kollegen Kip Thorne und Charles Misner stattete John Wheeler Gödel Anfang der siebziger Jahre einen Besuch ab. Die drei waren gerade dabei, ihr umfangreiches Buch *Gravitation* zu vollenden, das sich zu einem, wenn nicht *dem* Klassiker der Relativitätstheorie entwickeln sollte. Die drei wollten von dem berühmten Mathematiker wissen, ob er eine Beziehung zwischen seinem Unvollständigkeitssatz und Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen sehe.²¹ Gödel war ob dieser Frage erbost. Ihn interessierte nur, was die drei in ihrem Buch über seine kosmologische Lösung schreiben wollten.²²

Wheeler konnte sich Gödels ablehnende Reaktion auf die Erwähnung von Heisenbergs Ungleichungen zunächst nicht erklären. Auf einer von Oskar und Dorothy Morgenstern ausgerichteten Cocktailparty fand sich schließlich die Gelegenheit zu einem persönlichen Gespräch mit Gödel. Dabei verriet dieser Wheeler den Grund für seine Unwilligkeit, mit ihm und seinen Kollegen über die Unbestimmtheitsrelationen zu diskutieren:

There, at last, Gödel confessed to me why he had been unwill-

²⁰Siehe z.B. KIEFER (2008) oder BARBOUR (2001) für eine ausführliche Darstellung.

²¹Siehe etwa die Schilderung in YOURGRAU (2005, S. 164 f.).

²²Tatsächlich bleibt Gödels Lösung in dem Buch unerwähnt. Im Literaturverzeichnis findet man dort nur Gödels berühmte Arbeit von 1931 über formal unentscheidbare Systeme der Principia Mathematica und verwandte Systeme. Siehe MISNER *et al.* (1973).

ling to talk with Kip Thorne, Charlie Misner, and me about any possible connection between the undecidability he had discovered in the world of logic and the indeterminism that is a central feature of modern quantum mechanics. Because, he revealed, he did not believe in quantum mechanics. Gödel was a friend of Einstein and apparently the two walked and talked so much that Einstein had convinced him to abandon the teachings of Bohr and Heisenberg.²³

Einstein zweifelte nicht an der Gültigkeit der Quantentheorie, war aber von deren Unvollständigkeit vollkommen überzeugt. In einem ausgeklügelten Gedankenexperiment, das er 1935 zusammen mit Podolsky und Rosen erdacht hatte, und das als EPR-Experiment zu großer Berühmtheit gelangte, zogen die Autoren die Schlussfolgerung, dass die Wellenfunktionen der Quantentheorie keine vollständige Beschreibung der Realität liefern können.²⁴ Dieser Schluss ergab sich insbesondere aus dem Widerspruch einer angenommenen Vollständigkeit mit Einsteins Vorstellung einer Lokalität der Naturbeschreibung, der Vorstellung, dass der reale Zustand eines Systems unabhängig davon ist, was mit einem anderen räumlich getrennten System zur gleichen Zeit geschieht.

Auf den Spaziergängen mit Einstein hatte Gödel also allmählich Einsteins Ablehnung dieser Theorie übernommen. Das hat ihn wohl daran gehindert, Wheelers Zugang zur Quantengravitation ernst zu nehmen und die Nichtexistenz der Zeit auf der Quantenebene als relevant zu akzeptieren. Aber welche Relevanz hat diese Erkenntnis? Und was ist deren Beziehung zu Gödels Kosmologie?

4 Wohin geht der Weg?

Das Verschwinden der Zeit ist keine Eigenschaft, die nur der Quantengeometrodynamik zu eigen ist. Jede klassische Theorie der Gravitation, die wie Einsteins Theorie ein dynamisches Bild von Raum und Zeit enthält, wird bei der Quantisierung der vierten Dimension entledigt. Mit John Wheelers Worten: „Diese Betrachtungen zeigen, daß die Begriffe ‘Raum-Zeit’ und ‘Zeit’ nicht primäre sondern sekundäre Ideen im Aufbau der physikalischen Theorie sind. . . . Es gibt keine Raum-Zeit, keine Zeit, kein Vorher und kein Nachher. Die Frage ‘was geschieht als Nächstes’ verliert jeden Sinn.“²⁵

²³WHEELER and FORD (1998, S. 310).

²⁴Siehe z.B. KIEFER (2015).

²⁵WHEELER (1968, S. 26).

Diese Nichtexistenz der Zeit auf grundlegender Ebene steht natürlich nicht in Widerspruch zum üblichen Zeitbegriff der Physik, doch erweist sich dieser jetzt nur noch als mehr oder weniger gute Näherung. Die Physiker haben eine Reihe ausgeklügelter Verfahren für diese Näherung entwickelt, doch bleibt die Idee einer an sich existierenden Zeit eine Illusion. Gödel ist bereits viel früher zu diesem Schluss gelangt – nicht wegen der Quantengravitation, sondern wegen der Möglichkeit rotierender Universen in Einsteins Theorie. Damit hat er die Tür zu einem Weltbild geöffnet, das bezüglich der Zeit noch viel radikaler ist, als er selbst es sich vorstellen konnte. Gödel ist vor allem als Mathematiker berühmt, doch sei daran erinnert, dass er zunächst Physik studiert hatte. In seinen *Maximen* merkt er dazu an: „Was mich ursprünglich interessiert hat, ist die Erklärung des Alltagslebens aus höheren Begriffen und allgemeinen Gesetzmäßigkeiten, daher Physik.“²⁶ Von diesen ursprünglichen Interessen führt ein gerader Weg zu Gödels Ableitung seiner kosmologischen Lösungen. Sein Weltbild, das Mathematik und Physik umfasste, war konsistent, auch wenn dies auf den ersten Blick nicht so schien. Wie Yourgrau betont hat, war Gödel in bezug auf die Mathematik Realist (als Platoniker) und hinsichtlich der Zeit Idealist, was eben kein Widerspruch darstellt, da eine idealistische Auffassung der Zeit sehr wohl einer realistischen Auffassung der Welt entspricht.²⁷

Einstein, der wie kaum ein anderer den physikalischen Zeitbegriff revolutioniert hat, war zeitlebens bekümmert, dass sich für den Begriff der Gegenwart (im Unterschied zu Vergangenheit und Zukunft) in der Physik kein Platz zu finden schien. Von der geschilderten Perspektive der Quantengravitation aus relativiert sich diese Sorge, da auch Vergangenheit und Zukunft keine fundamentale Bedeutung haben. In gewissem Sinne sind alle diese Begriffe subjektiv und von einer grundlegenden Warte aus ohne Bedeutung.

Die Nichtexistenz der Zeit auf fundamentaler Ebene ergibt sich auf natürliche Weise aus etablierten physikalischen Theorien, die empirisch etabliert sind. Dennoch fällt es selbst Spezialisten schwer, diese Konsequenz zu akzeptieren. Schließlich ist das Erleben der Zeit eine, so scheint es, elementare Alltagserfahrung, die unser Leben und die menschliche Geschichte strukturiert und überhaupt erst ermöglicht. Dass die Zeitlosigkeit der Welt in das allgemeine Bewusstsein eintritt, ist auf absehbare Zeit (sic!) nicht zu erwarten. Sie wird aber in der Wissenschaft allmählich Fuß fassen und von da aus irgendwann in andere Bereiche ausstrahlen, mit Auswirkungen auf das menschliche Leben, welche die Auswirkungen des Übergangs vom ptolemäischen zum kopernikanischen Weltbild bei weitem übersteigen dürften. Wir wären dann

²⁶GÖDEL (2020, S. 81).

²⁷YOURGRAU (2005), S. 161.

wieder bei einem Weltbild angelangt, wie es schon Parmenides von Elea vor über 2000 Jahren propagiert hat – nur auf einer viel höheren Ebene.

Literatur

- [1] BARBOUR, Julian, *The End of Time: The Next Revolution in Physics*, Oxford 2001.
- [2] DAWSON, John W., Jr., *Logical Dilemmas*, Boca Raton 1997.
- [3] GÖDEL, Kurt, An example of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations of gravitation, in: *Reviews of Modern Physics*, **21**, 447–450 (1949).
- [4] GÖDEL, Kurt, Rotating universes in general relativity theory, in: *Proceedings of the International Congress of Mathematicians*, Cambridge, Massachusetts, U.S.A., August 30 to September 6, 1950, American Mathematical Society 1952, S. 175–181.
- [5] GÖDEL, Kurt, Eine Bemerkung über die Beziehungen zwischen der Relativitätstheorie und der idealistischen Philosophie, in: *Albert Einstein als Naturforscher und Philosoph*, hg. von Paul Arthur Schilpp, Stuttgart 1955, S. 406–412.
- [6] GÖDEL, Kurt, *Collected Works, Volume II: Publications 1938–1974*, New York 1990.
- [7] GÖDEL, Kurt, *Collected Works, Volume III: Unpublished Essays and Lectures*, New York 1995.
- [8] GÖDEL, Kurt, *Philosophische Notizbücher, Band I*, hg. von Eva-Maria Engelen, Berlin 2019.
- [9] GÖDEL, Kurt, *Philosophische Notizbücher, Band II*, hg. von Eva-Maria Engelen, Berlin 2020.
- [10] GOLD, Thomas (Hg.), *The Nature of Time*, Ithaca, New York 1967.
- [11] HAWKING, Stephen und ELLIS, George, *The large scale structure of space-time*, Cambridge 1973.
- [12] HAWKING, Stephen und PENROSE, Roger, *Raum und Zeit*, Reinbek 1998.

- [13] KIEFER, Claus, *Der Quantenkosmos*, Frankfurt am Main 2008.
- [14] KIEFER, Claus (Hg.), *Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen, Kann die quantenmechanische Beschreibung der Realität als vollständig betrachtet werden?*, Berlin 2015.
- [15] MISNER, Charles, THORNE, Kip, und WHEELER, John Archibald, *Gravitation*, Macmillan Education 1973.
- [16] SAADEH, Daniela *et al.*, How isotropic is the Universe? In: *Physical Review Letters*, **117**, Artikelnummer 131302 (2016).
- [17] SCHMIDHUBER, Jürgen, Als Kurt Gödel die Grenzen des Berechenbaren entdeckte, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 14. Juni 2021, S. 21.
- [18] THORNE, Kip, *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit: Einsteins Vermächtnis*, München 1994.
- [19] WANG, Peng *et al.*, Possible observational evidence for cosmic filament spin, in: *Nature Astronomy*, **5**, 839–845 (2021).
- [20] WHEELER, John Archibald, *Einsteins Vision*, Berlin 1968.
- [21] WHEELER, John Archibald und FORD, Kenneth, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam*, New York 1998.
- [22] YOURGRAU, Palle, *Gödel, Einstein und die Folgen*, München 2005.