

Zeitreisen und Zeitmaschinen

Christian Wüthrich
University of California, San Diego

In Thomas Müller (ed.), *Philosophie der Zeit: Neue analytische Ansätze*, Frankfurt a.M.: Klostermann, 2007, pp. 191-219.

Im vorliegenden Aufsatz soll geklärt werden, was unter Zeitreisen und Zeitmaschinen in der Philosophie der Physik genau zu verstehen ist. Dabei wird das Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven als hinreichende Bedingung für die Möglichkeit von Zeitreisen in die Vergangenheit im Rahmen von Raumzeittheorien angesehen. Zeitmaschinen werden dann als Apparate interpretiert, die die Raumzeitgeometrie so verändern können, dass geschlossene kausale Kurven auftreten, wo sonst keine aufgetreten wären. Ausgerüstet mit brauchbaren Konzepten gilt es dann herauszufinden, ob Zeitreisen logisch konsistent und begrifflich kohärent sind, oder ob sie notwendigerweise Paradoxien und damit Widersprüche hervorrufen müssen. Ich werde begründen, wie die scharfe begriffliche Fassung uns erlaubt zu sehen, dass keine Widersprüche auftreten und deshalb Zeitreisen logisch gesehen sehr wohl stattfinden können. Weiter versuche ich hier zu zeigen, dass die Präsenz von geschlossenen kausalen Kurven nicht nur eine Überbestimmtheit bedeuten kann die die möglichen dynamischen Entwicklungen einschränkt, wie das gemeinhin angenommen wird, sondern auch einen eher kontraintuitiven Indeterminismus. Weiter soll geklärt werden, was die moderne Physik, und dabei insbesondere die allgemeine Relativitätstheorie (ART) zur Möglichkeit von Zeitreisen sagt. Schliesslich versuche ich etwas summarisch aufzuzeigen, wie eine philosophische und mathematische Analyse von Zeitreisen und Zeitmaschinen Grundlagenfragen in der modernen Physik befruchtet.

1 Das Paradoxe an Zeitreisen

Im Jahr 2029 tobt der Endkampf zwischen Menschen und Maschinen, die von "SkyNet", einer ausser Kontrolle geratenen künstlichen Intelligenz, die vom Militär entwickelt wurde, um strategische Entscheide zu fällen, angeführt werden. Die Menschen scheinen den Krieg zu gewinnen, als es SkyNet gelingt, Zeitreisen in die Vergangenheit technisch umzusetzen. SkyNet schickt einen Cyborg in die Vergangenheit, um die Mutter von John Connor, dem Anführer der Menschen, zu töten, bevor diese John gebären kann. Um dies zu verhindern, sendet Connor seinen Leutnant Kyle Reese ins Jahr 1984 zurück, um seine Mutter vor den Angriffen des Cyborgs zu schützen. Natürlich kommt es also im Jahr

1984 zur Schlacht zwischen Reese und dem Cyborg, die in dem im selben Jahr erschienenen Film *The Terminator* in voller Länge genossen werden kann.

Zeitreisen wie diese sind ein beliebtes Thema der Pop-Kultur, insbesondere des Science Fiction Genres. Oftmals wird dabei eine Variation des sogenannten *Grossvaterparadoxons* behandelt: ein Zeitreisender reist in die Vergangenheit, um seinen Grossvater umzubringen, bevor dieser den Vater des Zeitreisenden zeugen kann, was dazu führt, dass der Zeitreisende niemals zur Welt kommt und daher keine Zeitreisen unternehmen kann, was wiederum den Grossvater, und daher den Zeitreisenden, am Leben belässt, und also die Möglichkeit von mörderischen Zeitreisen offen lässt... Falls also der Terminator seinen mörderischen Auftrag ausführen kann, wird Connor niemals geboren, und kann daher die Menschen nicht zum Sieg über die Maschinen führen. Dies wiederum bedeutet, dass SkyNet kaum einen Anlass hat, Zeitreisen zu entwickeln, da seine Existenz ja nicht mehr bedroht ist. Falls SkyNet aber keine Zeitreisen unternimmt, wird nichts die Geburt von Connor und dessen Aufstieg zum Anführer der Menschen verhindern. Der Plot von *The Terminator* ist allerdings noch um eine *Prädestinationsparadoxie* angereichert, die das drohende Grossvaterparadox zumindest in diesem Fall auflöst. Der Auftrag des Terminators war es, Connor daran zu hindern, zum Anführer des menschlichen Widerstands zu werden. Paradoxaerweise wird dies gerade erst dadurch ermöglicht, dass der Terminator in die Vergangenheit reist und so Reese veranlasst, ebenfalls in die Vergangenheit zu reisen. Später stellt sich nämlich heraus, dass Reese der Vater von Connor ist, und letzterer auf dieser Zeitreise gezeugt wurde. Hätten die Maschinen also nicht versucht, Connors Geburt zu verhindern, wäre er gar nie geboren.

In der populären Literatur finden Zeitreisen oft so statt, dass zunächst das gewünschte Reiseziel, also eine Zeit in der Vergangenheit oder der Zukunft, in einen Zähler eingegeben wird, dann wird ein Knopf gedrückt oder ein Hebel gezogen, und—voilà—der Held befindet sich in einem andern Zeitalter. Eines der Hauptaugenmerke dieses Artikels ist darauf gerichtet, herauszuarbeiten, was die Logik und die moderne Physik zur Möglichkeit von Zeitreisen und Zeitmaschinen zu sagen haben. Die Antworten, die wir zu erhalten hoffen, interessieren deshalb, weil einerseits die Physik die Möglichkeit von Zeitreisen nicht nur zulässt, sondern unter bestimmten Bedingungen sogar voraussagt, und weil andererseits die Logik, wie das durch diverse Paradoxien illustriert wird, diese Möglichkeit gerade zu verbieten scheint. Der Rest dieses Abschnitts wird sich der Auflösung dieses vermeintlichen Widerspruchs widmen.

Diverse Paradoxien scheinen die Möglichkeit von Zeitreisen zu verbieten. Neben den erwähnten Grossvater- und Prädestinationsparadoxien werden oft drohende “nicht-verursachte Effekte” als Beweis der Unmöglichkeit von Zeitreisen ins Feld geführt. Ein Beispiel eines solchen *ontologischen Paradoxons*, die eng mit den Prädestinationsparadoxien zusammenhängen, ist die Geschichte vom ungemalten Gemälde. Eines Tages klopfte eine ältere Version meiner selbst an meiner Tür und überreichte mir ein wundervolles Gemälde. Ich behalte das Bild bis in mein hohes Alter, und zwar bis zum Zeitpunkt, wo ich genug gespart habe, um mir eine Zeitmaschine leisten zu können. Mit dieser Zeitmaschine reise ich mit dem Gemälde unter dem Arm in die Vergangenheit zurück und klinge

an meiner früheren Wohnungstür. Wer hat das Bild gemalt? Niemand—es gibt keine kausale Ursache des Gemäldes. Wenn also kausale Schleifen wie in der Geschichte vom ungemalten Gemälde auftreten, dann kann es sein, dass zwar auf der Schleife lokal alle Ereignisse durchaus Ursachen haben, aber die kausale Schleife als Ganzes hat keine. Das widerspricht so ziemlich allen unseren Intuitionen über Kausalzusammenhänge in der Welt. Deshalb, so das Argument, können kausale Schleifen nicht auftreten.

David Lewis (1976) hat argumentiert, dass solche Szenarien zwar sehr wohl unseren kausalen Anschauungen zuwiderlaufen, aber dass es nicht gänzlich unmöglich sei, dass nicht verursachte und daher unerklärliche Ereignisse auftreten. Laut Lewis gibt es andere solche unerklärliche Ereignisse oder Tatsachen wie zum Beispiel die Existenz Gottes, den Urknall, den Zerfall eines Tritiumatoms und dergleichen mehr. Ich möchte mich dieser Meinung anschliessen und gleichzeitig darauf verweisen, dass eine Welt, in der Zeitreisen möglich sind, schwer mit unseren kausalen Intuitionen zu vereinbaren wäre. Die Kontraintuitivität von Phänomenen in einer Welt, die Zeitreisen erlaubt, ist für sich genommen aber natürlich noch kein Beweis ihrer Unmöglichkeit. Analogerweise können die verwandten Prädestinationsparadoxa als solche Beweise verworfen werden: zwar haftet ihnen zweifelsohne etwas Ironisches an, aber die Tatsache, dass Connors Vater aus der Zukunft anreiste um ihn zu zeugen, ist logisch unproblematisch. Zumindest solange Connors Zeugung zeitlos im Jahre 1984 stattgefunden hat und nicht erst später den Ereignissen von 1984 “hinzugefügt” wurde. Was die Physik zur Möglichkeit von kausalen Schleifen zu sagen hat, wird im nächsten Abschnitt behandelt, aber zumindest die Logik verbietet sie nicht. Im Abschnitt 3 wird eine Version des ontologischen Paradoxons im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie (ART) diskutiert. Dabei wird es darum gehen, ob es nicht doch eine Ursache für das Auftreten von kausalen Schleifen geben kann oder muss.

Das Grossvaterparadoxon hingegen scheint direkt zu zeigen, wie Zeitreisen eine inkonsistente Vergangenheit implizieren und deshalb an der Logik scheitern. Der Grossvater kann nicht gleichzeitig den Vater des Zeitreisenden zeugen und ihn nicht zeugen, zumindest nicht in der klassischen Logik.¹ Unter der Annahme, dass Widersprüche niemals wahr sind, verbietet der Grossvater also inkonsistente Zeitreise-Szenarien. Allerdings, und das ist des Pudels Kern, schliessen diese Paradoxien eben nicht Zeitreisen *simpliciter* aus, sondern eben bloss gewisse Szenarien, die sich Zeitreisen bedienen. Mit John Earman (1995) können wir also schliessen, dass Paradoxien vom Typ Grossvater nichts anderes sind als krude Anmahnungen, dass Zeitreise-Szenarien, übrigens ebenso wie andere Szenarien, die keine Zeitreisen beinhalten, gewisse Konsistenzbedingungen erfüllen müssen, die im Wesentlichen da sind um sicherzustellen, dass keine Widersprüche auftreten. Was auch immer der Zeitreisende also unternimmt, er

¹In einer *dialethischen Logik*, in der Widersprüche wahr sein können, und eventuell in anderen parakonsistenten Logiken, muss eine solche Inkonsistenz nicht die Unmöglichkeit von Zeitreisen bedeuten. Eine mögliche Replik auf das Grossvaterparadox ist also die Verwerfung der klassischen Logik. Dieser Preis wird in diesem Artikel als zu hoch angesehen, insbesondere auch deshalb, weil die Paradoxie anders aufgelöst werden kann, wie gleich argumentiert wird.

wird es nicht schaffen, durch den Mord am jungen Grossvater einen Widerspruch herbeizuführen. Die Konsistenzbedingungen implizieren also, dass der Zeitreisende in solcherlei Hinsicht scheitern *muss*, in dem er zum Beispiel im letzten Moment auf einer Bananenschale ausrutscht und so sein Ziel verfehlt.

Konsistenzbedingungen stellen demnach sicher, dass es bloss eine Vergangenheit geben kann und dass diese nicht verändert werden kann. Falls ein Zeitreisender aus dem Jahr 2029 ins Jahr 1984 zurückreist, dann ist er 1984 “zeitlos” präsent, das heisst, er war also bereits das “erste Mal” da. Entweder wurde John Connors Mutter 1984 getötet oder nicht. Falls sie aber nicht getötet wurde, dann kann sie auch der feuergewaltigste und zerstörerischste Terminator nicht umbringen. Diese Unfähigkeit steht in krassem Gegensatz zur mörderischen Fähigkeit die wir sonst einem gleich ausgerüsteten und trainierten Cyborg unterstellen würden. Der Terminator kann also Connors Mutter umbringen—er hat die dazu nötigen Waffen, langjähriges Training, minutiöse Planung, etc—, aber gleichzeitig kann er es eben nicht, da er sonst die Konsistenzbedingungen verletzen müsste. Lewis (1976) hat die damit drohende modale Inkonsistenz so aufgelöst, indem er argumentiert hat, dass “können” hier ambivalent ist und der Widerspruch deshalb nur durch eine unerlaubte Äquivokation erreicht werden kann. “Können” ist immer relativ zu einer Menge von Tatsachen. Falls diese Menge die Tatsache einschliesst, dass Connors Mutter das Jahr 1984 überlebt hat, dann wird der Terminator sie nicht erschiessen können. Falls diese Tatsache aber nicht eingeschlossen wird, dann kann er es natürlich. Der Widerspruch ist also wiederum bloss scheinbar und Lewis schliesst daraus, dass Zeitreisen in die Vergangenheit zumindest logisch nicht unmöglich sind.

Auch wenn die Logik der Möglichkeit von Reisen in die Vergangenheit also nicht mehr im Wege steht, erwächst dieser Möglichkeit immer noch Widerstand aus der Philosophie. Dieser Widerstand beruft sich typischerweise entweder auf die Unmöglichkeit von Rückwärtskausalität oder die Unwahrscheinlichkeit von Zeitreisen. Diskutieren wir diese beiden Argumente der Reihe nach.

Viele Philosophen haben in den letzten gut drei Jahrzehnten argumentiert, dass obwohl die Vergangenheit nicht verändert, sie sehr wohl kausal beeinflusst werden kann. Diese kausale Einwirkung muss schon nur deswegen möglich sein, damit überhaupt von Zeitreisen gesprochen werden kann: die Antezedensbedingungen bei der Abreise stehen in kausalem Zusammenhang zu den Konsequenzbedingungen bei der (früheren) Ankunft und garantieren dabei die personale Persistenz des Zeitreisenden und so notwendige Identitätsbedingungen.² So sind zum Beispiel der Entsenden von SkyNet im Jahr 2029, einen Cyborg ins Jahr 1984 zu senden, die Einstellungen der dabei verwendeten Zeitmaschine etc. alles Ursachen der Ankunft des Terminators im Jahr 1984. Sie beeinflussen die Ereignisse im Jahr 1984, ohne diese aber zu verändern. Falls die Relation zwischen diesen Ereignissen von 2029 mit jenen von 1984 kausaler Natur ist, haben wir damit sogenannte *Rückwärtskausalität*, d.h. Kausalrelationen, bei denen die Wirkung der Ursache zeitlich vorangeht.

Das *metaphysische* Hauptargument gegen die Möglichkeit von Zeitreisen be-

²Für eine Bibliographie dieser Literatur, cf. Smith (1998).

hauptet nun, dass Zeitreisen notwendigerweise Rückwärtskausalität beinhalten, dass Rückwärtskausalität aber konzeptionell unmöglich ist, und dass deshalb Zeitreisen konzeptionell unmöglich sind. Ich werde im nächsten Abschnitt die erste Prämisse verwerfen oder zumindest qualifizieren, möchte aber zunächst die zweite kurz kommentieren. Der Grundgedanke, weshalb Rückwärtskausalität konzeptionell unmöglich ist, erscheint in der metaphysischen Literatur in grosser Vielfalt.³ Die Grundstruktur ist allerdings dieselbe und nimmt folgenden “Versuchsaufbau” an: Wir planen ein Experiment, bei dem wir versuchen, immer wenn wir die Absenz (Präsenz) der vorgängigen potentiellen Wirkung W beobachtet haben, die nachfolgende potentielle Ursache U zu produzieren (verhindern). Falls wir dieses Experiment wiederholt durchführen, werden wir herausfinden, dass entweder (i) W oft trotz Absenz von U auftritt, und dass U immer wieder scheitert, W zu produzieren, oder (ii) immer wenn W nicht stattfindet, unsere Versuche, U hervorzubringen konsistent fehlschlagen und immer wenn W auftritt, wir das nachfolgende Auftreten von U nicht verhindern können. In Falle (ii) hängt also unsere Fähigkeit U zu produzieren von der vorgängigen Präsenz von W ab. Es scheint also, als ob W eine notwendige kausale Antezedensbedingung von U darstellt, und nicht etwa eine Konsequensbedingung. Im Falle (i) dagegen ist die Hypothese der Rückwärtsverursachung schlicht falsch, da die beiden Faktoren in keiner Kausalrelation stehen.

Dieses Argument gegen die Möglichkeit von Rückwärtskausalität ist zwar nicht universell akzeptiert, doch wird die argumentative Kraft von den meisten Autoren anerkannt. Die Frage, ob Rückwärtskausalität metaphysisch und physikalisch möglich ist, ist eine interessante Frage, die wohl von jeder potentiellen Theorie der Kausalität beantwortet werden muss. Es ist allerdings enorm wichtig zu verstehen, dass sie unabhängig von der Frage nach der Möglichkeit von Zeitreisen im Rahmen der ART ist, da letztere keine Rückwärtskausalität benötigt—oder höchstens in einem sehr qualifizierten Sinn, wobei die Qualifikation ausreicht, um die Kraft des obigen Arguments massiv abzuschwächen. Das obige Argumente gegen die Möglichkeit von Rückwärtskausalität stellt also eine Ignoratio elenchi dar. In Abschnitt 2 wird die Konzeption von Zeitreisen in der ART zur Klärung dieses Punktes beitragen.

Damit kommen wir zum zweiten philosophischen Einwand gegen die Möglichkeit von Zeitreisen, der ursprünglich von Paul Horwich (1987) formuliert wurde und bis heute viele Anhänger hat. Die Tatsache, dass die Logik es dem Terminator verbietet, die Vergangenheit zu verändern, impliziert zwar nicht die Unmöglichkeit von Zeitreisen, wie inzwischen von den meisten anerkannt wird, zeigt aber, so lautet die Behauptung, ihre Unwahrscheinlichkeit. Man stelle sich den bestausgerüsteten, hochtrainierten Terminator vor, der immer wieder auf banalste Art und Weise daran scheitert, Connors Mutter umzubringen. Einmal

³Für eine klassische Formulierung, cf. Mellor (1981). Es handelt sich um eine Version des sogenannten “bilking”, also “Zechpreller-”, Arguments, das erstmals von Black (1956) formuliert wurde und auf welches Dummett (1964) in seiner klassischen Verteidigung der Rückwärtskausalität reagiert. Das nachfolgende Argument ist grob vereinfacht und vernachlässigt zusätzliche Faktoren wie den Informationsstand des epistemischen Agenten, die möglicherweise statistische Natur von gewissen Kausalrelationen, etc.

klemmt gerade der Abzug, ein anderes Mal tritt ein seltener Softwarefehler auf, das dritte Mal gleitet der Terminator auf einer Bananenschale aus, das vierte Mal ist Reese rechtzeitig zur Stelle um Connors Mutter auf spektakuläre Weise zu retten, etc. Je öfter der Terminator den Mord versucht und scheitert, desto unwahrscheinlicher erscheinen uns die immer feiner tarierten Erklärungen seines Scheiterns.

Abgesehen von philosophischen Einwänden, die gegen dieses Argument aufgeführt worden sind,⁴ erwachsen letzterem auch Schwierigkeiten sowohl in der exakten Formulierung und Interpretation der probabilistischen Behauptung, wie auch durch die Interpretation der Konsistenzbedingungen. Was genau könnte also mit der Behauptung gemeint sein, dass Zeitreise-Szenarien “unwahrscheinlich” sind? Falls die betreffenden Wahrscheinlichkeiten objektiv interpretiert werden sollen, müssten wir also in der Lage sein, einen angemessenen Ereignisraum mit einem gerechtfertigten, wohl-definierten Mass zu formulieren, und anschliessend darin den Unterraum der Szenarien-cum-Zeitreisen identifizieren. Das scheint kaum auf eine prinzipielle Art und Weise in voller Allgemeinheit möglich. Falls die Allgemeinheit bloss auf die ART eingeschränkt wird, könnten wir versuchen einen solchen gewichteten Ereignisraum durch Modelle der ART zu bevölkern, dann auszumachen, welche dieser Modelle unser Universum oder ein Subsystem dessen beschreiben, und letztlich zu schliessen, dass geschlossene kausale Kurven in diesen Modellen sehr selten vorkommen. Ein solches Argument würde allerdings eine detaillierte Studie in der ART voraussetzen und kann beim gegenwärtigen Forschungsstand in der ART nicht sehr rigoros gemacht werden. Mit Sicherheit ist es nicht in Horwich (1987) formuliert.

Es ist andererseits zwar sehr wohl möglich, dass systematisch getestetes Wettverhalten von maximal rationalen, menschlichen Agenten Zeitreise-Szenarien eine subjektiv interpretierte niedrige Wahrscheinlichkeit zuschreiben würde. Da aber eben gerade unsere ungeschulten Intuitionen in diesen Szenarien aufgrund unserer Unvertrautheit mit solchen Phänomenen sehr unzuverlässige Indikatoren sind, scheint eine subjektiv interpretierte niedrige Wahrscheinlichkeit von Zeitreisen nicht mehr auszusagen, als dass solche Szenarien unseren Vorstellungen “bizarri” erscheinen. Das ist zwar ein potentiell interessanter psychologischer Punkt, sagt aber kaum etwas über die metaphysische Wahrscheinlichkeit von Zeitreisen aus.

Die zweite Schwierigkeit von Horwichs Argument besteht darin, dass die Konsistenzbedingungen zumindest mit einigem Recht als Naturgesetze angesehen werden können. Ob Konsistenzbedingungen Naturgesetze sind, wird zweifelsohne nicht zuletzt von unserer metaphysischen Analyse von Naturgesetzen abhängen, wie Earman (1995) überzeugend dargelegt hat. Falls die Konsistenzbedingungen aber universell gültige Naturgesetze sind, dann ist es verfehlt von deren Existenz auf die Unwahrscheinlichkeit von Zeitreisen zu schliessen. Aus der Tatsache, dass Newtons Gravitationsgesetz (zumindest annähernd) ein Naturgesetz ist schliessen wir ja auch nicht, dass eine lange Versuchsreihe von über der Erdoberfläche losgelassener und sich zum Erdmittelpunkt *hin*—statt

⁴Cf. Smith (1997).

weg—bewegter Körper sehr unwahrscheinlich ist. Natürlich kann die Menge der relevanten möglichen Welten so erweitert werden, dass trotz des nomologischen Status von Newtons Gravitationsgesetz in der aktuellen Welt die Untermenge der Welten, in denen die Objekte vom Erdmittelpunkt weg fliegen, plötzlich viel grösser ist als die Untermenge der Welten, wo sich die Objekte konsistent zum Erdmittelpunkt hin bewegen. Eine solche Erweiterung bedingt allerdings solche modale Verrenkungen, dass das Argument nicht mehr sehr überzeugend ist. Das bedeutet natürlich noch nicht, dass Zeitreisen mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten müssen, sondern bloss, dass von der Notwendigkeit von Konsistenzbedingungen nicht auf deren Unwahrscheinlichkeit geschlossen werden kann.

Diese Überlegungen zeigen, dass Horwichs Behauptung, wonach Zeitreise-Szenarien extrem unwahrscheinlich sind, zumindest stark qualifiziert oder ergänzt werden muss. In den nächsten beiden Abschnitten 2 und 3 werden wir sogar sehen, dass die Präsenz von geschlossenen kausalen Kurven im allgemeinen nicht via Konsistenzbedingungen zu dieser Art von unwahrscheinlicher Überdeterminiertheit, sondern im Gegenteil zu krasser *Unterdeterminiert* führen kann.

Dieser Abschnitt hat also gezeigt, dass die normalerweise gegen die Möglichkeit von Zeitreisen aufgeführten logischen und metaphysischen Argumente nicht bloss inkonklusiv, sondern oft fehlschlüssig sind. Der nun folgende Abschnitt wird sich der Frage widmen, ob denn Zeitreisen nicht wenigstens physikalisch unmöglich sind.

2 Erlaubt die Physik Zeitreisen?

Um die Frage im Titel dieses Abschnitts anzugehen, müssen zunächst die beiden zentralen Begriffe “Zeitreise” und “Zeitmaschine” etwas differenziert werden. Die Erörterung von Zeitreisen und -maschinen im Rahmen der modernen Physik muss auf eine saubere Konzeption dieser beiden Begriffe zurückgreifen, um mit dem formalen Apparat der theoretischen Physik in Kontakt zu treten. Insbesondere benötigen wir eine Formulierung der Fragestellung in der in der ART üblichen Raumzeitsprache. In dieser wird die Zeit nicht bloss als eine eindimensionale Grösse betrachtet, entlang deren man sich vorwärts und eventuell auch rückwärts bewegen kann, sondern sie geht zusammen mit den drei Dimensionen des physikalischen Raumes in einer vierdimensionalen *Raumzeit* auf. Es ist dabei nicht so, dass die Zeit die “vierte Dimension” darstellt. Vielmehr werden der physikalische Raum und die Zeit durch eine vierdimensionale Struktur ersetzt, die sich eben gerade dadurch auszeichnet, dass keine universell gültige, also beobachterunabhängige, Auftrennung der Raumzeit in Raum und Zeit mehr möglich ist. Eine solche Auftrennung ist immer bloss relativ zu einem Beobachter oder, äquivalent, zu einem Koordinatensystem gültig.

Die nun als fundamental angesehene Raumzeit wird durch eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit \mathcal{M} von “Ereignissen” oder Raumzeitpunkten und eine darauf überall definierte Metrik g gegeben. Die Punkte von \mathcal{M} können durch vier glatte Funktionen, also durch ein Koordinatensystem, eindeutig gekennzeichnet werden. Trotz der unauftrennbaren Verwobenheit von Raum und Zeit

kann also ein Koordinatensystem eingeführt werden, das lokal eine Zeit- und drei Raumrichtungen bestimmt. Dies kann nicht völlig ohne Einschränkungen geschehen, sondern es muss dabei die objektive, beobachterunabhängige Geometrie der Raumzeit respektiert werden. Im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie (SRT) bedeutet dies, dass ein Koordinatensystem ein Inertialsystem repräsentieren muss, dass also kräftefreie Bewegungen geradlinig dargestellt werden müssen. In der ART muss der Begriff der “Geradlinigkeit” aufgrund der im Allgemeinen gekrümmten Räumen zur Geodäten verallgemeinert werden. In der ART ist es im Allgemeinen nicht mehr möglich, globale Inertialsysteme einzuführen. Lokal kann aber immer ein Inertialsystem gefunden werden, da die Raumzeit lokal, also für genügend kleine raumzeitliche Ausdehnungen, immer flach ist.

Die Raumzeitgeometrie bestimmt, wie Licht durch die Raumzeit propagiert wird; gleichzeitig ergibt sich aus der Propagation des Lichtes die kausale Struktur der Raumzeit, da durch das Lichtpostulat der SRT vorgeschrieben wird, dass kein kausaler Einfluss sich jemals schneller als das Licht fortpflanzen kann. Insbesondere bedeutet dies, dass eine “instantane” Beeinflussung, also ein Signal, das sich ohne Zeitverlust fortpflanzt, physikalisch verboten ist.

In der ART wird die Geometrie der Raumzeit durch das metrische Feld g , das überall auf \mathcal{M} definiert ist, charakterisiert. Grundsätzlich gibt g an, welche raumzeitliche Distanz zwischen zwei Punkten in \mathcal{M} liegt. Vorallem aber wird durch g für jeden Punkt in der vierdimensionalen Raumzeit die sogenannten Lichtkegel eindeutig bestimmt. Die Lichtkegel in einem Punkt p sind durch die Menge der Punkte in \mathcal{M} gegeben, die entweder durch ein von p ausgehendes Lichtsignal erreicht werden können (“Zukunftslichtkegel”) oder von denen ausgehend p durch ein Lichtsignal erreicht werden kann (“Vergangenheitslichtkegel”). Abbildung 1 zeigt eine eindimensionale Kurve in einer Raumzeit, die zur Veranschaulichung auf je eine zeitartige und eine raumartige Dimension reduziert wurde. Die Einheiten wurden dabei so gewählt, dass die Lichtkegel in einem 45° -Winkel auf- und absteigen. Ebenen, die parallel zur Raumachse des eingeführten Koordinatensystems liegen, bilden eine *Gleichzeitigkeitsebene* für ebendieses Koordinatensystem und stellen das Universum zu einem relativ zum Koordinatensystem bestimmten Zeitpunkt dar. Da verschiedene Koordinatensystem verschiedene Gleichzeitigkeitsebenen definieren, führen durch jeden Punkt der Raumzeit unendlich viele Gleichzeitigkeitsebenen—eine pro Inertialsystem.

Zwei Punkte, von denen der eine jeweils innerhalb der Lichtkegel des andern liegt, heissen *zeitartig* voneinander entfernt; falls sich die beiden Punkte jeweils *auf* den Lichtkegeln des andern befinden, sind sie *lichtartig* voneinander entfernt; und falls sie jeweils ausserhalb der Lichtkegel liegen, spricht man von *raumartig* entfernten Punkten. Zwischen zwei raumartig entfernten Punkten können keine Signale ausgetauscht werden. Eine Kurve in \mathcal{M} ist dann *zeitartig*, wenn sie überall mindestens so steil ist wie die Lichtkegel, sich also langsamer bewegt als das Licht. Eine zeitartige Kurve durch einen Punkt $p \in \mathcal{M}$ befindet sich also vollständig in den beiden Lichtkegeln von p . Die Bedingung der Zeitartigkeit garantiert die Befolgung des Lichtpostulats, das auch in der ART gültig bleibt. Eine solche Kurve zeichnet den Weg eines physikalischen Körpers in der

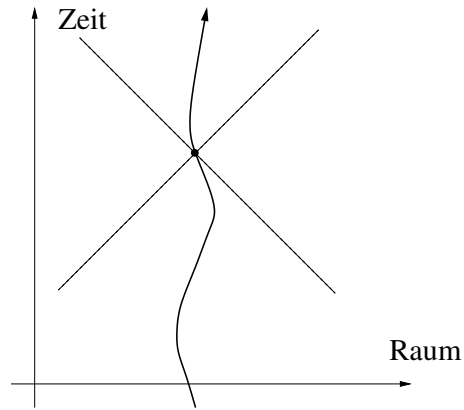


Abbildung 1: Weltlinie im Raumzeit-Kontinuum mit Lichtkegel in einem Punkt.

Raumzeit nach und wird eine *Weltlinie* genannt.

Wie kann man sich nun Zeitreisen in dieser Raumzeitsprache vorstellen? Wenn man sich ein Koordinatensystem eingeführt denkt, und zwei Punkte p und q in \mathcal{M} betrachtet, die zeitartig voneinander entfernt liegen, dann illustriert Abbildung 2 in zwei Dimensionen wie eine typische Zeitreise vorstatten geht: Der Zeitreisende befindet sich stationär an einem (räumlichen) Ort x_1 und

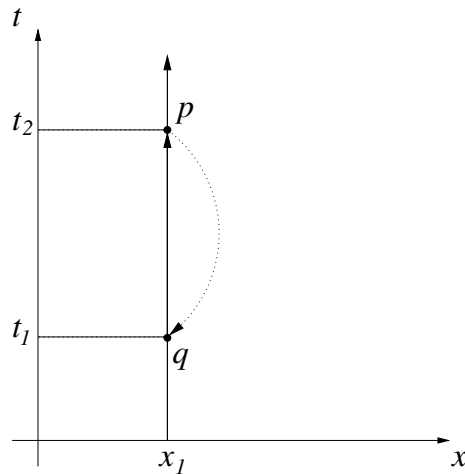


Abbildung 2: Raumzeitdiagramm einer typischen Zeitreise.

bewegt sich bloss parallel zur Zeitachse t . Zu einem bestimmten Zeitpunkt t_2 , also beim Erreichen des Punktes p , betätigt der Zeitreisende einen Hebel, der die Zeitreise zurück vom vorher eingestellten Zeitpunkt t_1 , also zum Raumzeitpunkt q , auslöst. Der Raumzeitpunkt q liegt im Vergangenheitslichtkegel von p : Der Reisende reist also in die eigene Vergangenheit! Wie genau er dahinge-

langt, d.h. entlang welcher Weltlinie er von p nach q reist, ist zunächst offen. Einige Kommentatoren haben solche Zeitreisen als physikalisch unmöglich ausgeschlossen, da dabei angeblich Diskontinuitäten, die als unphysikalisch gelten, auftreten. Das muss allerdings nicht der Fall sein, da die Kurve entlang welcher der Zeitreisende reist, überall glatt sein kann.

Falls die Weltlinie des Zeitreisenden allerdings überall glatt und nirgendwo unterbrochen ist, muss sie entweder irgendwo zunächst lichtartig und dann raumartig werden, also licht- bzw. raumartig voneinander entfernte Punkte verbinden, oder sie muss sich räumlich stationär in der Zeitrichtung verlangsamen, dann stillstehen, und schliesslich zeitlich rückwärts laufend zum Punkt q zurückkriechen. Im ersten Fall wird das Lichtpostulat verletzt und die Bewegung deshalb als unphysikalisch verworfen. In beiden Fällen tritt aber auf, was als Rückwärtskausalität interpretiert werden muss: Signale, die sich zwar zeitartig ausbreiten, aber dies in Richtung des Vergangenheitslichtkegels tun (siehe Abbildung 3). Falls die im Abschnitt 1 aufgeführten grundsätzlichen Überlegun-

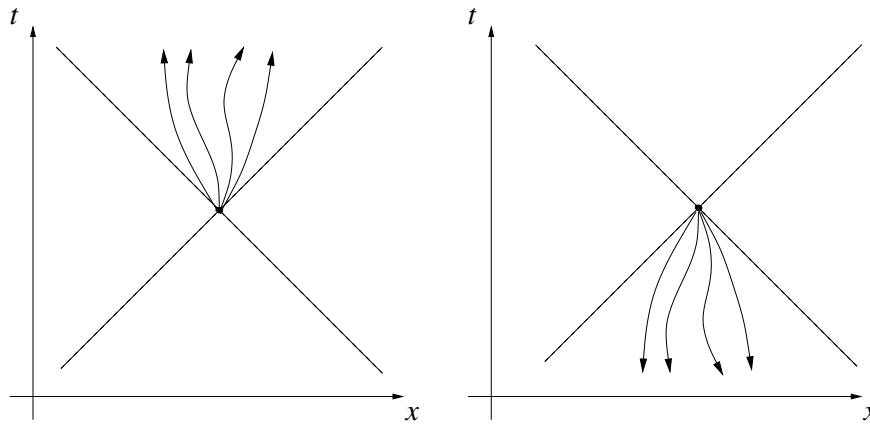


Abbildung 3: Vorwärts- resp. Rückwärtskausalität.

gen gegen die Möglichkeit von Rückwärtskausalität zutreffend sind, sind Zeitreisen wie in Abbildung 2 also entweder aus physikalischen oder philosophischen Gründen nicht gestattet.

Interessanterweise können nun gerade gemäss der modernen Physik, insbesondere gemäss der ART, Zeitreisen stattfinden *ohne dass Rückwärtskausalität im Spiel ist*. Wenn Zeitreisen aber ohne Rückwärtskausalität stattfinden können, dann werden sämtliche Argumente, die sie verbieten wollen, indem sie Einwände gegen die Möglichkeit von rückwärts gerichteter Kausalität formulieren, obsolet, wie ich es oben erwähnt habe. Falls nicht mittels Rückwärtskausalität—wie gemeinhin angenommen—, wie kann dann eine Zeitreise überhaupt rechtens von sich behaupten können, eine Reise in die Vergangenheit zu sein? Um diese Frage zu beantworten, bedarf es einer kurzen Einführung in die ART.

Das Kernstück der ART bilden die sogenannten *Einsteingleichungen* (oder “Einsteinsche Feldgleichungen”), die die Raumzeitgeometrie und die Verteilung

der Massen und der Energie im Universum zueinander in Beziehung setzen:

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = 8\pi T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

wobei $G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}]$, der sogenannte *Einsteintensor*, ein Funktional der Metrik g und ihren ersten und zweiten partiellen Ableitungen und $T_{\mu\nu}$ der sogenannte *Energie-Impuls-Tensor* ist. Der Einsteintensor, und damit die linke Seite von (1), enthält die vollständige Information über die geometrische Struktur der Raumzeit. Der Energie-Impuls-Tensor, und damit die rechte Seite von (1), beschreibt die Dichteverteilung von (Energie und) Materie im Universum. Die Gleichungen (1) formulieren also die dynamische Wechselwirkung zwischen Materie und Felder einerseits und der Geometrie der Raumzeit andererseits. Die Raumzeitgeometrie bestimmt via (1) wie sich Materie und Felder bewegen müssen, und die Verteilung der Materie und Felder zeigt der Raumzeitgeometrie durch (1) wie sie sich zu krümmen hat. Je dichter Massen und Energie an einem Raumzeitpunkt sind, desto mehr wird die Raumzeit an dieser Stelle gekrümmt. In Einsteins ART wird im Kern Gravitation also als Krümmung der raumzeitlichen Geometrie verstanden. Jedes Tripel $\langle \mathcal{M}, g, T_{\mu\nu} \rangle$, das die Gleichungen (1) löst ist eine gemäss der ART erlaubte und daher physikalisch zulässige Raumzeit mit Massen- und Energieverteilung. Die SRT studiert rein kinematische Phänomene und setzt deshalb eine schwerkraftsfreie Welt voraus. Insofern als die von ihr verwendete Minkowski-Raumzeit eine Vakuumlösung ($T_{\mu\nu} = 0$) von (1) ist, kann die SRT als Spezialfall der ART ohne Gravitation und also mit einer flachen Raumzeit operierend angesehen werden.

In Analogie zum Globus, auf dessen Oberfläche man beispielsweise immer gegen Westen gehen und dabei an den Ausgangsort zurückkehren kann, ist es nun in einer gekrümmten Raumzeit möglich, zum Ausgangspunkt einer Reise zurückzukehren. Da es sich um eine gekrümmte Raumzeit handelt, ist es sogar möglich, nicht bloss zum Ausgangsort, sondern eben auch zur Ausgangszeit zurückzukehren. Eine Kurve in einer Raumzeit kann also geschlossen sein, d.h. sie kann sich im Ausgangspunkt schneiden. Falls eine solche geschlossene Kurve überall zeit- oder lichtartig ist, und so also ohne Rückwärtskausalität, sondern bloss mit der Vorwärtspropagation von kausalen Einflüssen auskommt, heisst sie *geschlossene kausale Kurve*. In der physikalischen Literatur wird nun die Möglichkeit von Zeitreisen auf die Frage zurückgeführt, ob die Raumzeitgeometrie solche geschlossene kausale Kurven zulässt. Dies formalisiert die Thematik der physikalischen Möglichkeit von Zeitreisen deshalb auf adäquate Weise, weil letztlich die in Abschnitt 1 erörterten Paradoxien dann aufzutreten drohen, wenn kausale Schleifen geschlossen werden.

Erlaubt die ART nun das Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven in physikalisch zulässigen Raumzeiten? Kurt Gödel (1949) hat die Frage bejahend aufgelöst in dem er eine Lösung des Gleichungssystems (1) präsentierte, die solche geschlossenen kausalen Kurven enthält. In dieser sogenannten *Gödel-Raumzeit* ist es sogar so, dass durch alle Punkte der Raumzeit mindestens eine geschlossene kausale Kurve führt. Aber wie kann eine Kurve gleichzeitig kausal und trotzdem geschlossen sein? Sie kann das unter Ausnützung

der geometrischen Struktur der Raumzeit, der raumzeitlichen Krümmung. Die grundsätzliche Idee wie eine Krümmung der Raumzeit geschlossene kausale Kurven ermöglicht ist in Abbildung 4 illustriert: Durch Zusammenkleben der Ober-

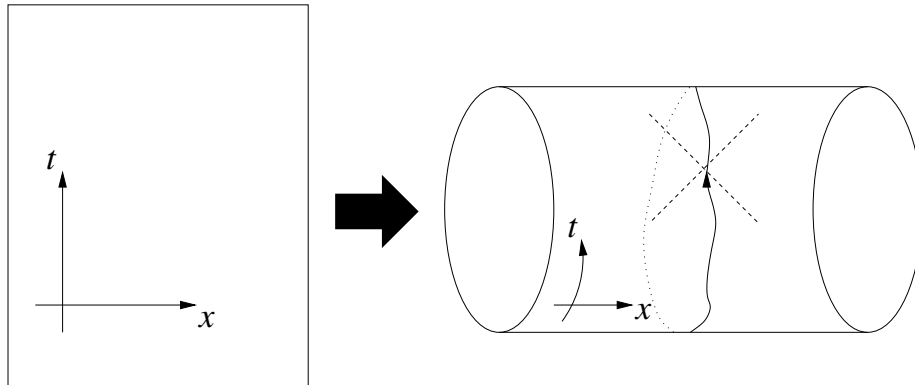


Abbildung 4: Wie Krümmung eine geschlossene kausale Kurve erzeugen kann.

und Unterseite eines räumlich unendlich langen Bandes endlicher Breite entsteht ein Zylinder, der in zeitlicher Richtung geschlossen ist. In diesem Fall können also durch jeden Punkt auf der Zylinderoberfläche (unser \mathcal{M} hier) geschlossene kausale Kurven gelegt werden. Die auftretenden Akausalitäten sind “global”, da es keine Region von \mathcal{M} gibt, die von geschlossenen kausalen Kurven verschont bleibt.

Es ist natürlich auch möglich, dass geschlossene kausale Kurven nur in einer Region der Raumzeit auftreten, also bloss “lokal”. Das geschieht zum Beispiel bei einem sogenannten *Deutsch-Politzer Gatter*, dessen Konstruktionsanleitung in Abbildung 5 angegeben ist. Die Konstruktion bildet einen Henkel, der quer zur

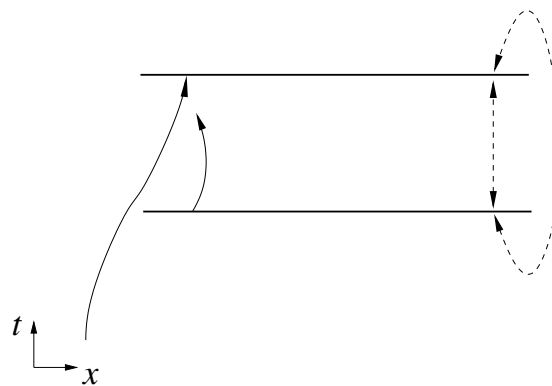


Abbildung 5: Konstruktion eines Deutsch-Politzer Gatters: schneide entlang der beiden Linien and identifiziere die Enden gemäss den gestrichelten Doppelpfeilen.

Zeitachse liegt (siehe Abbildung 6). Die Weltlinien können also dann geschlossen

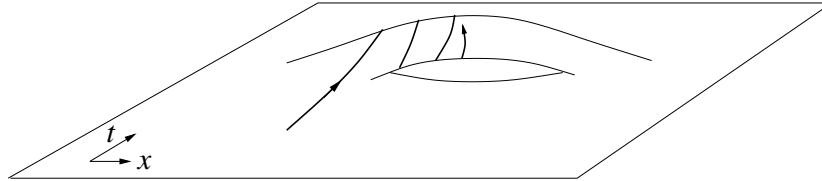


Abbildung 6: Das Deutsch-Politzer Gatter ist ein lokaler Henkel.

werden, wenn sie in den Bereich des Henkels gelangen, um den herum sie sich beliebig oft winden können. Wir haben also bei einem Deutsch-Politzer Gatter lokal einen Zylinder mit "zyklischer" Zeit, wie das in Abbildung 4 der Fall war.

Die Gödelsche Raumzeit kann als stationäres, also nicht-expandierendes Universum mit rotierenden Galaxien interpretiert werden. Weil die beobachtete Rotverschiebung entfernter Sterne systematisch auf eine Expansion des Universums hindeutet, und weil Gödels Raumzeit eine fein austarierte, nicht-verschwindende kosmologische Konstante benötigt, stellt sie trotz ihres pädagogischen Werts kein realistisches kosmologisches Modell dar. Es gibt aber in der ART physikalisch realistischere und relevantere Raumzeiten, die geschlossene kausale Kurven enthalten. Die wohl wichtigsten Beispiele sind rotierende schwarze Löcher, die sogenannten *Kerr-Newman Raumzeiten*, und Wurm Löcher, die durch sogenannte *Einstein-Rosen-Brücken* entstehen.

Die ART erlaubt also explizit das Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven, und damit die Möglichkeit von Zeitreisen, und das sogar in physikalisch realistischen Raumzeiten. Insofern als die ART die momentan beste und vollständigste wissenschaftliche Theorie der Gravitation ist, muss die Möglichkeit von Zeitreisen ernst genommen werden. Es kann natürlich sein, dass in einer noch zu formulierenden Theorie der Quantengravitation, die die ART als fundamentale Theorie der Gravitation ablöst, geschlossene kausale Kurven nicht mehr auftreten können. Auch wenn die physikalische Möglichkeit von Zeitreisen damit ad acta gelegt werden könnte, wäre es für die Philosophie der Physik immer noch wichtig zu verstehen, weshalb die ART, aber nicht die fundamentalere Theorie, geschlossene kausale Kurven zulässt, weil dies zur Klärung des Verhältnisses zwischen ART und Quantengravitation notwendig wäre.

Obwohl also theoretisch möglich, bleibt die Frage, ob Zeitreisen in die Vergangenheit auch praktikabel sind. Mit anderen Worten: Ist eine Zeitreiseagentur, die Zeitreisen unter Ausnützung zum Beispiel von rotierenden schwarzen Löchern anbietet, eine erfolgsversprechende Businessidee? Es stellt sich heraus, dass das leider nicht der Fall ist: Sowohl in der Gödelschen wie auch in der Kerr-Newman Raumzeit wäre der Energieaufwand für ein Raumschiff um einer geschlossenen kausalen Kurve zu folgen, astronomisch. Es stellt sich allerdings heraus, dass im Falle der Kerr-Newman Raumzeit der Energieverbrauch reduziert werden kann, wenn das schwarze Loch supermassiv ist. Jedoch ist die Reduktion so gering, dass das schwarze Loch wesentlich mehr als die Masse des

gesamten bekannten sichtbaren Universums enthalten müsste, um Zeitreisen mit einem realistischen Energieaufwand zu betreiben.⁵ Trotz aller praktischen Vorbehalte muss also konstatiert werden, dass die gegenwärtige Physik zumindest theoretisch Zeitreisen in die Vergangenheit erlaubt. Da geschlossene kausale Kurven auch in Raumzeiten vorkommen, von denen angenommen wird, dass sie die beste erhältliche Beschreibung von rotierenden schwarzen Löchern liefern, und weil weiter davon ausgegangen wird, dass rotierende schwarze Löcher im Universum vielfach vorkommen, werden Zeitreisen von der ART nicht bloss erlaubt, sondern geradezu vorausgesagt.

Die von der ART vorausgesagten Zeitreisen sind sicherlich konsistent, weil die entsprechenden Raumzeiten konsistente Modelle einer konsistenten Theorie sind. Natürlich müssen dabei auch bestimmte Konsistenzbedingungen erfüllt sein. Diese fordern zunächst einmal, dass Weltlinien nicht einfach aus dem Nichts entstehen oder ins Nichts verschwinden können. Verletzungen dieser Art von Konsistenzbedingung wurden in Abbildung 7 mit Kreuzen markiert. Für

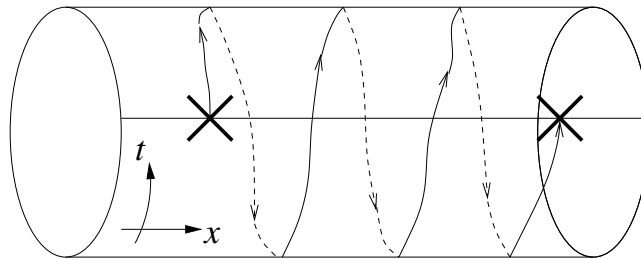


Abbildung 7: Konsistenzbedingungen an eine Weltlinie in einer zylinderförmigen Raumzeit.

Materie- und Energiefelder, die entlang von geschlossenen kausalen Kurven definiert sind, müssen weiter Stetigkeitsbedingungen erfüllt sein. Das bedeutet, dass ein Feld sich entlang einer geschlossenen kausalen Kurve nicht plötzlich verändern kann. Insbesondere muss der Zustand eines physikalischen Systems, das sich entlang einer geschlossenen kausalen Kurve bewegt, bei der Rückkehr zum Ausgangspunkt auch wieder in den Ausgangszustand gebracht werden. Der Tank des Raumschiffes muss sich also wieder auffüllen und den anfänglichen Füllstand erreichen, der Bartwuchs des Zeitreisenden muss regredieren, so dass die Stoppeln wieder so kurz werden wie bei der Abreise, etc. Grundsätzlich muss auch in jedem physikalischen System mit einer wohldefinierten Entropie diese entlang einer geschlossenen kausalen Kurve entweder gar nie ansteigen, oder aber dann wieder auf das Ausgangsniveau zurückkehren. Insgesamt lässt sich festhalten, dass diese Konsistenzbedingungen doch genügend einschränkend sind, so dass sie bloss simple Szenarien zulassen und dass eine Zeitreise eines Menschen wohl ausgeschlossen werden kann. Wer das bedauert, dem kann zum

⁵Die Masse des gesamten sichtbaren Universums ist ca. 10^{22} Sonnenmassen. Das grösste bekannte schwarze Loch ist von einer Grössenordnung von 10^{10} Sonnenmassen. Cf. Wüthrich (1999). Für die Gödelsche Raumzeit, cf. Malament (1985).

Trost versichert werden, dass das Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven für die Philosophie der Physik aus folgenden Gründen trotzdem sehr bedeutsam ist.

Die Konsistenzbedingungen, die möglichen Zeitreise-Szenarien auferlegt werden müssen, schränken diese massiv ein. In diesem Sinne wird die Anzahl möglicher dynamischer Entwicklungen eines vorgegebenen Anfangszustandes eines physikalischen Systems drastisch reduziert. Insbesondere erwartet man auch, dass die Konsistenzbedingungen auch die möglichen Anfangszustände selber einschränken, diesen also Bedingungen auferlegen, so dass nicht mehr alle Anfangszustände, die ohne Zeitreisen zulässig wären, in Raumzeiten mit geschlossenen kausalen Kurven konsistenterweise noch zugelassen werden können.

Versuchen wir dies etwas anschaulicher zu verdeutlichen. Eine grosse Klasse von allgemein relativistischen Raumzeiten lässt eine unendlich dünne “Zeitscheibe” Σ , also eine raumartige “Ebene”, die \mathcal{M} in drei Teile teilt, zu. Diese drei Teile sind Σ selber, sowie die “Vergangenheit” und die “Zukunft” von Σ .⁶ Nehmen wir nun an, dass sich in der Vergangenheit von Σ keine geschlossenen kausalen Kurven befinden. Auf einer Untermenge von Σ ist der Anfangszustand eines physikalischen Systems definiert. Falls sich nun wie in Abbildung 8 irgendwo in der Zukunft dieser Zeitscheibe ein Deutsch-Politzer Gatter öffnet

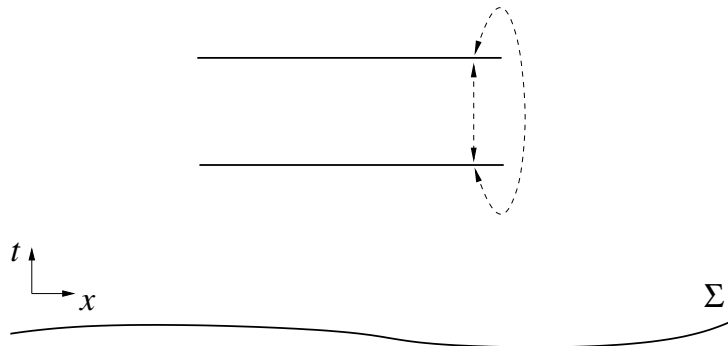


Abbildung 8: Zeitscheibe Σ mit Deutsch-Politzer Gatter in ihrer Zukunft.

und falls deshalb in der Zukunft also geschlossene kausale Kurven existieren, dann würde das bedeuten, dass zum Beispiel gewisse Anfangszustände, die dazu führen würden, dass die Konsistenz verletzende Raumschiffe in das Gatter fliegen, als unmöglich, weil inkonsistent, ausgeschlossen werden müssen, die sich ohne Gatter völlig konsistent entwickelt hätten. In diesem Sinn können also Konsistenzbedingungen nicht nur mögliche dynamische Szenarien, sondern sogar gewisse Anfangszustände verbieten.

Zurückgehend auf eine Idee von Wheeler und Feynman (1949), illustrieren Arntzenius und Maudlin (2005) die Wirkung von Konsistenzbedingungen am

⁶Es stellt sich heraus, dass die Gödel-Raumzeit keine solchen Zeitscheiben zulässt. Die Anführungszeichen sollen dazu dienen, hervorzuheben, dass diese Begriffe nicht absolut, sondern bloss in Bezug auf eine gewisse Beobachterschar gelten, sie werden ab hier weggelassen.

anschaulichen Beispiel einer Schwarzweissphotographie, deren Negativ entlang einer geschlossenen kausalen Kurve geschickt wird. Dazu benützen wir eine Kamera, um eine Schwarzweissaufnahme eines Negativs eines Schwarzweissphotos zu machen, das gerade von einer Zeitreise, d.h. von einer kausalen Schleife, zurückkehrt. Die Aufnahme wird entwickelt, und der entwickelte Film wird auf die Zeitreise geschickt, so dass das Negativ der Aufnahme gerade wieder vor unsere Kamera zu liegen kommt, bevor wir die Aufnahme gemacht haben. Da entwickelte Schwarzweissfilme gerade die umgekehrte Helligkeit haben wie die Objekte, die sie aufgenommen haben, scheint ein Paradoxon unumgänglich. Falls das photographierte Negativ schwarz ist, wird der danach entwickelte Film weiss zeigen, und umgekehrt. Da aber das photographierte Negativ mit dem entwickelten Film identisch sein muss, folgt ein Widerspruch. Der scheinbare Widerspruch wird aber aufgelöst, wenn wir erkennen, dass das Negativ einfach ein gleichmässiges Mittelgrau aufweisen muss, dessen Negativ wiederum die exakt gleiche Schattierung von Grau hat. Das Problem lässt sich mathematisch als Fixpunktproblem beschreiben, wobei die Fragestellung darauf abzielt, unter welchen Bedingungen eine Funktion f einen Fixpunkt aufweist, wobei ein Fixpunkt ein Punkt x ist für den $f(x) = x$ gilt. Allgemeiner lässt sich die Existenz von konsistenten Zeitreise-Szenarien manchmal, aber bei weitem nicht immer, mathematisch durch den Beweis von Fixpunktsätzen nachweisen.

Im Beispiel mit dem zeitreisenden Photo zwingen Konsistenzbedingungen dem Negativ also eine bestimmte Grauschattierung auf. Wenn das Negativ keine Zeitreise unternehmen würde, dann könnte es eine beliebige von kontinuierlich vielen Schattierungen zwischen weiss und schwarz annehmen. In diesem Sinn können Konsistenzbedingungen also extrem einschränkend wirken. Interessanterweise gilt im Allgemeinen umgekehrt auch, dass die Präsenz von geschlossenen kausalen Kurven eine Art Indeterminismus, also Unterbestimmtheit, einführt, wie Arntzenius und Maudlin (2005) dargelegt haben. Da es unmöglich ist, im Rahmen dieses Artikels dem Thema vollumfänglich gerecht zu werden, begnüge ich mich mit einer Illustration des auftretenden Indeterminismus.

Betrachten wir mit Arntzenius und Maudlin (2005) wieder die Situation, wie ich sie in Abbildung 8 dargestellt habe. Die klassische Formulierung der Determinismusbedingung geht auf Laplace zurück und fordert für eine deterministische Theorie, dass der vollständige Zustand eines physikalischen Systems zu einem gegebenen Zeitpunkt zusammen mit den Bewegungsgesetzen, die die Dynamik des Systems vollständig beschreiben, den Zustand des Systems zu allen Zeiten vollständig bestimmt. Diese Bestimmung des Zustandes kann also sowohl rückwärts wie auch vorwärts in der Zeit geschehen. Der Zustand des physikalischen Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt wird in unserem Szenario durch die Anfangsbedingungen auf Σ gegeben. Diese Anfangsbedingungen müssen also zum Beispiel für alle physikalischen Körper deren Ort und Impuls festsetzen, sowie die analogen Anfangsbedingungen für alle auf Σ präsenten Felder, insbesondere des metrischen Feldes g . Ohne in mathematische Details abzugleiten, soll noch angefügt werden, dass die Bewegungsgesetze dann aus den Einsteingleichungen (1) sowie den daran gekoppelten dynamischen Gleichungen der Körper und Felder bestehen. Beispielsweise haben wir einen Körper, dessen

Position und Impuls auf Σ dergestalt ist, dass er leicht gegen rechts haltend Σ verlässt um danach durch auf ihn wirkende Kräfte zum Beispiel der Weltlinie in Abbildung 9 zu folgen. Der entscheidende Punkt ist nun, dass, obwohl

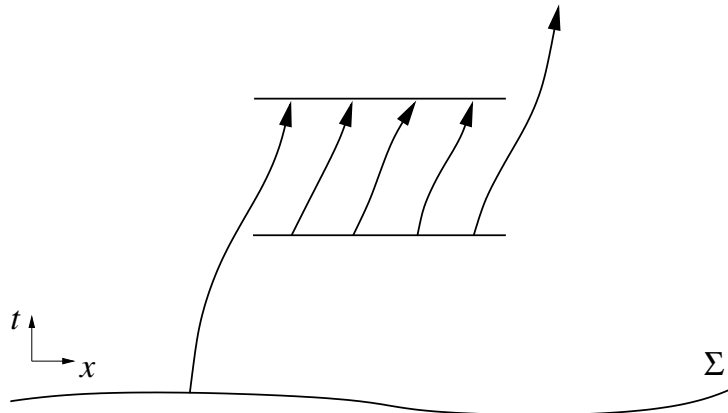


Abbildung 9: Mögliche Zukunft einer von Σ ausgehenden Weltlinie.

die hier geltenden Bewegungsgesetze als deterministisch angenommen werden, durch das Auftreten eines Deutsch-Politzer Gatters der Zustand des Systems zu späteren Zeiten nicht mehr eindeutig durch die Anfangsbedingungen auf Σ und die Bewegungsgesetze festgelegt ist. Abbildung 9 zeigt nun eine dynamisch mögliche Entwicklung der Anfangsdaten auf Σ , bei der der Körper links in das Zeitreise-Gatter eintritt, dort viermal “zurückgeworfen” wird bevor er das Gatter nach rechts verlässt. Abbildung 10 zeigt eine inäquivalente, aber dynamisch ebenso mögliche Entwicklung bei der der Körper die Zeitreiseregion ebenfalls von links betritt, wobei aber der Körper zweimal mit sich selber kollidiert bevor er, nachdem er insgesamt sechsmal zurückgeworfen wurde, das Gatter nach rechts verlässt. Die kleinen Pfeile in Abbildung 10 sollen verdeutlichen, welchen Weg der Körper im Gatter nimmt. Natürlich sind beliebig viele andere mögliche Entwicklungen möglich.

Damit wird klar, dass die Anfangsbedingungen auf Σ zusammen mit den relevanten dynamischen Gleichungen *nicht* in eindeutiger Weise die zukünftige Entwicklung des betrachteten physikalischen Systems bestimmen. Weiter kann noch angefügt werden, dass im Falle des Deutsch-Politzer-Gatters durch das Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven den Anfangsbedingungen auf Σ keinerlei durch Konsistenzbedingungen verordnete Einschränkungen auferlegt werden. Die Konsistenzbedingungen führen hier also nicht zu einer Überdeterminiertheit, also einer Reduktion der dynamisch erlaubten Lösungen, sondern vielmehr zu einer Unterdeterminiertheit des zukünftigen Zustandes des Systems, also einer Vermehrung der erlaubten Lösungen. Im Widerspruch zu den traditionellen Befürchtungen, wonach die Möglichkeit von Zeitreisen durch rigide Konsistenzbedingungen beliebig unwahrscheinlich gemacht werde, sind wir also mit der Tatsache konfrontiert, dass zumindest in einigen Situationen das Auf-

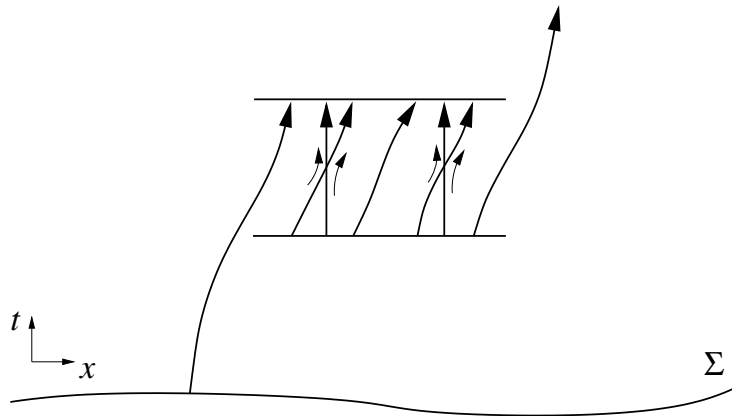


Abbildung 10: Andere mögliche Zukunft einer von Σ ausgehenden Weltlinie.

treten von geschlossenen kausalen Kurven zu einer unendlichen Vervielfachung der dynamisch möglichen Entwicklungen führt und dass also in manchen Fällen unendlich viele konsistente Lösungen existieren. Es ist leider beim gegenwärtigen Stand des Wissens nicht möglich, allgemeingültige Aussagen darüber zu machen, unter welchen Umständen die Beschränkungen stärker sind als die Undeterminiertheit und umgekehrt.

3 Zeitmaschinen und was die Physik dazu meint

Da ja geschlossene kausale Kurven nichts anderes sind als geometrisch-topologische Eigenschaften der Raumzeit, wird dem aufmerksamen Leser vielleicht an dieser Stelle die Frage aufgetaucht sein, unter welchen Bedingungen denn die Raumzeit-Geometrie auf Σ dazu führen könnte, dass in der Zukunft von Σ eine Region mit geschlossenen kausalen Kurven auftreten wird, oder wie allenfalls das metrische Feld g auf Σ so manipuliert werden könnte, dass solche Kurven hervorgebracht werden. Mit andern Worten: Lässt sich die Raumzeitgeometrie in einem vielleicht endlichen Gebiet so kontrollieren, dass man das zukünftige Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven erzwingen oder ausschliessen kann? Unter welchen Bedingungen und bis zu welchem Grad sind Raumzeiten ohne geschlossene kausale Kurven gegen die Infizierung mit solchen Kurven immun?

An dieser Stelle muss eine weitere begriffliche Fixierung stattfinden, wie sie in der Fachliteratur, aber nicht in der Popkultur, üblich ist. Wie im vorangehenden Abschnitt eingeführt, ergibt sich die Möglichkeit von Zeitreisen in Raumzeiten mit geschlossenen kausalen Kurven. Diese Raumzeiten werden deshalb auch *Zeitreise-Raumzeiten* genannt. Andererseits wird eine *Zeitmaschine* zunächst als ein Apparat verstanden, der geschlossene kausale Kurven produziert, wo sich sonst keine befinden würden. Ohne in einen problembehafteten Diskurs über allgemein relativistische Wahrheitsbedingungen von kontrafakti-

schen Konditionalen abzugleiten, bezeichnen wir als Zeitmaschine eine Region von \mathcal{M} , in der die Anfangsbedingungen aller Felder einerseits so gesetzt werden können, dass in der Zukunft dieser Region ein Gebiet mit geschlossenen kausalen Kurven entsteht, und andererseits auch so belassen werden können, dass eben kein solches Gebiet heranwächst. Mit andern Worten, eine Zeitmaschine erlaubt die Manipulation der Raumzeit-Geometrie, so dass das Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven kontrolliert werden kann. Unsere eingangs gestellte Frage lässt sich also so umformulieren, dass wir wissen möchten, unter welchen allgemeinen Bedingungen eine Raumzeit den Betrieb einer Zeitmaschine zulässt und ob es im Rahmen der ART überhaupt solche Raumzeiten gibt.

Wie könnte eine solche Zeitmaschine in der Praxis aussehen? Die Idee einer Zeitmaschine im oben definierten Sinne geht auf die Forschergruppe um Kip Thorne zurück, die Ende der 1980-er und Anfang der 1990-er Jahre die physikalische Realisierbarkeit einer solchen Zeitmaschine mit Hilfe eines Wurmlochs, das zwei entfernte schwarze Löcher verbindet, untersucht hat. Dabei hat sich herausgestellt, dass eine solche Konstruktion nicht ohne Weiteres möglich ist, da Quanteneffekte die Hoffnung auf eine solche Zeitmaschine zum Teil zunichte machen. Andererseits hat sich auch herausgestellt, dass gewisse Phänomene, die erst im Rahmen von modernen Quantentheorien auftauchen, gerade auch neue Möglichkeiten zum Bau einer Zeitmaschine eröffnen.⁷ Die aus diesen Untersuchungen hervorgegangene Literatur dreht sich um die Frage, ob solche Konstruktionen *im Allgemeinen* physikalisch realistisch, oder zumindest plausibel sind, und falls ja, unter welchen Umständen die Konstruktionen ausgeführt werden können. Zur weiteren Analyse dieser Problemstellung ist es unerlässlich, dass eine Präzisierung des Begriffs einer "Zeitmaschine" in der mathematischen Sprache der zugrunde liegenden physikalischen Theorien vorhanden ist. Leider ist in der einschlägigen Literatur in der Physik eine solche Präzisierung nicht zu finden. Daher hat ein Forschungsprojekt, an dem ich mit John Earman und Christopher Smeenk arbeite, zum Ziel, eine solche begriffliche Analyse einer Zeitmaschine im Kontext von Raumzeittheorien vorzunehmen. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es dabei, möglichst *notwendige* und *hinreichende* Bedingungen zur Charakterisierung einer Zeitmaschine zu formulieren. Die ersten Früchte dieses Vorhabens sind in Earman und Wüthrich (2005) und Earman et al. (2007) zu finden. Das Problem ist nicht trivial und soll an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden.

Die Frage, der ich mich für den Rest des Artikels widmen möchte, befasst sich damit, ob die Forschung zu Zeitreisen und Zeitmaschinen wissenschaftlich kaum ernst zu nehmende Spielerei ist, oder ob es sich dabei nicht doch um wichtige Grundlagenforschung handelt. Neben den vorangehend besprochenen philosophischen Erkenntnissen, dass geschlossene kausale Kurven nicht in sich widersprüchlich sind und dass deren Auftreten sowohl zu gewissen Überwie auch Unterdeterminiertheiten führen kann, leistet diese Forschung nicht zu unterschätzende Beiträge im Bereich der Grundlagen der Physik. Den Gravita-

⁷Cf. Earman et al. (2007) für eine detailreiche Diskussion der Quantenaspekte von Zeitmaschinen. Morris et al. (1988) und Kim und Thorne (1991) sind wichtige Artikel der Gruppe um Thorne.

tionsphysiker interessiert letztlich, ob die Modelle der Theorie gegen das Auftreten von diversen Pathologien immun sind. Genauso wie negative Energien, imaginäre Massen und Überlichtgeschwindigkeiten zwar nicht logisch unmöglich sind, aber als unphysikalisch gelten, obwohl sie im mathematischen Formalismus von physikalischen Theorien auftreten könnten, die in Modellen der ART, also in Lösungen von (1), auftretenden geschlossenen kausalen Kurven zwar als widerspruchsfrei aber unphysikalisch verworfen werden. Das kann auf der Grundlage geschehen, dass sämtliche solche Lösungen irgendwelche Bedingungen, von denen angenommen wird, dass sie notwendigerweise von physikalisch möglichen Modellen erfüllt werden müssen, verletzen. Der Grund, weshalb man das Auftreten von geschlossenen kausalen Kurven vermeiden möchte, könnte also entweder darin bestehen, dass sonst eine nicht-lokale und deshalb kontraintuitive Beschränkung in der freien Setzung der Anfangsdaten auftreten könnte oder dass die Dynamik des physikalischen Systems sich nicht mehr deterministisch entwickelt. Will man die zur Debatte stehende Frage aber nicht durch *fiat* entscheiden, darf man natürlich nicht einfach das Nichtauftreten von geschlossenen kausalen Kurven verlangen, sondern muss zeigen, dass alle Lösungen mit solchen Kurven andere, unabhängig motivierte, physikalische Bedingungen verletzen. Das gelingt nicht in allen Fällen, da erstens eben Lösungen bekannt sind, die diese Bedingungen alle erfüllen und sogar als Modelle für wichtige astrophysikalische Phänomene angesehen werden, wie beispielsweise die Kerr-Newman Raumzeit, und zweitens die kausale Unverletzlichkeit gegen Zeitmaschinen nicht allgemein bewiesen werden kann. Damit der schale Nachgeschmack einer bloss stipulierten, aber nicht mit unabhängig motivierten Prinzipien bewiesenen Abwesenheit von geschlossenen kausalen Kurven vermieden wird, soll die Analyse der Immunität der ART gegen das Auftreten verschiedener Pathologien also mit den Ressourcen der Theorie selber gemacht werden.

Betrachten wir die Grundlagen der ART etwas genauer. Die ART leidet trotz ihres Alters darunter, dass wichtige Fragen bis heute offen geblieben sind. Insbesondere wurde die Gültigkeit der zentralen, so genannten *Hypothese der kosmischen Zensur*, die Roger Penrose 1969 formuliert hat, bis heute weder bewiesen noch widerlegt. Die Hypothese der kosmischen Zensur fordert, dass unter physikalisch plausiblen Bedingungen bei (fast allen) Raumzeiten, die Lösungen der Einsteingleichungen (1) sind, aus regulären Anfangsdaten keine Pathologien, die kollektiv als “nackte Singularitäten” bezeichnet werden, entstehen. Die Pathologien werden dann vermieden, wenn die dynamische Entwicklung maximal und deterministisch ist.⁸ Eine Art, wie die Entwicklung indeterministisch sein und dadurch die kosmische Zensur verletzen könnte, ist das Auftreten von Akausalitäten wie geschlossene kausale Kurven. Wenn wir also beweisen könnten, dass in der ART unter physikalisch plausiblen Bedingungen keine solchen geschlossenen kausalen Kurven entstehen können, dann hätten wir zumindest einen für die Analyse der Hypothese der kosmischen Zensur wesentlichen Spezialfall behandelt. Die *Vermutung der geschützten Chronologie* kann also als

⁸Es handelt sich bei dieser Formulierung der Hypothese der kosmischen Zensur um deren *starke* Version (vgl. Wald (1984), p. 302ff).

Sub-Hypothese der Hypothese der kosmischen Zensur angesehen werden, die fordert, dass unter physikalisch plausiblen Bedingungen bei (fast allen) Raumzeiten, die Lösungen der Einsteingleichungen (1) sind, keine geschlossene kausale Kurven auftreten. Eine wichtige, aber bloss partielle Vermutung der geschützten Chronologie wurde von Stephen Hawking (1992) bewiesen.

Wir können nun eine Hierarchie von drohenden Pathologien und der Rezepturen dagegen formulieren (siehe Tabelle 1). In Tabelle 1 bedeutet eine

<i>Pathologie</i>	<i>Medizin</i>
“Nackte Singularitäten”	Kosmische Zensur (Penrose 1969)
↓	↓
geschlossene kausale Kurven	Chronologieschutz (z.B. Hawking 1992)
↓	↓
Produktion von geschlossenen kausalen Kurven durch Manipulation der Raumzeitstruktur	No-go Theoreme für Zeitmaschinen (z.B. Krasnikov 2002)

Tabelle 1: Hierarchie der Pathologien und ihrer Gegenmittel.

“Medizin” gegen eine Pathologie auf der gleichen Ebene, dass letztere unter physikalisch realistischen Bedingungen in den Raumzeiten, die Lösungen der Einsteingleichungen (1) sind, nicht auftritt. No-go Theoreme für Zeitmaschinen sind also Spezialfälle des Chronologieschutzes, der wiederum einen Spezialfall der kosmischen Zensur darstellt. No-go Resultate für Zeitmaschinen betreffen natürlich diejenigen Fälle, in denen die geschlossenen kausalen Kurven eben durch Zeitmaschinen produziert wurden. Im umgekehrten Fall, dass eine sehr allgemeine Hypothese der kosmischen Zensur mit den Ressourcen der ART bewiesen werden könnte, wären automatisch alle geschlossenen kausalen Kurven verboten, und damit auch die, die durch die Operation von Zeitmaschinen entstanden sind. Die Hierarchie bringt meine Botschaft klar hervor: wenn keine Resultate bezüglich kosmischer Zensur zu erhalten sind, sollte versucht werden, die speziellen Fälle von geschlossenen kausalen Kurven und insbesondere von Zeitmaschinen zu studieren. Der philosophische Beitrag, der vom oben erwähnten Forschungsprojekt geleistet wird, liefert die Klassifikation der Pathologien und deren Gegenrezepturen.⁹ Eine wichtige Frage, die grösstenteils offen bleibt, behandelt die Quantengravitation und deren kausale Stabilität.¹⁰

Vielleicht werden wir niemals Zeitmaschinen bauen können, und vielleicht werden mathematische Sätze beweisen können, weshalb uns das aus prinzipiellen Gründen verwehrt bleiben muss. Aber auch wenn das so ist, dann wird ein Verständnis der Gründe, weshalb funktionierende Zeitmaschinen nicht gebaut

⁹Earman und Wüthrich (2004).

¹⁰Earman, Smeenk und Wüthrich (2007).

werden können, zentrale Probleme in den Grundlagen der Physik beleuchten. Da die Hypothese der kosmischen Zensur die wichtigste offene Grundlagenfrage der ART bildet, könnten solche Erkenntnisse wichtige Spezialfälle abdecken. Obwohl ich das hier nicht diskutiert habe werden Resultate über Zeitmaschinen wichtige Erkenntnisse auf dem Weg zur erfolgreichen Formulierung einer Theorie der Quantengravitation liefern. Deshalb sind Zeitreisen und Zeitmaschinen trotz des unverkennbaren Stallgeruchs nach Science Fiction wissenschaftlich durchaus relevant und ernst zu nehmen. Für die Philosophie der Physik sind diese Fragestellungen auch für die Interpretation der klassischen ART und eventuell der Quantengravitation von grosser Bedeutung. Durch sie werden die Grenzen der Theorien ausgelotet und ihre begrifflichen und formalen Ressourcen ausgeschöpft. Dabei spielt das Ausarbeiten aller Implikationen einer Theorie eine grosse Rolle. Schliesslich bildet das Studium von Zeitreisen und -maschinen in der ART und anderen Theorien der modernen Physik eine Voraussetzung für ein physikalisch motiviertes und zertifiziertes Verständnis von zentralen philosophischen Begriffen wie der Zeit. Andererseits helfen die konzeptionellen Beiträge der Philosophie dabei, das physikalische Wissen zu “kartographieren” und zu strukturieren. Das Thema der Zeitreisen offeriert also die Möglichkeit einer fruchtbaren Zusammenarbeit zwischen Philosophie und Naturwissenschaft und verdient es deshalb, in beiden Lagern wahrgenommen zu werden, und das nicht nur am Wochenende beim Besuch im Kino.¹¹

Zitierte Literatur

- [1] Arntzenius, F., and Maudlin, T. (2005). Time travel and modern physics. In E. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/time-travel-phys/>.
- [2] Black, M. (1956). Why cannot an effect precede its cause? *Analysis* 16: 49-58.
- [3] Dummett, M. (1964). Bringing about the past. *Philosophical Review* 73: 338-359.
- [4] Earman, J. (1995). *Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes*. New York: Oxford University Press.
- [5] Earman, J., Smeenk, C., und Wüthrich, C. (2007). Do the laws of physics forbid the operation of time machines? Wird z.Zt. begutachtet.
- [6] Earman, J. und Wüthrich, C. (2004). Time machines. In E. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/time-machine/>.

¹¹Ich danke Barbara und Fritz Wüthrich für die sorgfältige Durchsicht des ganzen Manuskripts.

- [7] Gödel, K. (1949). An example of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations of gravitation. *Review of Modern Physics* 21: 447-450.
- [8] Hawking, S.W. (1992). Chronology protection conjecture. *Physical Review D* 46: 603-611.
- [9] Horwich, P. (1987). *Asymmetries in Time: Problems in the Philosophy of Science*. Cambridge (MA): MIT Press.
- [10] Kim, S.-W. und Thorne, K.S. (1991). Do vacuum fluctuations prevent the creation of closed timelike curves? *Physical Review D* 43: 3929-3949.
- [11] Krasnikov, S. (2002). No time machines in classical general relativity. *Classical and Quantum Gravity* 19: 4109-4129.
- [12] Lewis, D. (1976). The paradoxes of time travel. *American Philosophical Quarterly* 13: 145-152. Abgedruckt in *Philosophical Papers*, Volume II. New York: Oxford University Press, pp. 67-80.
- [13] Malament, D. (1985). Minimal acceleration requirements for "time travel" in Gödel spacetime. *The Journal of Mathematical Physics* 26: 774-777.
- [14] Mellor, D.H. (1981). *Real Time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [15] Morris, M.S., Thorne, K.S. und Yurtsever, U. (1988). Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition. *Physical Review Letters* 61: 1446-1449.
- [16] Penrose, R. (1969). Gravitational collapse: the role of general relativity. *Rivista del Nuovo Cimento* 1: 252-276 (Numero speciale).
- [17] Smith, N.J.J. (1997). Bananas enough for time travel? *British Journal for the Philosophy of Science* 48: 363-389.
- [18] Smith, N.J.J. (1998). The problems of backward time travel. *Endeavour* 22: 156-158.
- [19] Wald, R.M. (1984). *General Relativity*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- [20] Wheeler, J. und Feynman, R. (1949). Classical electrodynamics in terms of direct interparticle action. *Reviews of Modern Physics* 21: 425-434.
- [21] Wüthrich, C. (1999). On time machines in Kerr-Newman spacetimes. Lizentiatsarbeit, Universität Bern. <http://www.itp.unibe.ch/diploma.thesis/wuthrich/wuthrichLiz.pdf>

Weiterführende Literatur

Die philosophische Literatur über Zeitreisen ist in den letzten Jahren förmlich explodiert, so dass es unmöglich ist, an dieser Stelle eine umfassende Liste wiederzugeben. Neben den zitierten Veröffentlichungen sei der Leser für einen Einblick in die gegenwärtige philosophische Literatur vor allem an die thematische Ausgabe von *The Monist* 88/3 (2005) zum Thema Zeitreisen verwiesen. Die doch eher technische Literatur über Zeitmaschinen im Sinne von Abschnitt 3 ist erst im Entstehen begriffen. Die interessierte Leserin findet in Earman und Wüthrich (2004) eine viel detailreichere Einführung und eine umfassende Bibliographie.