

ZEITREISEN

Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades
der Magistra der Naturwissenschaften
(Lehramt an Höheren Schulen)

vorgelegt von

Tanja Tajmel

am Institut für Theoretische Physik
der Karl-Franzens Universität Graz

November 1999

Diese Diplomarbeit wurde unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Leopold Mathelitsch durchgeführt, dem ich an dieser Stelle für die Betreuung in Graz und während meines Erasmus-Aufenthaltes, sowie für den regen Ideenaustausch herzlich danken möchte. Seine physikalischen Erklärungen bereiteten mir wichtige Aha-Erlebnisse, und in schwierigen Phasen waren seine persönlichen Ratschläge eine wertvolle Hilfe.

Weiters gilt mein Dank Univ.-Prof. Dr. Adolf Hohenester. Die mit ihm, oftmals zu später Stunde, geführten fachlichen und persönlichen Gespräche waren für diese Arbeit sehr wichtig.

Schließlich möchte ich noch all jenen Menschen danken, die bereitwillig meine Umfrage zu Zeitreisen unterstützten bzw. mit mir über Zeitreisen diskutierten. Auf ihre Mitarbeit und ihre Ideen stützt sich ein wichtiger Teil dieser Arbeit.

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	1
I. WAS IST EINE ZEITREISE?	6
1. BEGRIFFSABGRENZUNG	7
1.1. Allgemeine Begriffsproblematik	7
1.2. Die Reise als Überbegriff.....	12
2. ANALYTISCHE BETRACHTUNG VON ZEITREISEN	17
2.1. Beispiele für Zeitreisen	17
2.2. Möglichkeiten für Zeitreisen.....	21
2.3. Charakteristische Elemente von Zeitreisen	27
3. DER EINER ZEITREISE ZUGRUNDELIEGENDE ZEITBEGRIFF.....	30
II. PSYCHISCHE ZEIT UND ZEITREISE	34
1. ZEIT UND BEWUßTSEIN	35
1.1. Zeit in der Sprache	35
1.2. Zeitwahrnehmung.....	37
1.3. Zeitgestalten und Zeitanisotropie.....	44
1.4. Äußere Taktgeber.....	49
2. PSYCHISCHE ZEITREISEN.....	51
2.1. Psychische Zeitreisen in die Vergangenheit.....	51
2.2. Psychische Zeitreisen in die Zukunft	53
III. DIE ZEIT IN DER PHYSIK	59
1. DER OBJEKTIVE ZEITBEGRIFF.....	61
1.1. Historische Entwicklung.....	61
1.2. Zeitmessung, Uhren	65
2. DAS MODERNE RELATIVITÄTSPRINZIP	70
2.1. Lichtgeschwindigkeit.....	70
2.2. Äther.....	72
3. DIE RELATIVISTISCHE RAUMZEIT (SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE)	75
3.1. Inertialsysteme, Kräfte.....	76
3.2. Gleichzeitigkeit	78
3.3. Zeitdilatation, Längenkontraktion.....	80
4. EINSTEINS GRAVITATIONSTHEORIE (ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE).....	89

4.1. Äquivalenzprinzip	89
4.2. Krümmung der Raumzeit.....	94
5. ZEIT UND QUANTENTHEORIE	98
6. ZEITASYMMETRIE.....	102
6.1. Reversibilität - Irreversibilität.....	102
6.2. Die sieben Pfeile der Zeit	106
IV. ZEITREISE MITTELS ZEITDILATATION.....	112
Physikalische Theorien zu Zeitreisen	113
Zeitdilatation allgemein.....	114
1. GLEICHFÖRMIG BEWEGTE SYSTEME	115
Myonen.....	116
2. ZEITDILATATION IN EINEM GRAVITATIONSFELD.....	121
Das Hafele - Keating - Experiment	122
3. DAS UHRENPROBLEM (ZWILLINGSPARADOXON)	126
Raumzeit-Diagramme des Zwillingsparadoxons.....	131
V. KOSMOLOGISCHE MODELLE FÜR ZEITREISEN	134
1. STERNE	135
1.1. Sternentwicklung	135
1.2. Schwarzschild-Radius	138
2. SCHWARZE LÖCHER.....	142
2.1. Einsteinsche Schwarze Löcher.....	143
2.2. Physikalische Eigenschaften Schwarzer Löcher	147
2.3. Zeitreisen mittels Schwarzer Löcher.....	156
3. RAUMZEIT-TUNNEL; "WURMLÖCHER"	159
3.1. Schwarzschild-Wurmloch	161
3.2. Kerr-Tunnel.....	164
3.3. Passierbare Wurmlöcher	164
4. GESCHLOSSENE ZEITARTIGE KURVEN.....	171
4.1. Gödels rotierendes Universum	171
4.2. Tiplers Zylinder	172
4.3. Kosmische Strings.....	173
5. PARALLELE UNIVERSEN.....	174
5.1. Viele Welten	175
5.2. Zeitreisen in parallele Welten	176
VI. ZEITREISEN MIT ÜBERLICHTGESCHWINDIGKEIT	181
1. TACHYONEN.....	182

2. DER TUNNELEFFEKT	184
3. TELEPORTATION	187
VII. ZEITREISEN IM UNTERRICHT	192
1. UMFRAGE ZUM THEMA "ZEITREISE"	194
1.1. Fragebogen	194
1.2. Folgerungen	196
2. ZEIT UND ZEITREISE IM UNTERRICHT	199
2.1. Mögliche Unterrichtsinhalte	199
2.2. Konsequenzen von Zeitreisen	206
2.3. Film- und Literaturtips	208
3. DIDAKTISCHE ÜBERLEGUNGEN ZUR RELATIVITÄTSTHEORIE	212
4. "ZEITREISE" ALS PROJEKT	217
Arbeitsgruppen und Workshops	218
ZUSAMMENFASSUNG	223
LITERATURVERZEICHNIS	226

EINLEITUNG

Ivo Panaggi, *Roboter*
Rekonstruktion von L'Angoscia della Macchina

Ziel dieser Arbeit

Mit dieser Arbeit möchte ich einen umfassenden, jedoch nicht oberflächlichen Überblick über das Thema Zeitreisen bieten. Ich werde versuchen, den eigentlich nicht genau definierten Begriff Zeitreise bestmöglich zu klären, um sodann in ausführlicher Art und Weise Möglichkeiten für Zeitreisen zu diskutieren.

Methode

Ein zentrales Element der Arbeit ist es, Fragen zu formulieren und aufgrund dieser Fragestellungen eine Struktur zu schaffen, die letztendlich in der Kapiteleinteilung zum Ausdruck kommt.

Was ist eigentlich eine Zeitreise? Sind Zeitreisen wirklich möglich?

Dies waren die ersten, und noch sehr unkonkreten Fragen, die ich mir zu dieser Arbeit stellte. Bald war mir klar, daß die Antworten auf diese Fragen weder kurz ausfallen würden, noch, daß sie aus der Physik allein beantwortbar wären. Aus diesem Grund habe ich beschlossen, in interdisziplinärer Weise an das Thema *Zeit* im Allgemeinen und an *Zeitreise* im Speziellen heranzugehen.

Die Fragen ergeben sich einerseits aus eigenem Interesse an der Thematik, andererseits sind sie Ausdruck meines persönlichen Arbeitsstils. Dahinter steht die Überlegung, daß durch die Formulierung konkreter Fragen bereits eine zielgerichtete Vorstellung davon geschaffen wird, was ich eigentlich wissen will. Fragen regen nicht nur allgemein zum Denken an, sondern geben Denklinien, "rote Fäden", vor und sind somit für eine konzentrierte und genauestmögliche Behandlung des Themas sehr hilfreich. Das entsprechende Kapitel ist sozusagen das Produkt der Antwortsuche auf die gestellte Frage. Die für die einzelnen Kapitel zentralen Fragen sind jeweils zu Beginn eines Kapitels festgehalten.

Struktur

Aus der interdisziplinären Herangehensweise ergibt sich, daß die Arbeit mit einem fächerübergreifenden Teil beginnt, in dem allgemein dem Begriff Zeitreise nachgegangen wird. In diesem Teil wird deutlich, daß aufgrund der Vielschichtigkeit des Zeitbegriffs auch eine Vielschichtigkeit des Zeitreisebegriffs existiert. Es erschien mir daher für weitere Überlegungen unumgänglich, sich in einzelne Disziplinen, konkret in die Psychologie und in die Physik, zu vertiefen. Ich möchte betonen, daß keine wissenschaftliche Disziplin die "wahreren" Antworten auf die gestellten Fragen liefert, da beispielsweise der psychische und der physikalische Zeitbegriff sehr begrenzte Gemeinsamkeiten aufweisen. Den Mittelteil bilden somit wissenschaftlich-spezifische Kapitel zum Thema Zeit und Zeitreise, wobei in den Kapiteln Vier, Fünf und Sechs

ausschließlich physikalische Zeitreisetheorien behandelt werden. Am Schluß der Arbeit stehen didaktische Überlegungen, aus welchen Gründen das Thema Zeitreise für den Unterricht interessant sein könnte und in welcher Form Zeitreisen im Unterricht thematisierbar wären. Somit bildet dieses Kapitel einen interdisziplinären Abschluß.

Inhalt

I. Im ersten Kapitel wird eine Begriffsabgrenzung von *Zeitreise* vorgenommen. Weiters wird ein Überblick über "Zeitreisemöglichkeiten" gegeben.

Es werden folgende Fragen behandelt:

Aufgrund welcher Charakteristika wird ein Ereignis als *Zeitreise* bezeichnet?

Wie sieht jener Zeitbegriff aus, der einer *Zeitreise* zugrunde liegt?

Es wird herausgearbeitet, daß es verschiedene Arten von *Zeitreisen* gibt, denen jeweils ein anderer Zeitbegriff zugrunde liegt. Da *Zeitreisen* vor allem auf Basis des psychischen oder des physikalischen Zeitbegriffs als solche interpretiert werden, wird diesen beiden Disziplinen in den folgenden Kapiteln verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt.

II. Da bestimmte psychische Phänomene als *Zeitreisen* auffassbar sind, wird im zweiten Kapitel die psychische Zeitwahrnehmung und ihre Entwicklung dargestellt und die Wahrnehmung einer Zeitrichtung thematisiert. Weiters werden jene Phänomene besprochen, die als psychische *Zeitreisen* aufzufassen sind.

III. Im dritten Kapitel widme ich mich sehr ausführlich der Entwicklung des physikalischen Zeitbegriffs, um einen verständlichen Übergang vom Newtonschen Zeitbegriff zum Zeitbegriff der Relativitätstheorie zu bieten. Der relativistische Zeitbegriff nimmt insofern eine zentrale Rolle ein, weil mit der Relativitätstheorie die ersten physikalischen Überlegungen zu *Zeitreisen* entstanden sind. Auch neuere physikalische *Zeitreisetheorien* beruhen größtenteils auf der Allgemeinen Relativitätstheorie. Diese werden auch in der Science Fiction verwendet, und somit kann davon ausgegangen werden, daß vor allem Jugendliche bereits eine Vorstellung von physikalischen *Zeitreisen* haben. Da in der Science Fiction jedoch zumeist keine oder eine in physikalischer Hinsicht unzureichende begriffliche Klärung den *Zeitreise*phänomenen vorausgeht, erscheint es mir wichtig, den diesen *Zeitreisen* zugrundeliegenden Zeit- und Raumbegriff zu erklären.

Der Zeitbegriff der Quantentheorie wird vergleichsweise kurz behandelt, da dieser aus verschiedenen Gesichtspunkten für jenes Phänomen, das allgemein als *Zeitreise* bezeichnet wird, nur begrenzt in Frage kommt.

Schließlich werden die verschiedenen physikalischen "Zeitpfeile" und die entsprechenden Theorien dargestellt.

IV. Im vierte Kapitel behandle ich jene Zeitreisen, die aufgrund der von einem Bezugssystem aus beobachteten relativen Verlangsamung des Zeitflusses in einem anderen System möglich sind. Diese Verlangsamung wird als *Zeitdilatation* bezeichnet und wird hervorgerufen durch hohe Relativgeschwindigkeiten oder Gravitationspotentiale. In diesen Zusammenhang fällt das Zwillingsparadoxon, das auf nachvollziehbare Art und Weise aufgelöst wird.

V. Das fünfte Kapitel steht ganz im Zeichen der Kosmologie. Da sogenannte "Löcher in der Raumzeit" als Möglichkeiten für Zeitreisen gelten, wird zu Beginn die Sternentwicklung bis hin zu einem Schwarzen Loch dargestellt. In weiterer Folge wird erklärt, was unter einem Wurmloch zu verstehen ist und inwiefern mittels eines Wurmlochs eine Reise in die Vergangenheit möglich wäre. Es werden verschiedene paradoxe Situationen besprochen, die sich aus Reisen in die Vergangenheit ergeben könnten und Theorien dargestellt, in denen jene Paradoxa vermeidbar wären.

VI. Den Abschluß der rein physikalischen Behandlung von Zeitreisen bildet das Kapitel Sechs über Überlichtgeschwindigkeit und Teleportation. Dies ist in Hinblick auf Zeitreisen aus dem Grund interessant, weil mittels Überlichtgeschwindigkeit in denkbarer Weise Informationen in die Vergangenheit gesendet werden könnten. Teleportation ist eigentlich ein quantenmechanisches Phänomen, das als "Beamen" durch die Serie "Raumschiff Enterprise" zu allgemeiner Bekanntheit gelangte. Teleportation ist nicht unbedingt als Zeitreise auffassbar, bietet jedoch eine zumindest lichtschnelle Reisemethode und wird daher auch in dieser Arbeit besprochen.

VII. Im Kapitel Sieben stelle ich verschiedene Möglichkeiten vor, Zeitreisen im Unterricht zu thematisieren. Es werden Darstellungen von Zeitreisen in Literatur, Film und anderen Medien besprochen. Außerdem stelle ich das Ergebnis einer informativen Umfrage zum Thema Zeitreisen vor, die ich vor allem in Schulklassen, aber auch unter Personen anderer Altersstufen durchführte.

Den Abschluß der Arbeit bildet ein Bericht über die im Sommer 1999 vom Internationalen Alpen-Adria-College veranstaltete Projektwoche zum Thema "Zeitreisen", an der ich mitarbeiten durfte. Die praktischen Erfahrungen, die ich aus der Zusammenarbeit mit den Schüler/inne/n zum Thema Zeitreisen sammeln konnte, schließen die Arbeit ab.

Worüber ich explizit nicht schreibe

Ich habe mir vorgenommen, daß Zeitreise der zentrale Begriff, sozusagen der "rote Faden" dieser Arbeit, sein soll, um Übersichtlichkeit und Klarheit der Arbeit zu gewährleisten. Das heißt, daß ich verschiedene interessante physikalische, psychologische und auch philosophische Aspekte nicht bzw. nur kurz behandelt habe, wenn sie nicht direkt für Zeitreisen relevant waren. Diese Einschränkung war vor allem notwendig in der Bearbeitung des Zeitbegriffs, da das Thema Zeit nahezu unerschöpflich ist. Ich sah mich daher gezwungen, gewisse Aspekte nicht bzw. nur ansatzweise zu behandeln.

Zu diesen Bereichen zählen z.B.: Zeitmessung, Uhren; Zeitmanagement, Zeitreduzierung in der Ökonomie; Soziologischer Zeitbegriff; Allgemeine Verwendung des Zeitbegriffs in der Sprache; Philosophische Betrachtungen über Zeit; Allgemeine Analyse von Science Fiction; Traumdeutung.

In dieser Arbeit wird weder eine neue physikalische Theorie zu Zeitreisen entwickelt, noch werden all jene kosmischen Gebilde und quantenmechanischen Effekte, die für Zeitreisen relevant sind, rein mathematisch hergeleitet und formal behandelt. Diese Art Vertiefung in die verschiedenen Theorien wäre auf Kosten des umfassenden Überblicks über Zeitreisen, der Ziel dieser Arbeit ist, gegangen.

Form

Aus verschiedenen schreibtechnischen Gründen und aus Gründen der Übersichtlichkeit sind Abbildungen nicht in den Text eingegliedert, sondern jeweils auf der linken Seite angeführt, der entsprechende Text ist gleichzeitig ohne umzublättern auf der rechten Seite mitverfolgbar. Tabelle und Formeln sind hingegen in den Textfluß integriert.

Es lag mir sehr viel daran, eine nicht nur für Physikstudierende, sondern allgemein verständliche Arbeit zu verfassen. Aus dem Bestreben, physikalische Inhalte möglichst von Grund auf zu erklären und trotzdem einen umfassenden Überblick zu bieten, ergab sich, daß die Arbeit sehr umfangreich wurde.

Bevor ich die Einleitung schließe, möchte erwähnen, daß ich durch die Beschäftigung mit dem Thema Zeitreisen nicht nur sehr viel über den Zeitbegriff und Zeitreisetheorien gelernt habe. Durch die Vertiefung in verschiedene physikalische Zeittheorien, die sich historisch ablösten, erkannte ich, daß die physikalischen Vorstellungen von Raum und Zeit aus der Kultur und dem Weltbild ihrer Zeit erwachsen und das prägen, was in Folge allgemein unter *Wirklichkeit* verstanden wird.

KAPITEL EINS

WAS IST EINE ZEITREISE?

"Was zermartete er sich das Hirn? Natürlich, Pater Caspar hatte es ihm doch gesagt, die Insel, die er da vor sich liegen sah, war nicht die Insel von heute, sondern die von gestern. Jenseits des Meridians war noch der vorige Tag! Konnte man erwarten, auf jenem Strand dort, der ja noch gestern war, jemanden auftauchen zu sehen, der heute ins Wasser gestiegen war?"

Roberto de La Grive in *Die Insel des vorigen Tages*,
Umberto Eco

1. BEGRIFFSABGRENZUNG

1.1. Allgemeine Begriffsproblematik

Dieses Kapitel dient der Begriffsabgrenzung von *Zeitreisen*. Der Titel dieses Kapitels ist als Frage formuliert, um damit der Problematik des Begriffs *Zeitreise* Ausdruck zu verleihen. *Zeitreise* ist ein Wort, das in der wissenschaftlichen Fachliteratur mit größter Vorsicht verwendet wird, weil die Wissenschaftler/innen sonst Gefahr laufen, als Science Fiction - Autor/inn/en kategorisiert zu werden und infolgedessen ihre wissenschaftlichen Arbeiten nicht mehr ernst genommen werden.

Ebenso bzw. noch problematischer verhält es sich mit dem Wort *Zeitmaschine*. (Ein Beispiel: Nach Erscheinen des wissenschaftlichen Artikels "Wormholes, Time Machines and the Weak Energy Condition" ("Wurmlöcher, Zeitmaschinen und die schwache Energiebedingung") von Thorne, Morris und Yurtsever¹ schrieb die Presse:

*Physiker erfinden Zeitmaschinen.*²)

Andererseits kann ein phantasieanregender Name die wissenschaftliche Forschung sehr wohl beflügeln. So wurden beispielsweise jene kosmischen Gebilde, die heute als *Schwarze Löcher* bekannt sind, anfangs *Schwarzschild-Singularitäten* genannt.³

Aufgrund weiterer Erkenntnisse wurden sie Ende der Fünfzigerjahre umbenannt: Die russische Version war *gefrorener Stern*, die amerikanischen Forscher/innen wählten den Namen *kollabierter Stern*. Schließlich benannte John Archibald Wheeler 1967 in einem Vortrag das Gebilde als *Schwarzes Loch*. Der Begriff wurde weltweit begeistert aufgenommen. Möglicherweise ist es nur Zufall, daß die nächsten Jahre der Erforschung Schwarzer Löcher außerordentlich viele neue Forschungsergebnisse brachten. Kip S. Thorne, ein Schüler Wheelers und Forscher über *Wurmlöcher*, meint dazu: "In der Physik beeinflußt ein Name die Erwartungshaltung, die wir mit einem physikalischen Begriff verbinden. Ein guter Name beschwört ein geistiges Bild herauf, das die wichtigsten Eigenschaften des Begriffes hervorhebt. Er trägt somit unterschwellig zu

¹Morris, M., Thorne, K., Yurtsever, U., *Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition*, Physical Review Letters 61, 1446 (1988)

²Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S. 587

³Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.289f

einer erfolgreichen Forschung bei. Ein schlecht gewählter Name kann dagegen eine geistige Sperre zur Folge haben, die die Forschungsarbeit behindert."⁴

Die Nichtwissenschaftlichkeit bzw. die Schwierigkeit einer allgemeingültigen Definition der Begriffe *Zeitreise* und *Zeitmaschine* rührt meiner Ansicht nach vor allem auch daher, daß schon allein der Begriff *Zeit* sehr vielschichtig ist und nicht nur einer wissenschaftlichen Disziplin zugeordnet werden kann⁵. Daher stellt sich die Frage, ob es überhaupt eine allgemeingültige Definition von *Zeitreise* geben kann, oder ob es nicht vielmehr, entsprechend den verschiedenen Konzepten von *Zeit*, auch verschiedene Auffassungen von *Zeitreise* gibt, die alle gleichermaßen gültig sind. Prof. H. B. Franklin meint zu *Zeitreise*: "When one says time travel what one really means is an extraordinary dislocation of someones consciousness in time."⁶ Hier wird auf das psychische Zeitbewußtsein einer Person bezuggenommen.

In physikalischen *Zeitreisetheorien* spielt das menschliche Zeitbewußtsein hingegen nur insofern eine Rolle, als der Mensch der/die Beobachter/in ist. Er/Sie interpretiert eine mathematische Lösung oder ein Verhalten von Teilchen als *Zeitreise*, und zwar aufgrund eines bestimmten Zeitbegriffs. So ist der Zeitbegriff in der Psychologie ein anderer als in der Physik, in der Soziologie oder in den Kulturwissenschaften. Näher werde ich darauf im Folgenden eingehen.

Das zusammengesetzte Wort *Zeitreise* birgt durch den Begriff *Reise* zusätzliche Schwierigkeiten in sich. *Reise* ist ein Begriff aus dem allgemeinen Sprachgebrauch und kann ebenfalls keiner Disziplin eindeutig zugeordnet werden. Es gibt für den Begriff *Zeitreise* keine Definition wie z.B. für die Begriffe *Weltlinie*, *Wurmloch*, *Schwarzes Loch*. Diese sind ebenfalls konstruierte Begriffe, die aber, meist durch ihren "Erfinder", eindeutig definiert sind. Dadurch ist sofort eine wissenschaftliche Diskussion möglich. Hingegen hat man im interdisziplinären Diskurs über *Zeitreisen* das Problem, daß jede/r Diskussionsteilnehmer/in möglicherweise etwas anderes darunter versteht.

⁴Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S. 289

⁵Vgl. Pöppel, Ernst, *Erlebte Zeit und die Zeit überhaupt: Ein Versuch der Integration*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290

⁶Franklin, H. B., zitiert in Nahin, Paul J., *Time Machines. Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, New York: AIP 1993, S. 7

Relativität

Eine weitere Schwierigkeit stellt der Relativitätsbegriff dar, der für das Verständnis physikalischer Zeitreisen grundlegend ist. So wird beispielsweise auf die Frage nach der Möglichkeit von physikalischen Zeitreisen schnell geantwortet: In die Zukunft schon, in die Vergangenheit nicht. Diese Antwort kann beinahe schon zum Allgemeinwissen gezählt werden, und sie ist auch nicht falsch, aber meiner Meinung nach unzureichend. Es müßte die Frage erweitert werden: *In wessen Vergangenheit oder Zukunft wird gereist?* Das Zwillingparadoxon, ein Beispiel aus der Speziellen Relativitätstheorie, wird als Reise in die Zukunft verstanden. Paul Davis schreibt: "It is fascinating, that the special theory of relativity opens up the possibility of time travel. Indeed, ... anyone may travel indefinitely far into the future in this way."⁷ Demnach reist ein Zwilling mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in den Weltraum, kehrt wieder um und trifft seinen Bruder, um Jahre mehr gealtert als er selbst, auf der Erde wieder. Erklärt werden kann dieses Phänomen durch die sogenannte Zeitdilatation, ein Effekt, der bei Geschwindigkeiten nahe der Vakuumlichtgeschwindigkeit auftritt, wonach die Zeitmaßstäbe vergrößert werden. (Genauer dazu in Kapitel Drei und Vier). Daß der junggebliebene Zwilling seinen Bruder um Jahre älter als er selbst vorfindet, wird aus der Sicht des jungen Bruders als Reise in die Zukunft seines Bruders interpretiert. Für jeden Bruder ist jedoch die eigene Zeit, das ist jene seines Bezugssystems, ganz normal vergangen - im Nachhinein betrachtet bei dem einen schneller, bei dem anderen langsamer. In die Zukunft, entweder die eigene oder die des anderen, ist genaunommen keiner von beiden gereist, beide befinden sich in ihrer Gegenwart. Noch deutlicher wird dies, wenn das Treffen des Erdenzwillings mit seinem jüngeren Bruder als "Reise in die Vergangenheit" interpretiert würde. Diese Interpretation ist gleichwertig jener Interpretation als "Reise in die Zukunft", wird aber nicht gewählt, weil die Zeit des Erdensystems aus subjektiv-menschlicher Sicht als "normale Zeit" gesehen wird. Also bricht der reisende Zwilling aus dem "normalen Zeitfluß" aus und nicht der Erdenzwilling. Physikalisch sind sowohl die Erdenzeit als auch die Raumschiffzeit vollkommen äquivalent bezüglich ihrer "Normalität" (Relativistisch äquivalent sind die beiden Bezugssysteme aufgrund der Beschleunigungsphasen der Rakete nicht. Darauf wird in Kapitel Vier eingegangen.). Es werden lediglich die Zeitmaßstäbe der biologischen, und somit physikalischen Uhren der beiden Bezugssysteme verglichen. Weder dem einen noch dem anderen Zwilling würde ohne Vergleich auffallen, daß er ungewöhnlich gealtert wäre. Erst in Relation zueinander kommt diese Ungleichheit zum Tragen.

⁷Davis, P. C. W., *Space and time in the modern universe*, Cambridge University Press 1977, S. 39

Zukunft

Zukunft, ist etwas, was noch nicht ist. Wie kann man daher selbst theoretisch sich eine Reise in die Zukunft vorstellen? Würde ich in der Zukunft ankommen, gäbe es die Zukunft in diesem Augenblick, und damit ist sie Gegenwart und nicht mehr Zukunft. Daher stellt sich die Frage: Gibt es die Zukunft in irgendeiner Form bereits? Es gibt Ereignisse, die für einen Beobachter bereits Gegenwart sind, für einen andere, weiter entfernten Beobachter, aber Zukunft. Ein Beispiel dazu ist die Beobachtung einer Supernova. Zum Zeitpunkt ihrer Beobachtung auf der Erde sind bereits Millionen von Lichtjahre in jenem Raumgebiet, in welchem sich die Supernova ereignete, vergangen. Vor der Beobachtung auf der Erde ist die Supernova Zukunft für die Erde. Aber nur insofern zukünftig, als ein Signal, daß bereits abgesandt wurde, die Erde noch nicht erreicht hat⁸. Vergleichbar ist dies mit einem Brief, der schon abgeschickt worden, aber noch nicht angekommen ist. (Dieser Vergleich ist insofern problematisch und physikalisch nicht zulässig, da nach der Relativitätstheorie die Gleichzeitigkeit von Ereignissen nicht rekonstruierbar ist⁹. Es wäre demnach falsch, zu behaupten, man müßte nur Lichtgeschwindigkeit und Entfernung berücksichtigen, um das Alter des Ereignisses zu rekonstruieren. Das Beispiel soll lediglich die Begriffsproblematik von Zukunft verdeutlichen.) Für den Adressaten liegt der Erhalt des Briefes in der Zukunft, jedoch befindet sich der Brief, von Geschrieben-werden bis Ankommen, immer irgendwo, es gibt ihn irgendwo. Dies stimmt nicht mit der Vorstellung von Zukunft überein, nämlich daß es etwas noch nicht gibt, nirgendwo.

Hier wird deutlich, daß man eine Unterscheidung des Begriffs Zukunft vornehmen muß. Der physikalische Zukunftsbegriff ist eng an die Absolutgeschwindigkeit des Lichts geknüpft, und somit letztendlich eine Frage der Signalübertragung. Vereinfacht könnte dies heißen: Jene Signale, die ich in meinem Bezugssystem nicht wahrnehme, gehören nicht zur Gegenwart meines Bezugssystems. Der philosophische Zukunftsbegriff bzw. die umgangssprachliche Verwendung von Zukunft steht hingegen für etwas noch nicht Existierendes, weder im einen noch im anderen Bezugssystem.

Vergangenheit

Im Vergleich dazu, wie im Zusammenhang mit dem Zwillingsparadoxon von einer Reise in die Zukunft gesprochen wird, wird eine mögliche Reise in die Vergangenheit physikalisch abgelehnt (es sei denn, mit Hilfe eines Wurmlochs). Hier möchte ich jedoch anmerken, daß die Beobachtung z.B. einer Supernova durchaus als Blick in die

⁸Vgl. hierzu die geometrische Darstellung der Raumzeit von Minkowski in Kapitel 3

⁹Aichelburg, Peter C., *Zeit als dynamische Größe in der Relativitätstheorie*, in: Aichelburg, Peter C. (Hrsg.), *Zeit im Wandel der Zeit*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1988, S. 231

Vergangenheit¹⁰ bezeichnet werden kann. Ich habe zwar den Eindruck einer Gegenwärtigkeit des Ereignisses, weiß aber über Entfernung und Lichtgeschwindigkeit bescheid und kann somit das Ereignis der Vergangenheit zurechnen. Ebenso weiß ich daß der erhaltene Brief vor einigen Tagen, und somit in der Vergangenheit geschrieben wurde.

Wie man sieht, sind auch weitere Begriffe, die mit Zeitreise in Zusammenhang stehen, erklärungsbedürftig. Das hat mich dazu bewogen, von verschiedenen Seiten an den Begriff Zeitreise heranzugehen.

1) Zuerst werde ich versuchen, den Begriff *Zeitreise* einzugrenzen, indem ich hinterfrage, inwiefern *Zeitreise* eine Kategorie von *Reisen* ist. Inwieweit ist Zeitreise als Reise interpretierbar?

2) Im nächsten Schritt werden Beispiele für Zeitreisen dargestellt, die zum Teil aus einer von mir durchgeführten Umfrage zum Thema Zeitreisen stammen. (Die Ergebnisse dieser Umfrage werden im Didaktikteil (Kapitel Sieben) genauer behandelt.) Die in diesem Kapitel angeführten Beispiele werden daraufhin analysiert, aufgrund welcher situativer Merkmale ein Ereignis als Zeitreise bezeichnet wird.

Weiters werden verschiedenste "Möglichkeiten" für Zeitreisen betrachtet, aufgrund derer die für Zeitreisen charakteristischen Merkmale auftreten.

Aufgrund gemeinsamer Merkmale der unterschiedlichen Beispiele von Zeitreisen wird versucht, gewisse *Charakterelemente von Zeitreisen* herauszufinden. Diese Charakteristika werden auch zur Darstellung von Zeitreisen im Film, in Literatur, in Medien allgemein, verwendet, um die Zuseher/innen davon zu überzeugen, daß das Dargestellte eine Zeitreise ist.

3) Im letzten Teil des Kapitels wird der Frage nachgegangen, welche Eigenschaften ein Zeitbegriff haben muß, um von Reisen in der Zeit sprechen zu können? Nachdem Zeitreisen nach wissenschaftlichen Disziplinen eingeordnet werden können sind, entsprechen offensichtlich die Zeitbegriffe dieser Disziplinen jenen Anforderungen, die an einen Zeitbegriff gestellt werden, der einer Zeitreise zugrunde liegen kann.

Da eine parallel geführte interdisziplinäre Diskussion der Zeitreise aus obigen Gründen sehr schwierig ist, werden in den folgenden Kapiteln jene Konzepte von Zeit und Zeitreise, die in Psychologie und in Physik gelten, getrennt behandelt.

¹⁰Hawking, Steven W., *Eine kurze Geschichte der Zeit. Die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg: Rowohlt 1988, S. 44

1.2. Die Reise als Überbegriff

In der deutschen Sprache gibt bei zusammengesetzten Substantiva das zweite immer den Überbegriff an. Für den Überbegriff Reise können beispielsweise folgende zusammengesetzte Substantiva gefunden werden:

Urlaubsreise, Dienstreise, Fernreise, Schiffsreise, Flugreise, Asienreise, Weltreise, Abenteuerreise, Kulturreise etc.

Die Spezifikation der Reise erfolgt verschiedentlich:

Wohin? Hier wird nach dem Reiseziel spezifiziert. Bsp. Asienreise

Wozu? Der Grund der Reise gibt die Spezifikation an. Bsp. Dienstreise

Womit? Das Reisemittel spezifiziert die Reise. Bsp. Flugreise

Reisen sind zwar eng verknüpft mit Bewegung, aber der Reisebegriff ist nicht durch den Bewegungsbegriff substituierbar. Reise hat zu tun mit Veränderung der gewohnten Umgebung. Von semantischen Unterschieden zwischen den Begriffen *Reise*, *Fahrt*, *Bewegung* (z.B. ist *Reise* positiv behaftet im Vergleich zum relativ neutralen Begriff *Bewegung*) sei hier abgesehen, weil sich diese Überlegungen zu weit vom Thema entfernen würden.

Welche der drei obigen Spezifikationsmöglichkeiten trifft aber auf den Begriff *Zeitreise* zu? Meiner Ansicht nach ist das *Wohin?* die entsprechendste Spezifizierung. Die Antwort könnte lauten: *In eine andere Zeit*. Daß diese Antwort den Begriff *Zeitreise* aber auch nicht eindeutig festlegt, liegt an der Vielschichtigkeit des Zeitbegriffs (physikalisch, kulturell, psychisch, soziologisch). Weiter könnte die Frage: *In wessen oder in welche andere Zeit?* gestellt werden. Es ist ein Unterschied, ob ein zeitreisendes Objekt in seine eigene Vergangenheit und Zukunft oder in jene eines anderen Bezugssystems reist. Der Begriff *Zeitreise* erweckt den Eindruck, daß *Zeit* etwas Bereisbares ist. Als ob sie vor uns wie eine aufgebretete Landkarte liegen würde und es möglich wäre, von einem Zeitpunkt zum anderen zu reisen wie von einem Ort zum anderen. Reise hängt unmittelbar mit dem Begriff *Bewegung* zusammen. Hier möchte ich betonen, daß in der Sprache und im Allgemeinverständnis die Begriffe *Ort* und *Zeit* nicht miteinander eine Einheit bilden, wie in der Relativitätstheorie, sondern als zwei getrennte Begriffe aufgefaßt werden, und daher eher jener Definition von *Raum* und *Zeit* entsprechen, die von Isaac Newton formuliert wurde:

*"Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig, und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird auch mit dem Namen Dauer belegt."*¹¹

Die Zeit fließt also gleichförmig, die Zeitpunkte liegen in regelmäßigen Abständen voneinander entfernt. Dies entspricht durchaus dem allgemeinen Verständnis von einer objektiv-gültigen Uhrzeit, wie sie charakteristisch für den objektiv-kulturellen Zeitbegriff ist. Allen Ereignissen ist eine bestimmte Uhrzeit oder ein bestimmtes Datum zuzuordnen. Die Daten der Ereignisse liegen in zeitlich Abständen zueinander, die jeweils als ganzzahliges Vielfaches von Sekunden, Minuten, Stunden, Tagen oder Jahren darstellbar sind. Gleichermaßen sind Orte durch räumliche Koordinaten darstellbar, deren Abstände als ganzzahlige Vielfache von Millimeter, Meter, Kilometer angebar sind. Bei herkömmlichen Reisen werden zeitliche und örtliche Koordinaten insofern verknüpft, als man mit einer bestimmten Geschwindigkeit vom Ort A zum Ort B gelangt.

Beispiel: Eine Zugreise von Graz nach Wien: Ich reise um 8.22 Uhr von Graz ab und komme um 11.00 Uhr in Wien an. Bei dieser Reise wird eine räumliche Distanz von 200 km zurückgelegt. Die Reise dauert 2 Stunden 38 Minuten, was als zeitliche Distanz bezeichnet werden kann. Die zeitliche Distanz ist hierbei abhängig von der Geschwindigkeit (zu Fuß beträgt die zeitliche Distanz Graz-Wien mehrere Tage). Die Fahrt Graz-Wien würde allgemein durchaus als räumliche Reise, keinesfalls jedoch als Zeitreise verstanden werden. Im Gegensatz zur räumlichen Bewegung, bei der wir auch an einem Platz verharren können, "fließt" die Zeit dahin, und man kann gar nicht an einem Zeitpunkt stehenbleiben, selbst wenn man wollte. Trotzdem würden wir dieses Faktum nicht als eine "permanente Zeitreise in die Zukunft" bezeichnen.

Zuhause im "normalen Zeitfluß"

Es stellt sich die Frage, worin sich die zeitlichen Distanzen, die sich aus dem "normalen" Verstreichen von Zeit ergeben, und jene zeitlichen Distanzen, die bei einer Zeitreise auftreten, unterscheiden? Was unterscheidet eine Zeitreise von der allen Menschen bekannten Wahrnehmung, daß Zeit vergeht oder verfließt (siehe Newton)? Die Antwort könnte lauten: Das Ausbrechen aus dem "normalen Zeitfluß". Ich bin mir darüber im Klaren, daß "normaler Zeitfluß" ein problematischer Begriff ist, da es keinen allgemeingültigen "normalen Zeitfluß" gibt. Dies ist wieder ein Hinweis darauf, wie unerlässlich es ist, bei Aussagen über Zeit klarzustellen, von welchem

¹¹Newton, Isaac, *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*, zitiert in: Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik*, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wiss.-Verl. 1989, S. 15

Zeitbegriff ausgegangen wird. Dabei kann grob zwischen subjektiver Zeit (z.B. psychische Zeit) und objektiver Zeit (z.B. kulturelle Zeit, Newtonsche Zeit) unterschieden werden.

Das Empfinden eines "normalen psychischen Zeitflusses" ist eng verknüpft einerseits mit dem Zeitgefühl des Wachzustandes, andererseits mit einer bestimmten Erwartungshaltung über das, "was sein wird". So z.B. reißt uns aus diesem Grund der Schlaf nicht vollkommen aus unserem "normalen Zeitfluß", weil wir daran gewöhnt sind und schon vor dem Einschlafen eine gewisse Erwartungshaltung und Akzeptanz darüber besteht, daß wir nun soundsoviele Stunden kein Wachbewußtsein über die Welt um uns herum haben werden. Diese Stunden werden aufgrund ihrer objektiven Meßbarkeit in unser Zeitempfinden integriert, und das Gefühl, eine Zeitreise gemacht zu haben, bleibt aus. Ein Mensch, der nur einmal in seinem Leben schlafen würde, würde sehr wohl aus seinem "normalen Zeitfluß" herausgerissen, da ihm aufgrund mangelnder Erfahrung die aus Erfahrung gelernte Erwartungshaltung, wieder aufzuwachen, fehlen würde. Dieser Mensch könnte die Zeit des Schlafes nicht antizipativ in seinen subjektiven Zeitfluß einordnen. An dieser Stelle sei auf Kapitel Zwei verwiesen, in dem Zeitreisen bezüglich psychischer Zeit behandelt werden.

Der "normale Zeitfluß" der objektiven Zeit, wie etwa jener Zeit, die meine Armbanduhr anzeigt, kann dann als unterbrochen bezeichnet werden, wenn der Zustand der Außenwelt nicht mehr mit meiner Armbanduhr korreliert. Würde ich z.B. mit dem Flugzeug nach New York fliegen und meine Uhr auf "meine normale Zeit", die zu Hause gilt, eingestellt lassen, so würde ich feststellen, daß nach meiner Uhr bereits die Sonne untergehen müßte (18.00 Uhr), während in Wirklichkeit die Sonne gerade am höchsten steht (12.00 Uhr mittags, Ortszeit New York). Diese Beobachtung korreliert nicht mit der Zeit, die meine Uhr anzeigt. (Letztendlich werden zwar alle kulturellen Uhren nach dem Sonnenstand gestellt und sind somit in ihrer geographischen Umgebung durchaus absolut gültig, haben jedoch keine absolute Gültigkeit rund um die Erde.) Dies ist sehrwohl ein Ausbrechen aus dem normalen kulturellen Zeitfluß und wird auch psychisch und körperlich als Abnormalität empfunden. Diese körperliche Anpassungsschwierigkeit ist bekannt unter dem Namen "Jetlag".

In der Newtonschen Physik gibt es kein Ausbrechen aus dem "normalen Zeitfluß". Newtons Definition von Zeit ist absolut, ihr regelmäßiges Dahinfließen kann durch nichts beeinflußt werden. Was hätte Newton möglicherweise als Ausbrechen aus dem normalen Zeitfluß bezeichnet? Vielleicht einen Vorgang, der länger oder kürzer dauert, als die Berechnungen Newtons vorhersagen. Beispiel: Ein Apfel mit bekannter Masse und bekannter Schwerebeschleunigung fällt von einem Baum, und zwar in

halber Zeit als nach den Berechnungen vorausgesagt wurde. Newton würde vermutlich alle möglichen Einflußfaktoren prüfen, bevor er an einer absoluten Zeit zweifeln würde. Dies tat erst Einstein mit seiner Relativitätstheorie. Mit der Relativitätstheorie und der Verbindung von Raum und Zeit zur vereinheitlichten Raumzeit verliert der Zeitbegriff seine absolute Gültigkeit. Hermann Minkowski, Einsteins Lehrer und mathematischer Berater, beschreibt dies folgendermaßen:

*"Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren."*¹²

Mit "Raum für sich" und "Zeit für sich" spricht Hermann Minkowski die Absolutheit von Raum und Zeit in der Newtonschen Physik an. Die räumlichen und zeitlichen Maßstäbe der Newtonschen Physik sind durch nichts zu beeinflussen oder zu verändern. In der modernen Physik sind die räumlichen und zeitlichen Maßstäbe von der Relativgeschwindigkeit abhängig und je nach Standpunkt des/der Beobachter/s/in veränderlich.

(Anm.: Auch in der Newtonschen Physik waren Ereignisse durch räumliche und zeitliche Koordinaten bestimmt, was durchaus als Verbindung von Raum und Zeit bezeichnet werden kann. Die Newtonschen raumzeitlichen Koordinaten sind jedoch im Gegensatz zu relativistischen Koordinaten absolut gültig.)

Alles Bereisbare hängt "zeitartig" miteinander zusammen. Im Gegensatz dazu sind "raumartige" Abstände durch herkömmliche Fortbewegung mit maximal Lichtgeschwindigkeit nicht zu überwinden (siehe Kapitel Drei). Aber auch in diesem Fall spricht man nur dann von Zeitreise, wenn aus dem gewohnten Bezugssystem ausgebrochen wird. Darunter ist zu verstehen, daß man sich z.B. an Orte begibt, an denen die Raumzeit stärker gekrümmt ist als an jenem Ort, von dem aus man aufgebrochen ist. Man nimmt sozusagen das Bezugssystem, das "zu Hause gilt" als Referenzsystem und stellt im Vergleich Unterschiede im Zeitverlauf fest. Oder aber man "tunnelt" durch ein Wurmloch an einen anderen Ort der Raumzeit, den man mit herkömmlichen Reismethoden, selbst bei einer Reisegeschwindigkeit, die gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit ist, nicht erreichen kann.

¹²Minkowski, Hermann, *Raum und Zeit* (Vortrag, gehalten am 21.9.1908 in Cöln), in: Aichelburg 1988, S. 123

Hier möchte ich anmerken, daß, obwohl die Relativitätstheorie mittlerweile vollständig akzeptiert wird, der Newtonsche Zeitbegriff sehr verbreitet ist, und daß unser Allgemeinverständnis auf einer newtonähnlichen Zeitvorstellung beruht. In der täglich beobachtbaren Physik kommen wir mit diesem Zeitverständnis auch nicht in Konflikt und sind daher nicht gezwungen, es zu ändern. Das "innere" absolute Zeitkonzept kommt vor allem dann zum Ausdruck, wenn es darum geht, Ergebnisse aus der Speziellen Relativitätstheorie zu interpretieren. Wie schon oben erwähnt, wird im Fall des Zwillingsparadoxons von einer Reise in die Zukunft gesprochen, obwohl beide Zwillinge sich immer in der Gegenwart ihres Bezugssystems befinden. Trotzdem wird als "normale Zeit" nur jene Zeit des nicht-fliegenden Zwillings interpretiert. Äquivalent dazu wäre, daß ich in New York als "normale Zeit" jene Zeit bezeichnen würde, die meine Armbanduhr anzeigt. Es ist also offenbar ein Bedürfnis da, sich in irgendeiner Weise auf eine allgemeingültige absolute Zeit zu beziehen. Diese Erkenntnis ist meiner Meinung nach grundlegend dafür, analytische Betrachtungen über Zeitreisen durchzuführen. Die Bezeichnung eines Ereignisses als Zeitreise ist somit als eine sehr subjektiv-menschliche Interpretation zu sehen, selbst wenn es sich um theoretisch-physikalische Ergebnisse handelt.

Hinweis: Auf den physikalischen Zeitbegriff wird detailliert in Kapitel Drei eingegangen, physikalische Ergebnisse, die als *Zeitreisen* bezeichnet werden können, werden in den Kapiteln Vier, Fünf und Sechs behandelt. Ich möchte darauf hinweisen, daß ich im Weiteren die Bezeichnung "Zeitreise" verwenden werde, ohne jedesmal darauf hinzuweisen, daß dies eine subjektiv-menschliche Bezeichnung ist.

Das Reisemotiv

Für Zeitreisen, die in Science Fiction-Literatur oder -Filmen dargestellt werden und für jene Zeitreisen, die in unserer Vorstellung auf Wunsch unternommen werden könnten, existiert meistens ein Motiv, diese Reisen zu unternehmen. Darin unterscheiden sich Zeitreisen nicht von herkömmlichen Reisen, die ebenfalls aufgrund eines Motivs getan werden.

In der Social Fiction sind die Motive für Zeitreisen sehr oft geprägt von einer Technik- bzw. Fortschrittskritik. So wird beispielsweise in die Vergangenheit gereist, um bestimmte Entwicklungen zu verhindern oder zum Besseren zu wenden. Auch in der nicht-sozialkritischen Fiktion finden sich diese Vergangenheitsreisen, um z.B. die Geburt eines gegenwärtigen Widersachers zu verhindern. Die daraus resultierenden paradoxen Situationen und philosophischen Konsequenzen solcher Reisen werden in Kapitel Vier eingehender besprochen.

2. ANALYTISCHE BETRACHTUNG VON ZEITREISEN

2.1. Beispiele für Zeitreisen

Zur Analyse der folgenden Beispiele ging ich von zwei Fragen aus:

Aufgrund welcher Merkmale bezeichnet eine Person eine Reise als Zeitreise?

Durch welche Zeit wird gereist?

Ich werde zu jedem Beispiel das meiner Meinung nach für die Zeitreise charakteristische Merkmal anführen. Anhand dieser Merkmale können Hauptcharakteristika von Zeitreisen formuliert werden, die im darauf folgenden Abschnitt besprochen werden.

• Beispiel 1:

Eine Person aus Graz reist in ein Dorf, wo es keine Elektrizität gibt, folglich auch keine elektrischen Geräte. Gekocht und geheizt wird mit Holz und Kohle. Die meisten Menschen im Dorf sind Bauern, betreiben Viehzucht und Landwirtschaft. Das damit verdiente Geld reicht für das Notwendigste, aber nicht für den Ankauf eines Traktors oder sonstiger Maschinen bzw. Autos. Die Person aus Graz schreibt in ihr Tagebuch: "... ich fühle mich hundert Jahre zurückversetzt."

Merkmal: Stand der Technikausstattung

• Beispiel 2:

Eine andere Person fliegt am 23. Dezember von Wien nach Sydney, um dort Weihnachten zu feiern. In Wien-Schwechat hat es an diesem Tag in der Früh -7°C . Nach dreißig Stunden steigt die Person in Sydney aus dem Flugzeug und verbringt einen schönen lauen Weihnachtsabend bei 23°C . Sie fühlt sich "als ob schon wieder Sommer wäre".

Merkmal: Verlauf der Jahreszeiten, an den die Person gewöhnt ist.

• Beispiel 3:

Der Film "Jurassic Park" von Steven Spielberg.

Ein Wissenschaftler findet Sauriereier aus dem Jura und hat die Idee, diese Eier auszubrüten und den Sauriern eine unbewohnte Insel als Lebensraum zur Verfügung zu stellen. Die Insel soll aber auch quasi als Saurier-Zoo für Besucher geöffnet werden, um den Menschen eine Vorstellung von der Saurierzeit zu geben - eben "Jurassic Park". Es geht allerhand schief, Saurier brechen aus, usw. usf. Es gibt mehrere Gründe, warum dieser Film die Leute so zahlreich ins Kino gelockt hat. Zum einen sind die technischen Effekte, soll heißen: die Wirklichkeitsnähe der "lebendigen"

Saurier, beeindruckend, zum anderen beinhaltet der Film auch typische Gruseffekte. Außerdem spielen Kinder in Hauptrollen, was den Film für Kinder sehr attraktiv macht. Das Faszinierende an der Handlung des Films ist aber jene Idee des Wissenschaftlers, eine vergangene Periode der Erdgeschichte in die Gegenwart zu holen. Und dieses Vorhaben verwirklicht er, indem er die Insel nach bestimmten Merkmalen gestaltet, die eindeutig dieser Zeit zuordenbar sind. Ein Hauptmerkmal dieser Zeit sind die Saurier.

Merkmal: Lebewesen und Lebensraum

• Beispiel 4:

Ich treffe Albert Einstein und lasse mir von ihm die Relativitätstheorie erklären.

Merkmal: eine historische, nicht mehr lebende Person

In diesem Beispiel trifft eine Person aus dem Heute eine andere Person, die eindeutig zu einer anderen Zeit gelebt hat. Die Berühmtheit von Einstein ist hilfreich in der Hinsicht, als berühmte Personen in vielen Aufzeichnungen erwähnt werden und somit die Zeit ihres Wirkens eindeutig bestimmt werden kann. Ich kann behaupten: Ich weiß, daß Einstein jetzt nicht lebt und ich ihn somit nicht treffen kann. Das Treffen aus dem obigen Beispiel kann also nicht durch eine herkömmlich räumliche Reise zustande kommen und steht daher auch im Unterschied zu Punkt a). Erklärungen für dieses Treffen könnten folgende sein: Ich träume bzw. unterliege einer Halluzination. Da Träume und Halluzinationen Gegenstand der Psychologie sind, könnte dieses Erlebnis als "psychische Zeitreise" bezeichnet werden.

Ich bin wach und halluziniere nicht. In diesem Fall bin ich an einem anderen Punkt der Raumzeit als meinem ursprünglichen, und es müßte nach einer möglichen physikalischen Erklärung gesucht werden.

• Beispiel 5:

Eine Person trifft ihre Geschwister, die aber plötzlich viel älter sind. Die Person ist jedoch gleich alt geblieben. Aus irgendeinem Grund hat sich der Altersunterschied verändert.

Merkmal: Alter der Geschwister relativ zu dem Alter der Person

• Beispiel 6:

Eine Person findet sich plötzlich als Beobachtende in einer Situation wieder, die sie vor mehreren Jahren erlebt hat. Sie sieht sich z.B. als Vierjährige mit ihren Eltern, die ebenfalls entsprechend jünger sind, im damaligen Wohnzimmer sitzend.

Merkmal: die ganze Situation (Alter der Beteiligten, damaliges Wohnzimmer, ...)

- Beispiel 7:

Die Person erlebt sich selbst als Kind wieder, und zwar in einer Situation, die für sie traumatisch war. Beispielsweise wird sie von einem Hund gebissen. Sie empfindet den gleichen Schreck und beginnt zu weinen.

Merkmal: Empfindung, die eindeutig einer Situation in einem bestimmten vergangenen Lebensalter gleicht

Der Unterschied dieser Erlebnisse zum Treffen mit Einstein ist der, daß die Person sich auf ihre individuelle Erinnerung bezieht und aufgrunddessen Abnormitäten im Zeitverlauf feststellt. Sie bezieht sich dabei auf ihre individuellen Erfahrungen, die zeitlich geordnet sind. Im Gegensatz dazu kann ich mir bei Einstein zwar ziemlich sicher sein, daß er zu einer anderen Zeit gelebt hat, aber seine Existenz gehört nicht zu meiner persönlichen Erfahrung. Die Identität einer Person ist von ihren persönlichen Erfahrungen geprägt. Diese Erfahrungen werden auch zeitlich geordnet. Hier sei davon abgesehen, wie genau die Sinnesorgane zeitliche Abfolgen differenzieren können und bis zu welcher Zeitspanne etwas als gleichzeitig empfunden wird. Hier seien größere Zeit-spannen betrachtet. Wenn plötzlich der Zwillingbruder zwanzig Jahre älter ist als er nach der persönlichen zeitlichen Ordnung sein dürfte, schließt die Person aufgrund ihres Gedächtnisses und den darin gespeicherten Bewußtseinsinhalten auf Unstimmigkeiten im Zeitverlauf.

Bei diesen Beispielen unterscheiden sich die Erklärungsansätze. In Beispiel 1 verändern sich die Zeitverläufe der Personen relativ zueinander. Psychologisch könnte dieses Beispiel zwar als Traum interpretiert werden, physikalisch könnte es mit der Speziellen Relativitätstheorie (Zwillingsparadoxon) erklärt werden. Dazu genauer in den folgenden Kapiteln.

Ähnliche Erlebnisse wie in Beispiel 2 werden von Menschen berichtet, die einen Unfall erlebten und kurz, bevor sie bewußtlos wurden, Teile ihres Lebens realistisch vor dem geistigen Auge wie einen Film ablaufen sahen. Die Erklärung dieses Phänomens ist Gegenstand der Neuropsychologie. Physikalisch könnte dieses Erlebnis, zumindest sehr theoretisch, mit der Reise durch ein Wurmloch erklärt werden. Dazu ebenfalls genauer in den folgenden Kapiteln. Das Erlebnis im dritten Beispiel könnte durch Hypnose zustande kommen, bei der die hypnotisierte Person ein verdrängtes traumatisches Erlebnis sehr realistisch wiedererlebt.

- Beispiel 8:

In dem Roman "The Time Machine" von H. G. Wells¹³ unternimmt der Hauptdarsteller eine Zeitreise, indem er per Knopfdruck seine Zeitmaschine in Gang setzt. Durch Ablesen der Tachometeranzeige weiß er, in welchem Jahr er sich gerade befindet. Die Anzeige des Tachometers ist also sein Orientierungsmittel. Der Tachometer ist genau genommen nichts anderes als eine Uhr, deren Einheiten jedoch nicht Stunden sondern Jahre sind.

Merkmal: Anzeige auf der "Jahresuhr"

Eine triviale Erklärung für diese Beobachtung könnte lauten: Die Uhr geht falsch. Physikalisch gesehen ist dieses Beispiel auch nicht als Zeitreise zu interpretieren, da ich, wenn ich in Besitz der Uhr bin, mich im gleichen Bezugssystem wie die Uhr befinde und daher die Uhr immer "meine" Zeit anzeigt. Sollte sie die Zeit eines anderen Bezugssystems anzeigen, z.B. jene Zeit, in der ich mich nach der Reise wiederfinde, so müßte die Uhr sich mit diesem zweiten Bezugssystem mitbewegen, was sie aber nicht tut. Dies ist eine Zeitreise aus der Science Fiction.

- Beispiel 9:

Durch Zusammenstoß von beschleunigten Elektronen mit Materie in der hohen Atmosphäre entstehen hochenergetische Teilchen, sogenannte Myonen. Gemessen am Zeitmaßstab ihres Bezugssystems "leben" diese ca. 2,22 Mikrosekunden. Wird ihre Lebenszeit von einem/einer Physiker/in in einem ruhenden Labor gemessen, scheinen sie jedoch mehr als 100 Mikrosekunden zu leben.

Merkmal: Anzeige der "Laboratoriumsuhr" verglichen mit der "Myonenuhr".¹⁴

Diese Beobachtung ist ein Beispiel für die Zeitdilatation, die "Dehnung" der Zeit bei der Bewegung mit hohen Geschwindigkeiten, die durch die Spezielle Relativitätstheorie erklärt wird (siehe Kapitel Drei und Vier).

- Beispiel 10:

Ernst Mach schreibt: *"Allein in meiner Studierstube, bin ich doch nicht allein. Geister stehen mir zur Verfügung. Ein Räthsel quält mich; ich greife bald nach diesem, bald nach jenem Band. Da merke ich, dass ich mich mit lauter Todten berathen habe.*

*Galilei, Newton, Euler waren mir behilflich."*¹⁵

¹³Wells, H. G., *The Time Machine*, Bloomington: Indiana University Press

¹⁴Vgl. Sexl, Roman, Schmidt, Herbert K., *Raum, Zeit, Relativität*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1991

¹⁵Mach, Ernst, *Die Prinzipien der Wärmelehre*, Leipzig 1896, S.377

Merkmal: Gedanken und Wissensinhalte, die mit Personen in Zusammenhang stehen, die der Vergangenheit angehören. "Gespräch" mit der Vergangenheit.

Jedes der Beispiele beinhaltet zumindest ein Merkmal, an dem sich eine Person in der Zeit orientiert. Aufgrund dieser Merkmale identifiziert eine Person ein Erlebnis oder eine Beobachtung als Zeitreise.¹⁶ Diese Merkmale sind in den Beispielen an das Wissen über bzw. persönliches Erleben der Umwelt von Menschen geknüpft. Der Zustand der Umgebung wird als Maß für die Zeit gesehen, die Größe der Veränderung zwischen dem persönlichen Heute und dem vorgefundenen Zustand als Maß für die Dauer. So weiß man aufgrund von Funden, wie die Vegetation im Jura beschaffen war, aufgrund von Gesteinsschichtungen kann man auf Vulkantätigkeit schließen, u.ä.. Man weiß auch über die Zustände, die die Umwelt zwischen dem Jura und heute eingenommen hat, bescheid. Durch dieses Wissen entsteht ein Bild der Beschaffenheit der Umgebung in dieser Zeit und die Veränderungen seit dieser Zeit. Es sind also Charakteristika des Raumes, die eine erdgeschichtliche Zeit bestimmen. Verändern sich die räumlichen Charakteristika, wird dem neuen Zustand eine andere Zeit zugeordnet. Die obigen Beispiele beschreiben sowohl Veränderungen der räumlichen Umgebung, als auch ungewöhnliche Veränderungen von Altersunterschieden.

Veränderungen der natürlichen und sozialen Umgebung sind kennzeichnend für den kulturellen und den soziologischen Zeitbegriff. In dieser Hinsicht kann also von einer "kulturellen/soziologischen Zeitreise" gesprochen werden.

2.2. Möglichkeiten für Zeitreisen

Die Frage nach der Möglichkeit von Zeitreisen beinhaltet die Frage nach dem *Wie*, also nach dem Reisemittel. Das Reisemittel hängt unter anderem davon ab, welcher Zeitbegriff der Zeitreise zugrunde liegt. Es wird unterschieden zwischen kulturell/soziologischen, psychischen und physikalischen Zeitreisen. Physikalische und psychische Zeitreisen werden nur kurz umrissen und ausführlich in den entsprechenden Kapiteln behandelt.

¹⁶Vgl. Deutsch, David, *La trama della realtà*, Torino: Einaudi 1997, S.260f

Psychische Zeitreisen

Wie noch genauer im Abschnitt über psychische Zeitreisen gezeigt wird, zählen Schlaf- und Bewußtlosigkeit sowie Traum und Hypnose zu psychischen Zeitreisemöglichkeiten.

Reisemittel: Dazu zählen Erinnerungen, Träume, psychische Deprivationssituationen, aber auch die Technologie der virtuellen Realität.

Reisebereich: Den Reisebereich stellt die gesamte psychische Vergangenheit, die aus bewußten und unbewußten Gedächtnisinhalten besteht, dar. Außerdem ist durch das psychische Zeitempfinden allein schon ein Reisebereich gegeben. Man denke an die Wahrnehmung von Dauer und an die Manipulierbarkeit dieser Wahrnehmung. Die Wahrnehmung von Zeit und die Orientierung in der Zeit wird in der virtuellen Realität gezielt verändert.

Reiseziel: Reiseziele sind Gedächtnisinhalte aus der Vergangenheit. Die Reiseziele werden entweder "zufällig", wie z.B. in Träumen, oder gezielt erreicht, wie z.B. in Psychotherapie und Erinnerungen.

Kulturelle/soziologische Zeitreisen

Darunter sind Reisen zu verstehen, die in eine andere (z.B. frühere) Kulturform führen. Diese Reisen sind herkömmliche räumliche Reisen. Das reisende Subjekt ist der Mensch, der als soziales bzw. kulturelles Wesen verstanden wird.

Reisemittel: Als Reisemittel kommen alle jene in Frage, die für räumliche Reisen benutzt werden.

Reisebereich: Der Reisebereich ist beschränkt auf die Menschheitsgeschichte, die menschliche Sozial- und Kulturgeschichte.

Reiseziele: Diese sind andere menschliche Kultur- und Sozialformen, die in anderen Ländern der Erde bestehen.

Man könnte einwenden, daß Zeitreisen in die raumzeitliche Vergangenheit auch gleichzeitig Zeitreisen in eine andere menschliche Kultur- oder Sozialform darstellen. Da aber diese Reisen nicht mit herkömmlichen Reisemitteln, also Auto, Bahn, Flugzeug bzw. nicht bei herkömmlichen Reisegeschwindigkeiten stattfinden können, habe ich sie unter mögliche physikalische Zeitreisen eingereiht. Bei den soziologisch-

kulturellen Zeitreisen bricht der/die Reisende nicht aus der physikalischen oder psychischen Zeit aus.

Physikalische Zeitreisen

Diesen Zeitreisen liegt der physikalische Zeitbegriff zugrunde, den Einstein in der Relativitätstheorie geprägt hat. Physikalische Zeitreisen beschränken sich nicht auf Menschen als zeitreisende Subjekte, da der physikalische Zeitbegriff nicht mit der menschlichen Wahrnehmung und dem Bewußtsein verknüpft ist, sondern sowohl für belebte wie nicht-belebte Objekte gleiche Gültigkeit hat. Physikalische Zeitreisen wurden bereits in der Teilchenphysik beobachtet. Zur Veranschaulichung der Beispiele werden zwar Menschen als Zeitreisende dargestellt (Zwillingsparadoxon etc.). Da sich aber daraus auch schwierige philosophische Probleme ergeben können, ist es unverfänglicher und auch realistischer, diese Zeitreisen Teilchen unternehmen zu lassen.

Reisebereich: Theoretisch kann als Reisebereich die gesamte physikalische Raumzeit aufgefaßt werden.

Reiseziel: Punkte der physikalischen Raumzeit stellen die Reiseziele dar.

Reisemittel: Als Reisemittel dienen alle physikalischen Vorgänge, in denen Zeitmaßstäbe im Vergleich zu einem anderen Bezugssystem verändert werden oder in Raumzeiten sogar "übersprungen" werden. Der erstgenannte Effekt tritt bei Geschwindigkeiten, die der Vakuumlichtgeschwindigkeit gegenüber nicht mehr vernachlässigt werden können, und in der Nähe großer Massen auf. Das Überspringen von Raumzeit ist hingegen nur mit Hilfe von Wurmlöchern möglich. Die Reisemittel physikalischer Zeitreisen werden hier kurz angeführt, um einen vollständigen Überblick über Zeitreisen zu geben.

a) Große Geschwindigkeiten

Nach der Speziellen Relativitätstheorie ist die verfließende Zeit nicht absolut und somit gleich in allen Bezugssystemen sondern relativ. Für Zeitreiseneffekte sind Geschwindigkeiten nahe der Vakuumlichtgeschwindigkeit erforderlich. Aufgrund des Effekts der Zeitdilatation vergeht für das reisende Objekt die Zeit langsamer.

b) Gravitation

Auch die Gravitation massereicher Körper beeinflußt den Verlauf der Zeit: Die Zeit vergeht in der Nähe schwerer Massen langsamer. Die Allgemeine Relativitätstheorie

trägt dem Einfluß der Gravitation auf Raum und Zeit Rechnung. Das zeitreisende Objekt bewegt sich in der vereinheitlichten Raumzeit, deren Krümmung die Gravitationseffekte bewirkt. Diese Effekte könnten für Zeitreisen in der Art genutzt werden, daß sich das zeitreisende Objekt für gewisse Zeit in der Nähe schwerer Massen (z.B. Schwarze Löcher) aufhält und dann wieder zum Ausgangspunkt zurückkehrt.

c) Wurm Löcher

Die sogenannten Wurm Löcher, "Henkel" in der Topologie der Raumzeit¹⁷, die voneinander weit entfernte Orte der Raumzeit miteinander verbinden, könnten sich dazu eignen, in kurzer Zeit in ein mehrere Lichtjahre entferntes Gebiet der Raumzeit zu reisen. Wurm Löcher sind bisher auch die einzigen physikalisch denkbaren Möglichkeiten für eine Reise in die Vergangenheit. Daher werden sie auch als Zeitmaschinen bezeichnet.

Science Fiction, Social Fiction, Märchen

Reisemittel: Als Reisemittel in der Fiktion finden sich sowohl naturwissenschaftlich fundierte (z.B. in Star Trek werden Wurm Löcher verwendet) als auch nichtwissenschaftliche, die gänzlich der Phantasie entspringen. Bezüglich der Reisemittel unterscheidet sich Science Fiction von Social Fiction grundlegend:

In der Science Fiction wird modernstes Transportgerät verwendet, es werden neueste technisch-naturwissenschaftliche Erkenntnisse als Handlungselemente verwendet, oftmals in ausgeschmückter und demzufolge nicht mehr wissenschaftlicher Form. Da Wurm Löcher zu den denkbar modernsten "Transportgeräten" gehören, werden sie eingesetzt, um in andere Bereiche der Raumzeit zu reisen. So werden z.B. in der Science Fiction-Serie "Star Trek" Wurm Löcher verwendet, um in entfernte Raumzeit-Regionen zu gelangen. Der technische Fortschritt steht im Mittelpunkt.

In der Social Fiction sind die technischen Elemente zwar zu finden (z.B. als Reisemittel), nehmen aber nicht diese zentrale Rolle ein. Die Zeitreisemittel in der Social Fiction sind häufig auch jene der psychischen Zeitreise. Technik kommt in Zusammenhang mit Technikkritik vor, der Fortschritt wird als Problem thematisiert, die gesellschaftlichen Folgen als Sozialutopie dargestellt.

Reisebereich: Da sowohl in der Science als auch in der Social Fiction Menschen im Mittelpunkt stehen, zählt die menschliche Geschichte (Kultur- und Sozialgeschichte)

¹⁷Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S.647

wie auch die Raumzeit zum Reisebereich. Orientiert wird sich am physikalischen Zeitbegriff.

Reiseziel:

Science Fiction: Die Reiseziele erstrecken sich nach den neuesten physikalischen Theorien über das Universum. Oder aber bestimmte Zeitpunkte in der Vergangenheit oder Zukunft werden angereist.

Social Fiction: Reiseziele sind sowohl Vergangenheit als auch Zukunft der menschlichen Gesellschaft.

Seelenwanderung und Wiedergeburt

Der Wiedergeburtsgedanke findet sich in Religionen wie z.B. dem Hinduismus und dem Buddhismus. Es wird angenommen, daß die Seele des Menschen nach seinem Tod in einem anderen Lebewesen wiedergeboren wird. Aus diesem Grund töten strenge Hinduisten keine Tiere und leben vegetarisch. Nach diesen Religionen wird man so lange wiedergeboren, bis man erlöst ist und endgültig ins Nirvana eingeht. Wer ein nach den geltenden moralischen Gesetzen gutes Leben führt, wird in einer höheren Kaste wiedergeboren, andernfalls in einer niedrigeren. Auch Pythagoras vertrat die Auffassung, daß die Menschen wiedergeboren werden. Die Pythagoräer, seine philosophische Schule, lebten ebenfalls aus diesem Grund streng vegetarisch¹⁸.

Der Wiedergeburtsgedanke beinhaltet einerseits die Vorstellung von einer ewigen Seele, die als höchstes Ziel ins Nirvana eingehen kann, aber niemals stirbt, und einem sterblichen Körper. Da die Seele ewig ist, unterliegt sie keiner Zeit, während der Körper das Vergängliche, das sich Verändernde und Alternde repräsentiert. Die Seele, und nicht der Körper bzw. die Synthese von Seele und Körper, wird als Sitz der Individualität gesehen. Wiedergeburt kann insofern als Zeitreise gesehen werden, als die Seele in einer anderen Zeit wiedergeboren wird. Das weltliche Bewußtsein wird zwar mitgenommen, aber liegt im folgenden Leben unbewußt vor. Es gibt Berichte von Personen, die in Hypnose sich an ein früheres Leben erinnerten, sogar Sprachen plötzlich beherrschten, die sie im "hiesigen" Leben niemals gelernt hatten.

Auch in der Science Fiction wird Seelenwanderung als Methode zur Zeitreise verwendet. In "Quantum Leap"¹⁹ reist ein Sozialarbeiter durch die Jahrzehnte, indem er in Körper von Menschen schlüpft, deren Lebenszeit seine Lebenszeit überlappt.

¹⁸Vgl. Russell, Bertrand, *Philosophie des Abendlandes*, Wien,Zürich: Europa Verlag 1956

¹⁹Bastable, Jonathan, *Good Timing. Time Travel*, Artikel in der Zeitschrift *About Time*, Nr.2

Auch in der Märchen- und Sagenliteratur werden Zeitreisemethoden verwendet. Ein bekanntes Beispiel ist die Geschichte von Dornröschen der Gebrüder Grimm, das ohne zu Altern hundert Jahre schläft und von einem Prinzen wachgeküßt wird. Dornröschens Zeitreisemittel ist der Schlaf.

Zeitmaschinen

Nach Kip Thorne ist eine Zeitmaschine ein Gerät, mit dem man in der Zeit rückwärts reisen kann. Physiker sprechen auch von einer "geschlossenen zeitartigen Bahn".²⁰ Der Begriff Zeitmaschine wird vor allem in der Science Fiction-Literatur verwendet. Thorne hatte deshalb auch einige Bedenken, Wurmlöcher als Zeitmaschinen zu bezeichnen. Daß das Reisemittel für Reisen durch die Zeit als Maschine bezeichnet wird, die mit Knopfdruck in Gang gesetzt wird, zeigt die Parallelität von Zeitreisen und herkömmlichen Reisen mit einem Fahrzeug. Außerdem drückt die Idee von Zeitmaschinen eine gewisse Technikfaszination aus, im Gegensatz zu Zeitreisen durch Träume. Beispiele von Science Fiction, die eine Zeitreise mittels Zeitmaschine zum Thema haben, sind:

*"The Time Machine"*²¹

In diesem Roman wird eine Reise in die ferne Zukunft dargestellt. Die Gesellschaft ist in zwei Klassen geteilt, und es wird ein Schreckensbild dieser zukünftigen Welt gezeichnet. "Time Machine" gehört eindeutig zur sozial-utopischen Science Fiction.

"Back to the Future" ("Zurück in die Zukunft")

Ein Auto wird von einem schrulligen Wissenschaftler zu einer Zeitmaschine umgebaut. Ähnlich wie bei "The Time Machine" zeigt der Tachometer die Jahre an. Die Energie für den Start wird dadurch gewonnen, daß ein Blitz während eines Gewitters direkt in das Auto geleitet wird. Der Professor und sein junger Freund reisen in die Vergangenheit.

Diese Zeitmaschinen können nicht rational erklärt werden. Die Zeitmaschine in "The Time Machine" würde nicht funktionieren, da die Maschine nur in der Zeit reist und nicht in der Raumzeit. Die Ortsreise fehlt. Als Konsequenz würde die Zeitmaschine

²⁰Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S. 646

²¹Wells, H. G., *The Time Machine*, Bloomington: Indiana University Press

mit sich selbst einen Mikromoment vor dem Start zusammenstoßen.²² Eine Zeitmaschine, die als physikalische Zeitmaschine gelten soll, muß rational erklärbar sein. Wurmlöcher können insofern als physikalische Zeitmaschinen bezeichnet werden. Der Begriff Zeitmaschine läßt sofort an Maschine denken, was jedoch genaugenommen auf ein Wurmloch nicht zutrifft. Eine Maschine ist ein technisches Gerät. Genausowenig würde man einen Tunnel durch einen Berg als Raummaschine bezeichnen, nur weil er eine Abkürzung des Weges auf der Erdoberfläche von einem Ort zum anderen darstellt. Ich nehme an, daß der Roman von H. G. Wells den Grundstein dafür gelegt hat, daß in den meisten folgenden Zeitreisegeschichten die Mittel, mit Hilfe derer eine Zeitreise unternommen wird, als Zeitmaschinen bezeichnet werden.

2.3. Charakteristische Elemente von Zeitreisen

Bei dem Versuch, jene allgemeinen Elemente zu finden, die für Zeitreisen typisch sind, ging ich von der Frage aus:

Welche grundlegenden Charakteristika einer Theorie, eines Erlebnisses, einer Vorstellung führen zu einer Interpretation als Zeitreise?

Für die verschiedenen Beispiele von Zeitreisen, aus den allgemeinen Vorstellungen wie auch aus Science Fiction-Literatur und -Filmen, konnte ich vier unterschiedliche Charakteristika finden, die sich nach bestimmten Schlüsselmerkmalen (siehe Beispiele oben) unterscheiden. Der Mensch ist hierbei entweder Beobachter einer Zeitreise oder, in der Mehrzahl der Vorstellungen, identifiziert sich selbst als zeitreisendes Subjekt. In jedem Fall sind Anhaltspunkte zur Orientierung in der Zeit notwendig. An diesen Merkmalen orientiert sich die Person, um ein Erlebnis, ein Treffen, eine Umgebung zeitlich einzuordnen. Die Vorstellungen von Zeitreisen haben gemeinsam, daß diese Erlebnisse aufgrund von bestimmten Merkmalen nicht in den normalen Zeitverlauf einordenbar sind. Aus diesem Grund werden sie als Zeitreisen interpretiert.²³ Würden diese Merkmale fehlen, könnte eine zeitreisende Person die Zeitreise niemals als solche erkennen. Beispiel: Die Person befindet sich mitten im Pazifik im Jahr 1900 und im Jahr 1999. Außer acht lassend, daß sich astronomische Konstellationen in dieser Zeit verändert hätten und der Schiffs- und Flugverkehr zugenommen hätte, würde diese Situation nicht als Zeitreise erkennbar sein, weil jegliche Orientierungshilfe fehlte. Die Merkmale lassen erkennen, auf welchen Zeitbegriff (kulturell, psychisch-individuell, physikalisch) bezug genommen wird.

²²Nahin, Paul J., *Time Machines. Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, New York: AIP 1993, S. 13

²³Vgl. Deutsch, David, *La trama della realtà*, Torino: Einaudi 1997, S.260ff

a) Allgemeine Merkmale treten auf, die geschichtlich oder jahreszeitlich mit einer anderen Zeit in Verbindung stehen.

b) Geschichtlich herausragende Merkmale treten auf, die eindeutig einer bestimmten Zeit zugeordnet werden können.

c) Eine Person trifft auf ihre persönliche Vergangenheit oder Zukunft.

d) Eine Uhr zeigt eine andere Zeit an, als man nach dem Zeitverlauf im eigenen Bezugssystem erwarten würde.

Die Schlüsselmerkmale aus den Punkten a) bis d) werden vor allem auch in der Romanliteratur und in Science Fiction-Filmen verwendet, um Zeitreisen darzustellen. Anhand dieser Merkmale orientieren sich Personen, entweder als Beobachtende oder als Reisende, in der Zeit.

3. DER EINER ZEITREISE ZUGRUNDELIEGENDE ZEITBEGRIFF

Das, was Menschen unter Zeit verstehen, ist eng verknüpft mit dem jeweils vorherrschenden Weltbild. Zeitvorstellungen prägen unser Verständnis von Gott, Welt und Menschen²⁴. Durch Änderung der Weltbilder ändert sich auch der Begriff von Zeit und somit die Begriffe Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Wodurch ein bestimmtes Weltbild entsteht bzw. ein anderes Weltbild ablöst, sei dahingestellt. Aufgrund von Weltbildern werden beobachtete Vorgänge interpretiert, und ihre Ursache wird je nach Weltbild in Göttern, Naturkräften etc. gesehen. Weltbilder sind letztlich immer auch Glaubensfragen und waren somit seit jeher eng mit Religion verknüpft.

Bestimmend für das abendländische Verständnis von Zeit ist der Newtonsche Zeitbegriff von einer regelmäßig dahinfließenden Zeit. Vergangenheit und Zukunft sind durch die ausdehnungslose Gegenwart voneinander getrennt. Das ist physikalische Theorie, die Wahrnehmung von Zeit ist anders. Es wird sehr wohl eine Gegenwart wahrgenommen, also muß sie auch eine zeitliche Ausdehnung haben. Aber die Psyche teilt auch in Vergangenheit (repräsentiert durch Erinnerungen), Gegenwart und Zukunft (etwas, das noch nicht ist).

Im Folgenden wird jener Zeitbegriff behandelt, der der Vorstellung von Zeitreise zugrunde liegt. Die zentrale Frage dieses Abschnitts ist:

Wie sieht jener Zeitbegriff aus, aufgrund dessen man von Zeitreisen sprechen kann?

Es ist auffallend, daß für die Darstellung von Zeitreisen meistens Erkenntnisse aus der Relativitätstheorie Einsteins herangezogen werden. So werden meistens die Änderungen von raumzeitlichen Maßstäben und sogenannte Löcher in der Raumzeit für Zeitreisen genützt. Meines Erachtens liegt der Grund darin, daß die Zeit der Relativitätstheorie jener Zeit entspricht, die "zeitreisenkompatibel" ist. Mit anderen Worten: Die Zeit der Zeitreise muß bereisbar sein. Daraus erwachsen folgende Forderungen an eine der Zeitreise zugrundeliegende Zeit:

1) Die Zeit einer Zeitreise muß aus voneinander getrennten, (Raum-)Zeitpunkten bestehen, die ja einen Abreisepunkt und einen Ankunftspunkt im Sinne einer Reise erst ermöglichen.

²⁴Weis, Kurt, *Zur Einführung: Was verdeutlicht das Fragen nach Zeit*, in: Weis, Kurt (Hg.), *Was ist Zeit?*, München: dtv 1996, S.37

2) Die Zeit muß in irgendeiner Art und Weise unterteilt sein. Zumeist ist es die Unterteilung in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Die verschiedenen Zeitpunkte können der Unterteilung entsprechend zugeordnet werden.

3) Die Zeit muß "vergehen", "verfließen", "voranschreiten", darf nicht statisch sein. Eine Zeitreise in einer statischen Zeit ist sinnlos.

4) Es muß Möglichkeiten geben, sich in der entsprechenden Zeit zu bewegen. Soll die Zeitreise als realistisch und (je nach Disziplin) wissenschaftlich möglich gelten, müssen auch die Zeitreisemöglichkeiten wissenschaftlich akzeptabel sein.

Neben den notwendigen Charakteristika des Zeitbegriffs muß auch die Vorstellung von einem zeitreisenden Objekt entsprechend sein, sodaß als fünfte Forderung hinzugefügt werden kann:

5) Es muß ein zeitreisendes Objekt geben. Dessen Größe und Form ist vollkommen egal, nur muß es als Materie interpretierbar sein. (Die Bedeutung dieser Forderung zeigt sich bei dem Versuch, quantentheoretische Zeitreisen zu konstruieren. Kann man bei einer Welle von Zeitreise sprechen?)

Betrachtet man den Zeitbegriff der diversen wissenschaftlichen Disziplinen, so kann festgestellt werden, daß nur jene Zeiten für die Darstellung einer Zeitreise herangezogen werden, die die oben genannten Forderungen erfüllen.

Zeiten einer Zeitreise sind:

1. Die psychische Zeit:

Es gibt eine Teilung in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.

Beispiele für Reisen in der psychischen Zeit sind einerseits die Vergegenwärtigung von Vergangenen z.B. durch Träume, Hypnose oder Erinnerung in verschiedenster Form. Andererseits sind psychische Zeitreisen durch das subjektive Erleben von Dauer und der daraus folgenden Abweichungen der subjektiven Zeit von einer objektiven Zeit gegeben. Beispiele hierfür wäre die circadiane Uhr des Menschen, Deprivatisierung, Schlaf.

2. Die kulturhistorische Zeit:

Diese Zeit entspricht einer objektiv - allgemeingültigen Zeit. Sie weist eine Zeitskala nach newtonschem Vorbild auf, jedem Ereignis ist ein möglichst genaues Datum zugeordnet, das Datum entspricht Zeitpunkten. Zuordnungen erfolgen aufgrund von Charakteristika wie z.B. Stand der Technikausstattung, etc. Beispiel sind Reisen in

Kulturen, deren Stand der Technik jenem aus einem anderen europäischen Jahrhundert entspricht.

3. Die Raumzeit der modernen relativistischen Physik:

Den Ereignissen werden Punkte in der Raumzeit zugeordnet. Durch Krümmungen der raumzeitlichen Maßstäbe werden intersubjektive Unterschiede bezüglich raumzeitlicher Abstände festgestellt. Die Diskrepanz von der menschlichen Vorstellung einer allgemeingültigen Gegenwart und einer allgemeingültigen Meßbarkeit von Dauer einerseits, und dem Fehlen dieser absoluten Zeit andererseits führt dazu, die Zeit des eigenen Bezugssystems als Maßstab zu nehmen (ruhend, absolut) und die Zeiten bzw. Entwicklungen in anderen Bezugssystemen danach zu beurteilen. Eine Zeitreise ergibt sich also daraus, daß vom eigenen Bezugssystem aus die relativen Unterschiede zu den Vorgängen in den anderen Bezugssystemen quasi als Überspringen von Zeit bzw. "langsamerer/schnellerer Vergehen" von Zeit interpretiert wird. (Ein Beispiel hierfür wäre die "Reise in die Zukunft" des fliegenden Bruders im Zwillingsparadoxon. Siehe dazu Kapitel Vier.)

Meiner Meinung nach weist die Relativität der Bezugssysteme Parallelen zum subjektiven psychischen Zeitempfinden auf, in dem auch keine absolute Zeit angebar ist, aber aufgrund gesellschaftlicher Notwendigkeit konstruiert wurde.

Die relativistische Raumzeit erfüllt alle Forderungen, die an eine bereisbare Zeit gestellt werden. Wissenschaftlich einwandfreie Zeitreisemöglichkeiten sind sowohl in der Speziellen als auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie zu finden (Siehe dazu Kapitel Vier).

4. Die Zeit der Quantenmechanik

Ob die Zeit der Quantenmechanik ebenfalls als Grundlage für Zeitreisen gesehen werden kann, ist fraglich. Der quantenmechanische Zeitbegriff unterscheidet sich nämlich grundlegend von den oben besprochenen Zeiten.

Die Quantenmechanik verfügt weder über scharfe Ortsangaben, noch über scharfe Zeitangaben. In der Quantenmechanik kann bestenfalls dann von Zeitreise gesprochen werden, wenn man die Teilcheninterpretation heranzieht. Es würde jedoch niemand von Zeitreise in Zusammenhang mit Wellen sprechen. Insofern ist es auch unentschieden, ob das "Beamen", also die lichtschnelle Informationsübertragung bei vollständiger Auflösung des Originalobjekts, als Zeitreise zu bezeichnen ist oder nicht. Ich habe mich entschlossen, das Beamen so gut es geht als Zeitreise zu interpretieren, und im Kapitel Sechs näher behandelt.

Wird von den oben genannten Zeitbegriffen ausgegangen, sind die entsprechenden Zeitreisen als möglich zu beurteilen. Aufgrunddessen werden diese Zeitbegriffe in Kapitel Zwei (psychische Zeit) und Kapitel Drei (physikalische Zeit) genauer behandelt.

Nun stellt sich die Frage, welche Zeitbegriffe aus welchen Gründen nie als Grundlagen für Zeitreisen herangezogen werden. Zu diesen Zeitbegriffen zählen:

Religiöse Zeitvorstellungen, die z.B. die Zeit als ewig und Zeitdauer als Illusion betrachten. Hier sind keine Zeitpunkte bzw. Zeitdifferenzen zwischen den Zeitpunkten angebar. Somit ist keine Reise im allgemeinen Sinn möglich.

Die Zeit in der Newtonschen Physik würde zwar prinzipiell die Forderungen nach Zeitpunkten, Zeitdauer und Dreiteilung erfüllen. Die Newtonsche Physik bietet aber keine Möglichkeiten, um zwischen diesen Zeitpunkten im Sinne einer Zeitreise zu "reisen". Diese Möglichkeiten ergaben sich erst durch Einsteins Relativitätstheorie.

Jene Zeitvorstellungen, aufgrund derer keine Zeitreisen möglich sind, werden nicht weiter behandelt. Dies soll jedoch in keinsten Weise eine Geringschätzung dieser Zeitauffassungen darstellen, nur würde die ausführliche Behandlung aller Zeitvorstellungen den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

KAPITEL ZWEI

PSYCHISCHE ZEIT UND ZEITREISE

Motion Platform, Illustration zu:
Frank Biocca, *Virtual Reality Technology*, 1992

1. ZEIT UND BEWUßTSEIN

1.1. Zeit in der Sprache

Der Zeitreise liegt ein Zeitbegriff zugrunde, der in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft geteilt ist. Diese Dreiteilung erscheint Menschen des abendländischen Kulturkreises als selbstverständlich und hat sich auch in der Sprache manifestiert. Am Beispiel des altägyptischen Weltbildes und Tempussystems der Sprache möchte ich zeigen, welche Vorstellungen von Zeit außerhalb des abendländischen Weltbildes existieren können.

Der beste Weg, um zu erfahren, welcher Begriff von Zeit in einer Kultur besteht, ist jener über die Analyse der Sprache, also welche Wörter es für Zeit gibt. Im Ägyptischen gibt es kein Wort, das so umfassend ist wie unser Wort "Zeit", aber viele Wörter, die etwas mit Zeit zu tun haben. Die Zeit wurde in Stunde, Tag, Dekade, Monat, Jahreszeit und Jahr gemessen. Bemerkenswert ist hierbei, daß sich die Jahre nicht aufsummieren, sondern ein Jahr die größte Zeiteinheit darstellt. Sie bilden den größten Zyklus und lassen nach ihrem Ablauf die Zeit von neuem beginnen. Daher heißt das Jahr "die sich Verjüngende" und bezieht sich auf eine in sich kreisende Zeit. Es gab drei Jahreszeiten zu je vier Monaten, deren Einteilung durch die in ihnen stattfindenden landwirtschaftlichen Tätigkeiten erfolgte: Überschwemmung, Aussaat, Ernte. Die Monate richteten sich nach dem Mond. Die Dekaden waren quasi Wochen, mit einem regelmäßigen Ruhetag. Tag und Nacht wurde jeweils in zwölf Stunden geteilt. Der Tag wurde immer von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang gezählt, wodurch die Stunde je nach Jahreszeit verschieden lang war. Der Name für die Stunde war "die Vergehende", denn die Stunde verjüngt sich nicht in der folgenden, wie das Jahr, sondern muß der folgenden Platz machen und kommt erst nach 23 weiteren Stunden wieder zum Zuge. Jahr und Stunde als größte und kleinste Zeiteinheit haben also entgegengesetzte Physiognomien: verjüngend und vergehend. Im Gegensatz dazu ist in unserer Kultur Zeit immer etwas Vergehendes, etwas das zunimmt, abläuft, sich aufsummiert, voranschreitet.¹

Der Zeitbegriff einer Kultur drückt sich auch im Tempussystem ihrer Sprache aus. Das indogermanische Tempussystem, dem auch wir folgen, teilt die Zeit in drei Zeitstufen: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Diese Zeitstufen drücken sich in den Verben, den "Zeitwörtern" aus (z.B.: ich ging, ich gehe, ich werde gehen). Bestimmte Begriffe

¹Assmann, Jan, *Das Doppelgesicht der Zeit im altägyptischen Denken*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290

bekommen überhaupt erst einen Sinn, wenn von einer Dreiteilung der Zeit ausgegangen wird. Carl Friedrich von Weizsäcker beispielsweise stellte fest:

*"Das Wort Erfahrung besitzt keine einzige Bedeutung, die nicht den Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft als gegeben ansetzt."*²

Die alte ägyptische Sprache gründete ihr Tempussystem nicht auf Dreiteilung der Zeitstufen sondern auf Zweiteilung in die Aspekte Perfektiv und Imperfektiv. Perfektiv ist etwas abgeschlossenes, der Imperfektiv trägt den Charakter des Ewigen. Der Imperfektiv ist vergleichbar mit der Verwendung des Präsens Indikativ in der deutschen Sprache, um eine nicht zeitlich bestimmte Tätigkeit auszudrücken.

Beispiel: Die Aussage "Er raucht." kann einerseits bedeuten, daß er jetzt gerade raucht, wird aber verwendet, um auszudrücken, daß jemand überhaupt raucht, also ein Raucher ist, auch wenn er gerade nicht raucht.

Ein ähnliches Tempussystem konnte bei den Hopi - Indianern gefunden werden. So hat Edward Hall festgestellt, daß die Hopi-Indianer Zeitvorstellungen eher wie Adverbien als wie Substantive behandeln. "Sie können nicht ausdrücken, daß der Sommer heiß ist, weil Sommer die Eigenschaft heiß ist ..." ³ Zeit wird nicht als Größe wahrgenommen sondern als Zustand.

Zeit und Ewigkeit

Interessant erscheint mir die oben schon angeschnittene Unterscheidung von Zeit (oder Zeitlichkeit) und Ewigkeit. In seinem Werk "Timaios" thematisierte Platon einerseits die Dreiteilung der Zeit, unternahm aber zusätzlich noch eine Unterscheidung zwischen Zeit und Ewigkeit:

*"Ewigkeit ist die Sphäre des Seins, von dem in Wahrheit nur ausgesagt werden kann: es ist; Zeit dagegen ist die Sphäre des Werdens, alles dessen, von dem gesagt werden kann: es war, ist, wird sein. Zeit ist Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft."*⁴

Die christlichen Philosophen des Mittelalters stellten theologische Überlegungen zu Zeit und Ewigkeit an, und zwar, um Antworten auf Fragen wie "Was machte Gott, bevor er Himmel und Erde erschuf?" zu finden. Augustinus kam zu dem Schluß, daß

²Weizsäcker, Carl Friedrich von, zitiert in: Davies, Paul, *Gott und die moderne Physik*, München: C.Bertelsmann Verlag 1986, S.159

³Levine, Robert, *Eine Landkarte der Zeit. Wie Kulturen mit Zeit umgehen*, München: Piper 1998, S.137

⁴Platon, *Die Zeit und die Planeten*, in: *Timaios*, Hülser, Karheinz (Hrsg.), nach der Übersetzung von Schleiermacher, Friedrich, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1991, S.257

Gott vorher *n i c h t s* machte. Vor der Schöpfung war nicht Zeit sondern Ewigkeit. Ewigkeit darf keineswegs mit unendlicher Zeit verwechselt werden. Sie ist vielmehr die Negation von Zeit. (Anm.: Hier fällt eine gewisse Ähnlichkeit zur Urknall-Theorie auf: Es gab kein Vorher, weil es keine Zeit (im heutigen Sinne) gab.)

1.2. Zeitwahrnehmung

Die Dreiteilung der Zeit ist in psychischen Vorgängen nicht eindeutig. Es wird folgenden Fragen nachgegangen:

Wie nimmt das menschliche Bewußtsein Gleichzeitigkeit bzw. Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft wahr?

Gibt es eine neurologische Begründung für das Wahrnehmen einer Zeitrichtung?

Im 20. Jahrhundert, durch Fernsehen, Computer, Internet, kurz: durch Medialisierung der Gesellschaft, ist eine weitere Veränderung des Zeitbegriffs feststellbar, eine äußerliche Synchronisierung von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, die der neuro-nalen Innenzeit sehr ähnlich ist.⁵

In diesem Abschnitt werde ich auf die Zeitwahrnehmung und Zeitstrukturen des menschlichen Bewußtseins eingehen. In Hinblick auf Zeitreisen werden die Aspekte *Vergangenheit, Gegenwart* und *Zukunft*, der Begriff des *Jetzt* und die Frage nach der Existenz einer Zeitrichtung in Zusammenhang mit Bewußtsein besonders beleuchtet und neurologische Erklärungsversuche gegeben.

Entwicklung des Zeiterlebens

Die bewußte Zeiterfahrung des Kindes entwickelt sich im 4. bis 5. Lebensjahr.⁶ Die frühesten Kindheitserinnerungen reichen zurück ins 3. bis 5. Lebensjahr, jedoch fehlt ihnen eine zeitliche Kontinuität. Zuerst wird "zeitlos" der extrapersonale Raum erobert und es werden in der sprachlichen Entwicklung Ortsbezeichnungen erworben. Die ersten Erinnerungen, in denen Zeit als bewußt erlebte Zeit erinnert wird, reichen bis in das 6. bis 8. Lebensjahr. Das Kind erfährt Zeit aufgrund dreier Charakteristika:

- Zeit als Ordnungsfaktor: Ereignisse wie Mittagessen werden einer bestimmten Zeit zugeordnet.
- Zeit als Rhythmus: Das Kind lernt, daß Zeit etwas mit Zählen zu tun hat.

⁵Vgl. Großklaus, Götz, *Medien-Zeit*, zitiert in: Weis, Kurt (Hg.), *Was ist Zeit?*, München: dtv 1996, S.42f

⁶Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290

- Zeit als Vergehendes und in die Zukunft Weisendes: Beispiel: Der Adventkalender und das zukünftige Weihnachtsfest.

Begriffe des Zeitbereichs sind, wie in vielen Sprachen, aus dem Raumbereich entlehnt⁷, wie z.B. Zeitabschnitt, Zeitraum etc. Bis zum 6. bis 8. Lebensjahr haben die meisten Kinder des abendländischen Kulturkreises sechs wesentliche Eigenschaften erfahrbarer Zeit kennengelernt:⁸

- 1) Die Gliederung in Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft.
- 2) Die Zeit hat eine Richtung und weist aus der Vergangenheit in die Zukunft.
- 3) Die Zeit läßt sich durch ein periodisches Ereignis messen.
- 4) Zeit wird in Meßgrößen angegeben. Diese sind Sekunde, Minute, Stunde, Tag, Monat, Jahr.
- 5) Die Zeit bringt Veränderungen, die nicht umkehrbar sind.
- 6) Die subjektive Dauer der erlebten Zeit stimmt oft nicht mit der durch die Uhr gemessenen Zeit überein.

60 000 Jahre alte Grabfunde zeigen, daß auf der Entwicklungsstufe des Homo Sapiens die Zeit auf ein individuelles Lebensende hin begrenzt erlebt wurde. Dies ist ein wichtiger Punkt im menschlichen Zeiterleben.

Nach Ernst Pöppel sind Gleichzeitigkeit, zeitliche Folge, Gegenwart subjektive Phänomene, die zur Ordnung von Ereignissen im Gehirn beitragen.⁹ Es werden diesbezüglich fünf subjektive Phänomene unterschieden:

- Gleichzeitigkeit
- Ungleichzeitigkeit
- Aufeinanderfolge und zeitliche Ordnung
- Gegenwart
- Dauer

Was ein Zeitphänomen ist und wie Zeitphänomene hierarchisch aufeinanderfolgen, läßt sich aus experimentell-psychologischen Beobachtungen ableiten.

⁷Cassirer, Ernst, *Philosophie der symbolischen Formen. I. Die Sprache.*, zitiert in: Gumin, Meier, 1989

⁸Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290

⁹Vgl. dazu und zum Folgenden Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990

Gleichzeitigkeit und Ungleichzeitigkeit

Werden durch einen Kopfhörer in beide Ohren kurze Tonreize von je einer Millisekunde Dauer und objektiv gleichzeitig gegeben, so hört die Person einen einzigen Ton zirca in der Mitte des Kopfes. Es kommt zu einer Fusion der beiden Signale im Gehirn. Werden die beiden Reize mit einer zeitlichen Verzögerung von etwa 1 ms gegeben, so findet ebenfalls eine Verschmelzung der Signale im Gehirn statt und die Versuchsperson hört nur einen Ton. Dieser Ton wird aber an einer anderen Stelle des Kopfes wahrgenommen.

Es läßt sich daraus die Schlußfolgerung ziehen, daß objektive, also physikalische Ungleichzeitigkeit von Signalen nicht hinreichend ist, um subjektive Ungleichzeitigkeit wahrzunehmen. Erst wenn die zeitliche Differenz 3 ms beträgt, werden die zwei Reize als getrennt wahrgenommen. Dies ist die Ungleichzeitigkeitsschwelle im Hörbereich. Die Person hört dann getrennt in jedem Ohr einen Tonreiz.

Ungleichzeitigkeits- bzw. Verschmelzungsgrenzen sind je nach Sinnesorgan verschieden hoch. Die Verschmelzungsgrenze im visuellen Bereich liegt um einiges höher als im akustischen, nämlich bei 20-30 ms. Das Tastsystem liegt zwischen akustischem und visuellem Bereich.

Hieraus kann festgehalten werden, daß physikalische und subjektive Gleichzeitigkeit von Reizen verschieden sind. Außerdem geht hervor, daß Gleichzeitigkeit im Erleben nichts Absolutes ist, da die "Gleichzeitigkeitsfenster" je nach Sinnesorgan variieren. Beim Hören ist das Gleichzeitigkeitsfenster am engsten.

Zeitliche Ordnung

Daß zwei Reize als nicht-gleichzeitig wahrgenommen werden, besagt nicht, daß sie auch subjektiv zeitlich geordnet werden können. Nach dem obigen Versuchsbeispiel kann also bei einer Differenz von 3 ms zwar festgestellt werden, daß zwei getrennte Reize vorliegen, aber nicht, welcher der erste und welcher der zweite Reiz war. Durch die Frage nach Reihenfolge wird die Aufmerksamkeit auf einen anderen Aspekt des Reizgeschehens gelenkt. Für das Erkennen zeitlicher Ordnung im Hörbereich sind 30 bis 40 ms erforderlich. Anscheinend wird durch die neue Fragestellung ein anderer Mechanismus des Gehirns angesprochen. Um ein Ereignis zeitlich ordnen zu können, muß es nämlich zuerst als eigenständiges Ereignis erkannt werden. Dann erst kann es auf andere Ereignisse bezogen werden.

Auffällig bei den Experimenten zu zeitlicher Ordnung ist, daß die zeitliche Ordnungsschwelle, also die objektiv-physikalische Zeitdifferenz zwischen den Reizen, sowohl beim Hören als auch beim Sehen und Tasten gleich zu sein scheint und 30 bis 40 ms beträgt.

Der Begriff der subjektiven Gleichzeitigkeit kann nun folgendermaßen differenziert werden.

Unterhalb einer bestimmten, für verschiedene Sinnesorgane unterschiedlichen Schwelle kann von *"vollkommener" subjektiver Gleichzeitigkeit* gesprochen werden. Oberhalb dieser Schwelle aber unterhalb der zeitlichen Ordnungsschwelle (das ist im Hörbereich zwischen 3 ms und 30 ms) wird *"unvollkommene" Gleichzeitigkeit* wahrgenommen. Erst jenseits der 30 ms-Grenze werden Reize zu selbständigen zeitlichen Ereignissen.

Diese Erkenntnisse sind für das Verstehen und Behandeln von Hirnstörungen von praktischer Bedeutung. Störungen des Gehirns führen zu einer Verlangsamung neuronaler Prozesse. Im Hörbereich hat dies zur Folge, daß Sprachlaute zu rasch aufeinanderfolgen, um in Abfolge verstanden werden zu können. So liegt die akustische Information für Konsonanten wie "d" und "t" bei 20 bis 30 ms. Bei hirngeschädigten Personen kann die zeitliche Ordnungsschwelle bei 100 ms liegen. Daraus erklären sich die durch Hirnstörungen hervorgerufenen Sprachstörungen bei Personen, die z.B. einen Schlaganfall erlitten haben. Die aufeinanderfolgenden Konsonanten können nicht mehr analysiert werden. Ebenso folgt hieraus, wie bedeutsam die zeitlichen Verarbeitungsmechanismen des Gehirns für Sprachgebrauch und Sprachwahrnehmung allgemein sind. Die 30 ms sind der elementare Zeitbereich, jene Zeit die unser Gehirn benötigt, um Ereignisse als Bausteine des Erlebens zu definieren.¹⁰

Das Gehirn arbeitet offenbar nicht kontinuierlich sondern in einem "Takt" von 30 ms, wie auch aus Experimenten zur visuellen Wahrnehmung bestätigt werden konnte. Beginnt ein Gegenstand, auf den unser Blick gerichtet ist, sich plötzlich zu bewegen, so setzt die Augenbewegung mit einer Verzögerung von 30 ms ein.

Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft

Ereignisse werden nicht für sich allein wahrgenommen sondern aufeinander bezogen und bilden eine Wahrnehmungsgestalt. Dies ist dadurch möglich, daß das Gehirn einen zeitlichen Integrationsmechanismus bereitstellt. Dieser ist die Grundlage für jenes Phänomen, das als Gegenwart bezeichnet wird. Die Begriffe Vergangenheit und Zukunft sind in Beziehung zu sehen mit dem Begriff der Gegenwart. Es werden im Folgenden neuropsychologische Theorien zum Erleben von Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft beschrieben.

¹⁰Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990, S.134

Augustinus war einer der ersten abendländischen Philosophen, der das Wahrnehmen von Zeit als psychisches Phänomen erkannte. Er hinterfragte die Begriffe Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft nach ihrer wirklichen Bedeutung und fand, daß sie nur einen Sinn machten, wenn man sie bezogen auf die Psyche betrachtet. Vergangenheit ist demnach Erinnerung, Gegenwart ist Erleben und Zukunft ist Erwartung. Sowohl Erinnerung als auch Erleben und Erwartung sind im Bewußtsein gegenwärtig.

*"Zukünftiges und Vergangenes sind nicht; die Behauptung, es gebe drei Zeiten, Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, trifft nicht im strengen Sinne zu. Im strengen Sinne müßte man wohl sagen: Es gibt drei Zeiten: Die Gegenwart von Vergangenen, die Gegenwart von Gegenwärtigem und die Gegenwart von Zukünftigem."*¹¹

Aristoteles hat die Gegenwart, das Jetzt, als die ausdehnungslose Grenze zwischen Vergangenheit und Zukunft bezeichnet¹². Dies entspricht jedoch nicht der Wirklichkeit der Phänomene.

In **Abb.II.1** ist der Unterschied zwischen physikalischer Zeit und erlebter Zeit skizziert.

Der Zeitbegriff der aristotelischen Physik ist der erlebten Zeit noch sehr verwandt. Durch Galilei und schließlich Newton wurde ein Zeitbegriff eingeführt, der von der erfahrenen Zeit völlig getrennt war. Der große Unterschied bestand darin, daß die Zeit fortan keine Richtung mehr hatte, dies drückt sich in der Zeitsymmetrie der mechanischen Gesetze aus, und der erlebten Gegenwart wird keine Bedeutung beigemessen.

In der Neuropsychologie wird die Gegenwart als eine Zeitstruktur gedeutet, die auf einem automatischen Integrationsprozeß beruht. Experimenten zufolge hat die Integration aufeinanderfolgender Ereignisse zu einer Wahrnehmungsgestalt eine zeitliche Grenze¹³, die bei 3 Sekunden liegt¹⁴. Dies wird deutlich beim Sehen doppeldeutiger

¹¹Augustinus, zitiert in: Pöppel, Ernst, *Die drei Sekunden der Gegenwart*, Artikel in: *du, die Zeitschrift der Kultur*, Heft Nr. 10, Oktober 1997, Zürich: TA-Media AG

¹²Aristotele, *Fisica*, traduzione di Luigi Ruggiu, Milano: Rusconi 1995, Libro IV, Cap. 13

¹³Grüsser bezeichnet die psychische Präsenzzeit als Gegenwart und meint, daß sie sich bis zu 20 Sekunden ausdehnen kann. Pöppel versteht die Gegenwart hingegen als das Jetzt, das eine Ausdehnung von ca. 3 Sekunden hat.

Vgl. dazu: Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S.98

Figuren oder beim Hören doppeldeutiger Phonemfolgen. In beiden Fällen "kippt" das Bild oder die Hörweise nach ca. 3 s:

Beispiel 1: Der *Neckersche Würfel* (siehe **Abb.II.2**)

Beispiel 2: Sprechfolge der Silben KU und BA: Die Hörweise der Reihenfolge KU und BA kippt alle 3 s zwischen KUBA und BAKU.

Experimente zum 3 s-Gegenwartsfenster gibt es auch aus der Psychophysik, wenn Reize hinsichtlich ihrer Intensität (gleich hoch, gleich laut, gleich hell) miteinander verglichen werden sollen. Nur dann, wenn beide Reize innerhalb eines zeitlichen Fensters von 3 s gegeben werden, ist ein Vergleich möglich. Ist der Zeitabstand größer, verblaßt der erste Reiz und der zweite wird überschätzt.

Auch Bewegungsabläufe sind hinsichtlich ihrer Planung und Ausführung im Gehirn zeitlich strukturiert, auch hier findet sich das hervorgehobene Zeitintervall von 3 s. Dies ist ein interkulturelles Phänomen und spricht daher für einen grundlegenden Mechanismus des Gehirns.

Das Phänomen der zeitlichen Integration bis 3 s kann zur Definition des Bewußtseins herangezogen werden:

Der zeitlich begrenzte zentrale Integrationsmechanismus bewirkt, daß ein Zeitintervall als gegenwärtig erlebt wird. Dieses Zeitintervall kennzeichnet den jeweils singulären Zustand "bewußt". Aufeinanderfolgende Zustände "bewußt" können als "Bewußtsein" bezeichnet werden.¹⁵

Ein weiteres Beispiel für die Begrenztheit der zeitlichen Integration findet sich im Bereich der Sprache, nämlich in der Dichtkunst. Aus Gedichten in verschiedenen Sprachen konnte herausgefunden werden, daß Verszeilen eine Dauer bis zu 3 Sekunden haben, die rein nach den grammatikalischen Möglichkeiten nicht vorliegen müßte. Bei Gedichtzeilen von längerer Dauer, wie Hexameter oder Alexandriner, wird in der Zeile beim Sprechen eine Pause eingelegt. Die 3 Sekunden-Segmentierung dürfte ein derartig bedeutsames Phänomen in der Organisation von Gehirnprozessen sein, sodaß sich Dichter offenbar automatisch an diese zeitliche Strukturierung gehalten haben.

¹⁴Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990

¹⁵Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990, S.142

Auch in der Musik läßt sich diese zeitliche Segmentierung nachweisen. Viele musikalische Motive weisen eine Dauer von etwa 3 s auf.¹⁶

Zeitliche Orientierung

Der Mensch verliert beim Einschlafen das Wachbewußtsein und somit auch die zeitliche Orientierung. Wird ein Schlafender aus der Tiefschlafphase geweckt, braucht er einige Sekunden, um sich zeitlich zu orientieren. In den Traumphasen stellt sich wieder Zeiterleben ein, jedoch korreliert die Traumzeit nicht mit der wirklichen Zeit des Wachbewußtseins. In der Regel wacht auch ein Mensch ohne Schlafstörungen am Ende einer Traumphase auf. Die kurze Unterbrechung kann jedoch nicht in die zeitliche Kontinuität des Wachbewußtseins eingeordnet werden, und man erinnert sich nicht daran. Bei Menschen mit Schlafstörungen dauern die Wachphasen lange genug, um in die Zeit des Wachbewußtseins eingegliedert zu werden.¹⁷

Dauer

Bei der Empfindung der Dauer von Zeitintervallen wird ein anderer als der 3-Sekunden-Integrationsmechanismus angesprochen, nämlich das Gedächtnis. Im Gedächtnis werden Informationen additiv gespeichert. Hier sei das "zeitliche Paradox" erwähnt, wonach uns die Dauer einer langweiligen Situation im Erleben lang, rückblickend jedoch kurz erscheint.¹⁸ Umgekehrt erlebt man eine Situation, in der viele Informationen verarbeitet werden, kurzweilig, im Rückblick jedoch als lange Zeit. Dies ist dadurch erklärbar, daß retrospektiv die Zeit über den mentalen Inhalt beurteilt wird, also über das Gedächtnis, im Erleben wird die Aufmerksamkeit sowohl auf das Geschehen als auch auf den Ablauf der Zeit gerichtet.

In Versuchen zum Erleben von Dauer, in denen Versuchspersonen die Dauer eines gegebenen Reizes schätzen sollten, konnte gezeigt werden, daß die geschätzte Dauer im Mittel linear mit der objektiven Dauer des Reizes ansteigt, daß die Dauer aber in den meisten Fällen unterschätzt wird.¹⁹

¹⁶Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990

¹⁷Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S.111f

¹⁸Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990, S.144

¹⁹Vgl. Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S. 102

Daß es trotz zeitlicher "Zerstückelung" zu einer Kontinuität im Erleben kommt, ist darauf zurückzuführen, daß Bewußtseinsinhalte miteinander vernetzt werden. Dadurch entsteht der subjektive Eindruck kontinuierlichen Erlebens. Ein Beweis dafür, daß die Kontinuität des Erlebens eine Gedächtnisleistung ist, zeigen Fälle von Patient/inn/en mit Denkstörungen, wie z.B. der Schizophrenie. Teilweise sind diese Menschen nicht mehr in der Lage, eine sinnvolle Gedankenkette zu bilden. Ihnen ist die Kontinuität des Erlebens und der subjektive Eindruck eines zeitlichen Stromes verlorengegangen.²⁰

1.3. Zeitgestalten und Zeitanisotropie

Eine Zeitgestalt ist ein in der Zeit strukturierter Wahrnehmungsablauf.²¹

Menschen sind in der Lage, zeitlich Strukturen als geschlossene Zeitgestalten wahrzunehmen. Im Gegensatz zur räumlichen Wahrnehmung, in der eine Gestalt auch wieder-erkannt wird, wenn sie gespiegelt, gedreht oder in ihrer Größe verändert wird, werden in dieser Hinsicht veränderte Zeitgestalten nicht wiedererkannt.

Abb.II.3 zeigt ein Notenbeispiel von Ernst Mach.

Experimente zur Wahrnehmung von Rhythmen zeigen, daß, wenn ein Thema rückwärts gespielt wird, das Thema auch nicht ansatzweise wiedererkannt wird.

Nach Grüsser sind Zeitgestalten in ihrer Wahrnehmung gerichtet, wie es sich z.B. im Wahrnehmen von Sprache oder Musik zeigt. Das Wahrgenommene enthält nicht nur Inhalte des gerade Vergangenen und des im Augenblick Gehörten, sondern in der Regel auch einen Erwartungswert auf die unmittelbare Zukunft. In diesem Zusammenhang spricht man von Redundanz sprachlicher und musikalischer Strukturen, die auch als Korrektur bei Wahrnehmungsfehleistungen, wie Verhören oder Verlesen wirkt. Dadurch wird das Verstehen erleichtert.²²

²⁰Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990, S.145

²¹Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S. 110

²²Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S.109f

Erinnerte Zeit

Die Anisotropie der erlebten Zeit, die schon Ernst Mach beobachtet hat, ist durch zahlreiche Experimente belegt. Sie gilt auch für die zeitliche Strukturierung der Erinnerung. In **Abb.II.4** wird der Ablauf einer zeitlichen Rückerinnerung veranschaulicht. Wird früher Erlebtes ins Gedächtnis zurückgerufen, erfolgen "Rückwärts-Sprünge" in die Vergangenheit. Das direkte Erinnern eines bestimmten Ereignisses gelingt jedoch nur in "Vorwärtsrichtung", d.h. in jener zeitlichen Richtung, in dem sich das Ereignis abspielte. Die zeitliche Rückwärtsrichtung des Bewußtseins erfolgt also sprungförmig gegen die Richtung erfahrbarer Zeit, der Prozeß des Erinnerns erfolgt kontinuierlich in Richtung der erfahrenen Zeit.

Im Gegensatz zur Anisotropie erinnerter Zeit besteht für die Erinnerung von räumlichen Beziehungen diese Anisotropie nicht. So kann ein genau erinnerbarer Weg von A nach B auch als Weg von B nach A beschrieben werden. Dieser Freiheitsgrad im räumlichen Erinnern ist biologisch zweckmäßig, besteht aber im zeitlichen Erinnern nicht.²³

Neurophysiologie der Zeitwahrnehmung

Es stellt sich die Frage, wieso das Gehirn nicht kontinuierlich sondern zeitlich diskret Informationen verarbeitet. Was sind die neurophysiologischen Gründe jenes Phänomens, das als Zeitsinn bezeichnet wird?

Der Grund hierfür liegt in der elektrischen Aktivität der Neuronen im Gehirn. Durch jeden Reizauftritt wird ein oszillatorischer Prozeß der elektrischen Aktivität der Neuronen im Gehirn in Gang gesetzt. Dieser oszillatorische Nervenprozeß stellt gleichsam eine Uhr im Gehirn dar. Vereinfacht gesagt ergeben sich die 30 ms aus jener Zeit, die der Prozeß der physikalischen Signalübertragung im Hirn braucht.²⁴ Im Zustand der Vollnarkose verschwinden die Oszillationen, es wird für die Dauer des Narkosezustandes keinerlei Information verarbeitet, Ereignisse können nicht mehr identifiziert und daher die zeitliche Ordnung nicht mehr angegeben werden. Die Patienten haben nach dem Aufwachen den Eindruck von Zeitlosigkeit. (Typische Frage nach der Operation: "Wann beginnt denn die Operation?")

²³Vgl. Kanitscheider, Bernulf, in: *Zeit-Zauber. Unser Jahrhundert denkt über das Geheimnis der Uhren nach*, Franz Kreuzer im Gespräch mit Michael Ende und Bernulf Kanitscheider, Wien: Franz Deuticke Verl. ges. 1984

²⁴Grüsser beschreibt den Transduktionsprozeß von äußeren Reizen in körpereigene Reize am Beispiel des Sehens. in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S.114f.

Im Unterschied dazu werden im Schlaf durchaus Informationen verarbeitet, wenn auch in ungeordneter Weise. Es fehlt nach dem Erwachen der Eindruck von Zeitlosigkeit.

Es wird beobachtet, daß Reize, die objektiv nicht gleichzeitig gegeben werden, als gleichzeitig empfunden werden. Dies liegt daran, daß die Signalverarbeitung des ersten Reizes im Zentralnervensystem mehrere Sekunden anhält. Die Erregung durch das zweite Signal trifft sozusagen noch auf Resterregung, die durch das erste Signal ausgelöst wurde.

Anisotropie erlebter Zeit

Durch die Wahrnehmungsprozesse wird ein biologisch zweckmäßiges Bild von der Umwelt hergestellt. Unsere biologische Umwelt hat eine im makroskopischen physikalischen Bereich feststellbare zeitliche Anisotropie. Ein rückwärtsgespulter Film wird eindeutig als "gegen die Richtung" gespielt empfunden. Nach Grüsser ist die Anisotropie der Zeit eine genetische zweckmäßige Anpassung der Wahrnehmungswelt an die Umwelt. Da weder in der Wahrnehmung noch in der Erinnerung Zeitsymmetrie oder Zeitumkehr realisierbar ist, muß es neuronale Mechanismen im Gehirn geben, aus denen die Anisotropie notwendigerweise folgt. Im Folgenden wird dazu die Hypothese von Otto-Joachim Grüber dargestellt.

Zur subjektiven Bestimmung einer Zeitdauer muß im Gehirn eine Art Uhr, also ein periodischer Zeitgeber und Zähler vorhanden sein. Außerdem muß die Zeitwahrnehmung in ein zeitliches Referenzsystem eingeordnet werden, um zeitliche Orientierung zu gewährleisten.

Zeitgeber

Periodische körperliche Vorgänge wie Herzschlag und Atmung kommen als Zeitgeber nicht in Frage, sie sind zu langsam für die unmittelbare Zeitwahrnehmung. Da eine allgemeine zeitliche Desorientierung nur in jenen Krankheitsfällen zu beobachten ist, bei denen die Hirnfunktion allgemein geschädigt ist, ist der Zeitgeber in einer Funktion zu suchen, die große Bereiche des Hirns in gleicher Weise bestimmt. Nach Grüssers Hypothese sind der Alpha-Rhythmus der Großhirnrinde und der Theta-Rhythmus des limbischen Systems Zeitgeber für den Zeitsinn. Dies wird durch folgende Beobachtungen gestützt:

- Zeitliche Desorientierung gehen immer mit einer Störung des Elektroenzephalogramms einher. Das Elektroenzephalogramm zeigt die periodischen Spannungsschwankungen in der Großhirnrinde und in den tiefen Strukturen des Großhirns.

- Im Tiefschlaf, in dem die zeitliche Wahrnehmung aufgehoben ist, zeigt das EEG unregelmäßige langsame Spannungsschwankungen von 0,5 bis 3 Hz.
- In den Traumphasen, in denen eine partielle zeitliche Strukturierung festzustellen ist, kommt es zur Frequenzzunahme.
- Bei Kleinkindern zeigt das EEG ein Gemisch aus langsamen und aperiodischen Abläufen. Im Alter von 8 bis 10 Jahren tritt ein den Erwachsenen ähnliches EEG auf.

In **Abb.II.5** sind verschiedene EEG-Muster dargestellt.

Zähler

Grüsser vermutet den Zähler für die Wahrnehmung von Dauer und Rhythmus in Neuronennetzen der Sprachregion der dominanten Großhirnrinde. Daraus würde sich erklären, warum bei Schädigung der entsprechenden Strukturen der Großhirnrinde sowohl die zeitliche Strukturierung der Sprache als auch die Zeitschätzung und Wahrnehmung von Rhythmen gestört sind.

Erinnerung

Erlebte Zeit beinhaltet immer einen emotionalen Aspekt. Wieviel erlebte Zeit auch erinnerbare Zeit ist, hängt u.a. von den emotionalen Bedingungen während des Erlebens und während des Erinnerns ab. Für die Zeitwahrnehmung von emotionalen Faktoren ist vor allem das Neuronennetz des limbischen Systems des Großhirns verantwortlich. Wahrscheinlich sind dies die gleichen Systeme, die eine kontinuierliche zeitliche Orientierung während des Wachens gewährleisten.

Die Anisotropie erlebter Zeit wird nun folgendermaßen erklärt:

a) Es findet zuerst eine Erregungsübertragung statt.

Alle durch Sinnesorgane aufgenommene Information wird durch Nervenzellen der sensorischen Systeme in eine Folge von kurzen Aktionspotentialen übertragen. An den Kontaktstellen (Synapsen) werden die Aktionspotentiale in einen chemischen Transmitterprozeß umgesetzt. Die Transmittermoleküle bewirken an den Receptormolekülen der Membran der nachgeschalteten Nervenzelle eine Leitwertänderung der Membran für kleine Ionen (K^+ , Na^+ , Cl^- , Ca^{++}). Dadurch wird das Membranpotential geändert und die Aktionspotentiale werden weitergeleitet.

b) Speicherung der Information (Gedächtnis):

Annahme: In den "Gedächtnisregionen" des Zentralnervensystems verursacht die Membranerregung eine Änderung der Struktur von Membranmolekülen, die nicht

direkt am Prozeß der Erregungsübertragung beteiligt sind, ihn aber beeinflussen. Diese Membranmoleküle werden "sekundäre" Membranproteine genannt. Es gibt wahrscheinlich Transmittersubstanzen, die nur eine solche Konformationsänderung bewirken, ohne eine direkte Leitwertänderung hervorzurufen. Eine molekulare Konformationsänderung kann auch durch einen kooperativen Prozeß zwischen Rezeptormolekülen und benachbarten Proteinmolekülen stattfinden. Die veränderten sekundären Membranproteine bestimmen die Ladungsverteilung ihrer Umgebung und damit indirekt auch die Erregbarkeit benachbarter Rezeptormoleküle. Dieser Prozeß unterliegt einem Zeitgeber, sodaß zur Zeit T_1 der Proteinkomplex P_1 verändert wird, zur Zeit $T_2=(T_1 + T_k)$ der Proteinkomplex P_2 , usw. Die Zeitverzögerung T_k entspricht der Periodendauer des Zeitgebers. Dieser Prozeß findet in einem großen Netzwerk von Neuronen gleichzeitig statt. Um die Konformationsänderung festzuschreiben, wird die Information der Proteinmoleküle auf das Proteinsynthesystem der Ribonucleinsäuren des endoplasmatischen Reticulums der Nervenzellen übertragen. Von dort wird die Resynthese der Membranproteine kontrolliert.

Es wird postuliert: Die Sequenz der zeitlichen Ereignisse in der Wahrnehmung wird in eine räumlich geordnete Sequenz der Ribonucleinsäuren abgebildet.²⁵

c) Abruf der gespeicherten Information (siehe auch **Abb.II.6**)

Bei einer zeitbezogenen Erinnerung kommt es zu einer Aktivierung des räumlichen Rasters des Proteinkomplexes P_1 , P_2 , usw., wieder unter der Kontrolle eines Zeitgebers, wodurch die zeitliche Sequenz der aufgenommenen Information T_1 , T_2 , ... wiedererscheint.

Für alle zeitbezogenen Ereignisse ist die Rastersequenz richtungsmäßig determiniert, während bei raumbezogenen Gedächtnisprozessen die Richtung des Abrufs auch umgekehrt werden kann.

Es kann zu Irrtümern beim "Abschreiben" einer Wahrnehmungsfolge und dadurch zu Verwechslungen zeitlicher Einzeldetails in der Erinnerung kommen.

²⁵Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S.130

1.4. Äußere Taktgeber

Im Laufe der Evolution haben sich Organismen an vier verschiedene geophysikalische Ereignisse gewöhnt:

die Tagesperiode, die Jahresperiode, die Mondperiode und der Gezeitenrhythmus.

Beim Menschen zeigt sich, daß praktisch alle meßbaren physiologischen und psychologischen Funktionen einem tagesperiodischen Wechsel unterliegen. Beispiele dafür sind:

Die Körpertemperatur erreicht ihr Minimum zwischen 3 und 5 Uhr in der Nacht und ihr Maximum gegen 18 Uhr. Die Amplitude liegt bei 1°C. Auch die Ausscheidungen von Kalium, Natrium oder Calcium durch die Niere unterliegen der Tagesperiode. Im Bereich der Psyche sind Reaktionsschnelligkeit und Merkfähigkeit eine Funktion der Tageszeit. Die höchsten Werte werden am späten Vormittag, die niedrigsten in der Früh und am frühen Nachmittag gemessen. Diese tagesperiodischen Veränderungen sind unabhängig davon feststellbar, ob die Person schläft oder die ganze Zeit wach ist. Sie sind endogene, vom Gehirn aus gesteuerte Mechanismen

Circadiane Uhr

Es stellt sich die Frage, ob die tagesperiodischen Veränderungen abhängig sind vom Tag/Nacht-Wechsel. Um dies zu erforschen hat man Versuchspersonen für einige Wochen bis Monate in Isolationskammern gebracht. Die Kammer muß licht-, schall- und informationsisoliert (kein TV, kein Radio) sein, sodaß die Person keinerlei Kenntnis über die objektive Tageszeit hat. Über geeignete Vorrichtungen werden Ausscheidung, Körpertemperatur, Schlafzeiten gemessen, und die Versuchsperson muß angeben, wie spät es ihrer Meinung nach ist.

Es zeigte sich, daß die physiologischen und psychologischen Funktionen weiterhin einen tagesperiodischen Wechsel zeigen, der jedoch im Durchschnitt 25 Stunden dauert. Die endogene Uhr des Menschen geht sozusagen der geophysikalischen Uhr nach. Es zeigte sich bei diesem Versuch eine starke interindividuelle Varianz. Dies verstärkt die Annahme der Steuerung durch eine endogene Uhr. Würden alle Versuchspersonen einen 25-Stundenrhythmus zeigen, müßte ein im Versuch nicht berücksichtigter Taktgeber vermutet werden. Die endogene Tagesdauer eines Menschen wird circadian genannt - tagesähnlich. Ein besonders bemerkenswertes Beispiel einer individuellen circadianen Uhr: Eine männliche Versuchsperson, die sich für die Zeit von 30 Tagen verpflichtet hatte, hatte nach wenigen Tagen einen 50-stündigen Schlaf-Wach-Rhythmus entwickelt, blieb ohne Unterbrechung durchschnittlich 33 Stunden

wach und schlief 17 Stunden. Als man nach 30 Tagen die Kammertür öffnete wollte er nicht glauben, daß 30 Tage vergangen wären. Für ihn waren erst 15 Tage vergangen.²⁶

Die endogene Natur der Jahresperiodik beim Menschen ist aus experimentaltechnischen Gründen nicht nachzuweisen. In Tierexperimenten mit Staren und Grasmücken konnte allerdings gezeigt werden, daß, auch ohne daß die Tiere Jahreszeitenwechsel erlebten, diese nach einer circa-annualen Uhr ihr Gefieder wechselten und Fortpflanzungsunruhe zeigten.²⁷

Zeitverschiebungen

Die innere zeitliche Ordnung ist während der ersten Tage nach Flügen in andere Zeitzonen gestört. Der Rhythmus der körperlichen Prozesse korreliert nicht mit dem von außen vorgegebenen Rhythmus. Es treten Schlaf- und Verdauungsschwierigkeiten auf. Bekannt sind diese Beschwerden unter dem Namen "Jet Lag".

An einer Fliegenart wurde überprüft, wie sich ein ständiger Belichtungswechsel, in Analogie zur Zeitverschiebung, auf die Lebenszeit auswirkte. Ergebnis: Die "nicht reisenden" Fliegen lebten 125 Tage, die "reisenden" 98 Tage.

²⁶Aschoff, Jürgen, *Die innere Uhr des Menschen*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S.141

²⁷Aschoff, Jürgen, *Die innere Uhr des Menschen*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290, S.138

2. PSYCHISCHE ZEITREISEN

Dies sind Zeitreisen, die das innere psychische Zeitempfinden als Grundlage haben. Sie sind meist verknüpft mit Emotionen bzw. mit einer persönlichen Affinität zu einer bestimmten Situation. Der psychische Zeitbegriff ist am schwierigsten fassbar, da er nur sehr eingeschränkt intersubjektive Gültigkeit besitzt und beispielsweise im Zeitbewußtsein die Begriffe Vergangenheit und Gegenwart verschwimmen.²⁸

Psychische Zeitreisen können, gemäß des "Reiseziels" in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- 1) Psychische Zeitreisen in die Vergangenheit
- 2) Psychische Zeitreisen in die Gegenwart

Wie ich schon in Kapitel Eins die Möglichkeiten für Zeitreisen auf ihren "Reisebereich", die verwendbaren "Reisemittel" und die möglichen "Reiseziele" hin dargestellt habe, möchte ich in dieser Art weiter fortfahren.

2.1. Psychische Zeitreisen in die Vergangenheit

Reisebereich: Die gesamte bewußte und unbewußte Vergangenheit stellen den Reisebereich dar. Hier kann eingewendet werden, daß man sich sehr wohl als alten Menschen denken kann und insofern auch die individuelle Zukunft zum Reisebereich gezählt werden muß. Die individuelle Zukunft ist jedoch nicht im Gehirn gespeichert und trägt daher den Charakter einer Vorstellung oder Phantasie. Aus diesem Grund würde sie den Begriff der psychischen Zeitreise, auf den ich mich beziehen möchte, sprengen. Gedankliche Zukunftsvorstellungen vom eigenen zukünftigen Ich können zwar als Zeitreisen betrachtet werden, fallen aber unter den Begriff *fantastische Zeitreisen*, der weiter unten behandelt wird.

Reiseziele: Psychische Zeitreiseziele sind Erinnerungen, Erlebnisse, allgemein Wahrnehmungen aus der individuellen Vergangenheit, die im Gehirn gespeichert sind und bewußt oder unbewußt vorliegen. Die Bewußtseinsinhalte treten meist nicht in ihrer ursprünglich wahrgenommenen Form auf sondern sind durch Verarbeitungsprozesse abgeändert worden.

²⁸Vgl. Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290

Reisemittel: Reisemittel für diese Reisen sind Erinnerungen, Träume, Hypnose, Gehirnerschütterung und verschiedene Konzentrationsmethoden (Bsp. Rebirthing).

Träume

Bis zur Jahrhundertwende hat die Medizin Träume nicht als naturwissenschaftlich interessant erachtet. Träume kannte zwar jede/r, aber sie stellten etwas Ungreifbares, nicht Meßbares dar und wurden daher eher in den Bereich der Metaphysik gezählt. Als Sigmund Freud in seinen psychoanalytischen Sitzungen feststellt, daß Träume versteckte Wünsche, Kindheitserlebnisse, Traumata in verschlüsselter Form wiedergaben, stieg das medizinische Interesse. Seither gelten Träume auch naturwissenschaftlich als Möglichkeit, Unbewußtes nach außen zu transportieren, bzw. durch Träume etwas über die Psyche einer Person zu erfahren.

Hypnose

Hypnose ist eine Methode der klinischen Psychologie, den/die Patienten/in in einen hohen Entspannungszustand zu versetzen und dadurch Zugang zu verdrängten Bewußtseinsinhalten zu schaffen. Heute wird Hypnose vor allem in der Schmerztherapie angewendet, um dem/der Patienten/in eine gewisse Kontrolle über die Stärke bzw. Dauer von Schmerzen zu ermöglichen. In erster Linie besteht diese Kontrolle in der Fähigkeit, den Schmerz woanders hinzulenken, sich also vom Schmerz ablenken zu können.²⁹

Eine Methode, um bei der betroffenen Person andere Denkmuster zugänglich zu machen, ist die Konfusionstechnik der Hypnose. Sie beruht auf folgenden Annahmen: Verhaltensmuster werden von unbewußten Kognitionen gesteuert bzw. begrenzt. Unerwartete Verhaltensmuster erzeugen bei dem/der Patienten/in Unsicherheit. Dies veranlaßt den Organismus, nach einer Orientierung zu suchen. Die Unsicherheit veranlaßt den/die Patienten/in, die Situation zu klären. Wenn die interne Suche nach passenden Orientierungsmöglichkeiten zu keinem Ergebnis führt, werden externe Hinweise aufgegriffen. An diesem Punkt hat der/die Therapeut/in die Möglichkeit, durch Vorgabe von Hinweisen die Orientierung des Patienten in eine bestimmte Richtung zu lenken.

Eine Art der Konfusionstechnik ist die Zeitkonfusion, die mir im Zusammenhang mit dem Thema Zeitreisen als erwähnenswert erscheint. Sie wird angewendet, um die Dauer von Schmerzen zu relativieren. Ähnlich folgender Konfusionsformel wird der/die Patient/in in zeitliche Verwirrung versetzt:

²⁹Vgl. Revenstorf, Dirk (Hrsg.), *Klinische Hypnose*, Berlin Heidelberg: Springer 1993

"Sie wissen nicht richtig, ob es Ihnen in einer Stunde besser geht oder in zwei Tagen ... oder ob es zwei erträgliche Tage in einer Stunde sein werden ... Sie wissen nicht, ob es Ihnen besser gehen wird in einer Stunde, nach einer Stunde Erholung ... oder in einer Stunde, bevor sie eine Stunde der Erleichterung erleben ... die einer Stunde der Linderung folgt ... eine Stunde der Linderung, die verstreicht ... bis Sie zwei volle Tage der Erleichterung erleben ... jetzt. Und dann können Sie feststellen, daß die Erleichterung, die Sie jetzt verspüren, morgen noch dasein wird ... und morgen wird Ihnen heute in angenehmer Erinnerung sein ... angenehmer als gestern."

Gehirnerschütterung

Von Unfallopfern mit Kopfverletzungen bzw. Gehirnerschütterungen wird berichtet, daß sie beispielsweise nach dem Sturz eine Bilderfolge aus ihrer persönlichen Vergangenheit, von Kindheitserlebnissen bis in die jüngste Vergangenheit, vor Augen hatten.

Konzentrationsmethoden

Die Konzentrationsmethoden werden in der Psychotherapie verwendet, um verdrängte Erlebnisse und Traumata aus der Kindheit wieder in Erinnerung zu rufen. Dabei wird die Person durch Konzentration z.B auf die Atmung oder auf bestimmte Silbenfolgen in einen mental entspannten Zustand gebracht. Sie ist sozusagen abgelenkt von ihrer eigenen Aufmerksamkeit auf Verdrängung bestimmter Bewußtseinsinhalte. Durch diesen mental offeneren Zustand sind bestimmte Bewußtseinsinhalte wieder zugänglich und können therapeutisch aufgearbeitet werden.

2.2. Psychische Zeitreisen in die Zukunft

Hierzu zählen Zeiterlebnisse aufgrund von längerer Abwesenheit von der Realität. Darunter ist zu verstehen, daß das Wachzeitbewußtsein für eine längeren Zeitraum fehlt. Diese Abwesenheit ist verursacht durch Schlaf, durch Bewußtlosigkeit und durch Abschirmung von der Außenwelt über mehrere Tage. In Bewußtlosigkeit fehlt das Zeitempfinden nahezu völlig, im Schlaf und unter Einfluß von Drogen ändert sich das Zeitempfinden. Das Gefühl, in die Zukunft gereist zu sein, stellt sich dann ein, wenn die Person aufwacht bzw. nicht mehr unter Drogeneinfluß steht, und sich wieder an der äußeren Zeit orientiert (z.B. Blick auf die Uhr, Feststellen des Datums). Denn es ist Zeit vergangen, von der die Person nichts weiß, die sie nicht erlebt hat. Ihr bewußtes Zeitempfinden knüpft an dem Punkt an, an dem es aufgehört hat. Zentral für diese Art von Zeitreise ist hier, daß sich die Empfindung der Zeitdauer ändert.

Reisebereich: Da diese Zeiterlebnisse durch Änderung des Zeitempfindens, genauer des Empfindens von Dauer, hervorgerufen werden und die Feststellung einer Zeitreise

aufgrund von Uhrenvergleich stattfindet, kann man keinen Reisebereich angeben. Die Person befindet sich genaugenommen in ihrer Gegenwart, die nur verschieden lang dauert. Bei haluzinogen wirkenden Drogen werden auch traumartige Erlebnisse beobachtet. Diesbezüglich möchte ich auf den Abschnitt *Träume* verweisen.

Reiseziele: Aufgrund der undefinierbarkeit des Reisebereichs sind auch keine Reiseziele angebar.

Reisemittel: Diese sind Schlaf, Bewußtlosigkeit, Isolation und Drogen.

Schlaf

Die durch Schlaf hervorgerufenen Zeiterlebnisse treten auf, wenn Personen nach schweren Operationen für mehrere Tage mittels Medikamenten in Tiefschlaf versetzt werden. Der Grund für die zeitliche Disorientierung nach ungewöhnlich langen Schlaf- oder Deprivationsphasen liegt darin, daß das Zeitempfinden sowohl im Schlaf als auch im Deprivationszustand ein anderes ist als im Wachzustand. Wenn die Person aufwacht, ist Zeit vergangen, von der sie nichts weiß, die sie nicht bewußt erlebt hat. Das bewußte Erleben knüpft an jene Zeit an, die die Person zuletzt bewußt erlebt hat. Da unter normalen Umständen diese Zeiten nie länger als eine gewöhnliche Schlafphase voneinander entfernt liegen, wird die Dauer des künstlich lang gehaltenen Schlafes unterschätzt, und die Person schätzt die vergangene Zeit auf mehrere Stunden, niemals jedoch auf mehrere Tage. Daß die Menschen nicht täglich nach dem Aufwachen völlig disorientiert sind und meinen, in die Zukunft gereist zu sein, liegt daran, daß die meisten Menschen eine Regelmäßigkeit in ihren Schlaf- und Wachphasen aufweisen. Sie sind daran gewöhnt, daß die Zeit während einer Schlafphase "anders" vergeht. Sie wissen aufgrund der Feststellung der Uhrzeit, wieviel Stunden sie geschlafen haben. Das Gefühl zeitlicher Disorientierung zeigt sich kurz nach dem Aufwachen, legt sich aber schnell. Außerdem kann man davon ausgehen, daß alle Menschen bezüglich Schlafverhalten insofern ähnlich sind, als sie einmal pro Tag eine längere Schlafphase haben. Daß einmal pro Tag geschlafen wird, ist durchaus nicht selbstverständlich, ergibt sich aber aus der Orientierung am Erdentag, und mit diesem hängen weitestgehend alle sozialen und kulturellen Vorgänge wie Arbeitszeiten, TV-Programme etc. zusammen.

Isolation

Hält man eine Person fern von jeglichem Kontakt mit der Außenwelt und läßt sie die vergangene Zeit schätzen, so weicht die geschätzte Dauer von der objektiv durch eine Uhr gemessenen Dauer ab. Dieser Effekt kann bei den meisten Organismen beobachtet

werden und beruht auf der individuellen circadianen Uhr (Die circadiane Uhr wurde weiter oben schon behandelt.).

Organismen haben, um sich nicht ständig neu orientieren zu müssen, ein inneres Abbild von Räumen und "Zeiträumen"³⁰. So wird die endogene Struktur eines Organismus von einer inneren "Tages-Uhr" gesteuert. Auch unter konstanten Bedingungen, also ohne Licht - Dunkel - Wechsel schwingt der Tagesrhythmus mit seiner eigenen Periode weiter, die aber von 24 Stunden abweichen kann und daher *circadian* (ungefähr ein Tag) genannt wird. Beim Menschen dauert ein circadianer Tag im Schnitt 25 Stunden. Daraus folgt, daß, während ein Mensch unter Versuchsbedingungen 24 circadiane Tage erlebt, 25 Datumstage vergehen. Er würde nach Ende des Versuchs meinen, einen Tag weiter zu sein, als seine innere Uhr anzeigt. Dies könnte als *Zeitreise in die Zukunft* bezeichnet werden.

Dieses Phänomen wurde auch außerhalb psychologischer Versuchsbedingungen beobachtet, z.B. bei verschütteten Personen, die tagelang von der Außenwelt abgeschnitten sind.

Schlaf und Bewußtlosigkeit als Methoden zur Zeitreise finden sich auch in der Roman- und Märchenliteratur. Dies wird als "sleeping into the future"³¹ bezeichnet. Der hundertjährige Schlaf des Dornröschens ist ein Beispiel dafür. Um eine Parallele zu physikalischen Zeitreisen zu ziehen: Dornröschen könnte eine Person sein, die in der Nähe eines Schwarzen Loches solange verweilt, bis auf der Erde hundert Jahre vergangen sind, und dann zurückkommt. Da für das Dornröschen kaum Zeit vergangen ist, ist es jung und schön wie zuvor. Thema der Zeitreise durch Schlaf findet sich besonders in Zeitreisegeschichten für junge Frauen.³² Die Heldinnen dieser Bücher schlafen ein oder fallen in Ohnmacht und reisen dadurch in Vergangenheit oder Zukunft. Im Film "Peggy Sue got married" z.B. fällt Peggy Sue (dargestellt von Kathleen Turner) während eines Klassentreffens in Ohnmacht und findet sich auf ihrem Highschool-Abschlußball vor mehreren Jahren wieder. Diese Fiktionen haben zwar psychisches Erleben zum Thema, gehören aber nicht in die Kategorie der psychischen Zeitreisen, weil sie nicht wissenschaftlich-psychologisch begründbar sind.

³⁰Roenneberg, Till, *Zeiträume, innere Uhren und Zeitgeber*, Artikel in: *du, die Zeitschrift der Kultur*, Heft Nr. 10, Oktober 1997, Zürich: TA-Media AG

³¹Nahin, Paul J., *Time Machines. Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, New York: AIP 1993, S.6

³²Nahin, Paul J., *Time Machines. Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, New York: AIP 1993, S.9

Daher zähle ich sie zur Kategorie fiktiver Zeitreisen und habe sie hier nur aufgrund des Zusammenhangs mit Schlaf erwähnt.

Die Beispiele für psychische Zeitreisen in die Zukunft können mit dem Zwillingsparadoxon verglichen werden. Dies gilt als ein Beispiel für eine physikalische Zeitreise in die Zukunft. Der reisende Zwilling kommt in die, nach seiner Ansicht, Zukunft der Erde zurück, selbst ist er jedoch immer in seiner Gegenwart. Die beiden Zeitdauern sind unterschiedlich lang. Wenn der Zwilling sagt: "Ich bin in die Zukunft gereist.", bezieht er sich auf das Datum, das auf der Erde gilt, das mehrere Jahre nach seinem Datum liegt. Wenn eine aus der Bewußtlosigkeit aufwachende Person sagt: "Ich bin in die Zukunft gereist.", bezieht sie sich auf das Datum, das die Krankenhausuhr anzeigt. Nach diesem Datum sind mehr Tage vergangen als die Person nach ihrem inneren Zeitempfinden geschätzt hätte. Der Unterschied zwischen den Beispielen liegt darin, daß der Zwilling körperlich auch jung bleibt während die bewußtlose Person auch in der Bewußtlosigkeit altert. Biologische Prozesse wie Alterung sind physikalisch-chemische Prozesse, aufgrunddessen gilt hier die physikalische Zeit, wie sie auch dem Zwillingsparadoxon zugrundeliegt. Beim bewußtlosen Menschen schreitet der körperliche Alterungsprozeß quasi mit der Krankenhausuhr weiterfort. Seinem Eindruck von Zeitreise liegt sein inneres Zeitempfinden zugrunde.

Drogen

Unter Drogeneinfluß ändert sich das Zeitempfinden. Dokumentationen dazu gibt es aus Experimenten mit LSD, Amphetaminen, Marihuana und MDMA (auch bekannt unter dem Namen "Ecstasy"). Vor allem LSD und MDMA werden auch in der Psychotherapie eingesetzt. Laut Therapeut/inn/en bewirken diese Substanzen einen mentalen Entspannungszustand, sodaß das Sich-Erinnern erleichtert wird.³³

In der Literatur finden sich Zeiterlebnisse unter Drogeneinfluß z.B. im 1822 entstandenen Roman "Confessions of an English Opium-Eater" von Thomas De Quincey. Darin schreibt der Autor von seiner Erfahrung unter Opiumeinfluß: "I sometimes seemed to have lived for 70 to 100 years in a night."³⁴

³³Hess, Peter, *Zur Pharmakologie von MDMA*, in: Weigle, Constanze, Rippchen, Ronald (Hrsg/in.), *MDMA. Die psychoaktive Substanz für Therapie, Ritual und Rekreation*, 1992: Der Grüne Zweig 103

³⁴Nahin, Paul J., *Time Machines. Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, New York: AIP 1993, S.7

Virtuelle Realität

"Virtuelle Realität", auch "Cyberspace" genannt, ist im Gegensatz zu "realer Realität" eine Wirklichkeit, die nicht die natürlich-physikalische äußere Wirklichkeit ist, sondern von Computerprogrammen geschaffen wird. Es wird dabei auf möglichst realistische Darstellung großer Wert gelegt. Der Realitätsnähe von Situationen sind dabei nach dem Prinzip von Turing keine Grenzen gesetzt. Das Prinzip besagt, daß alles, was physisch present ist, durch ein Programm erzeugt werden kann³⁵. Die Computerprogramme liefern verschiedene Situationen in dreidimensionaler Darstellung, in denen die Person interaktiv agieren kann. So z.B. kann sie das Alte Rom dreidimensional erleben. Um die virtuelle Realität möglichst authentisch zu erleben, werden die Bilder auf Brillen übertragen, die sich die Person aufsetzt. Diese Brillen sind nichts anderes als Computerbildschirme. Da für jedes Auge entsprechend der natürlichen Sichtweise leicht voneinander abweichende Bilder geliefert werden, und die Person über den Brillenrand nicht hinaussieht, entsteht ein besonders realistischer Eindruck der Situation. Außerdem kann entsprechend der Kopfbewegungen der Blickwinkel verändert werden. Nicht nur das Sehvermögen, sondern auch Spür- und Tastsinn können mit entsprechenden Geräten, die die Informationen entsprechend umsetzen, virtuell angesprochen werden. Virtuelle Realität tritt aber auch in herkömmlichen Chatgroups im Internet auf, in denen Personen sich selber darstellen, wie sie wollen. Sie schaffen damit sozusagen ein virtuelles Ich, eine neue Identität ihrer selbst. Im weitesten Sinn kann auch das Fernsehen als virtuelle Realität verstanden werden, da Ereignisse, die zeitlich und örtlich vollkommen verschieden voneinander stattfinden, "vergleichzeitig" werden (Vgl. Nachrichtenberichterstattung). Götz Großklaus fragt: "Kehren wir mit der Medienzeit zur neuronalen Innenzeit, zum komplexen Präsens unseres Gehirns zurück? Gleicht sich der Entwurf der sozialen Zeit den Strukturen der neuronalen Zeit an?" Damit spricht er "die technologische Entwicklung der Gegenwart zum alleinigen Schauplatz aller Zeiten" an.³⁶

Zeitreisen durch virtuelle Realität sind meiner Ansicht nach psychische Zeitreisen, da durch bestimmte Situationen ein bestimmtes psychisches Zeitempfinden ausgelöst wird³⁷. Da virtuelle Darstellungen nur insofern der Realität entsprechen müssen, um "glaubhaft realistisch" zu sein, muß auf den physikalischen Zeitbegriff nicht geachtet werden.

³⁵Zitiert in: Deutsch, David, *La trama della realtà*, Torino: Einaudi 1997, S.264

³⁶Großklaus, Götz, *Medienzeit*, zitiert in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit?. Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990, S.43

³⁷Vgl. Deutsch, David, *La trama della realtà*, Torino: Einaudi 1997, S.265

Biochips und der digitale Mensch

Biochips sind elektronische Chips, deren Funktionsweise körpereigenen elektrischen Informationsübertragungen gleicht. In der Medizin können Biochips als Regulatoren bei Stoffwechsel- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen eingesetzt werden, die auf Fehlfunktionen des Organismus zurückzuführen sind. Insofern sind Biochips die Hoffnungsträger der medizinischen Zukunft. Der Funktionsbereich von Biochips kann gedanklich beliebig erweitert werden, bis dahin, daß auch Bewußtseinsinhalte und die gesamte Wahrnehmung eines Menschen durch sie gesteuert bzw. gänzlich ersetzt werden. Dadurch wird jedoch die Frage nach der Identität eines Menschen aufgeworfen.

Der Begriff "digitaler Mensch" bezeichnet den vollständigen Ersatz eines Menschen durch Biochips, der seinen Körper gerade zur Erhaltung der Lebensfunktionen braucht, bzw. wird auch dieser vollkommen ersetzt, sodaß die Wahrnehmung des Körpers durch den Chip gespeichert ist. Es stellt sich die Frage, ob die Komplexität eines Bewußtseins digitalisierbar ist. Aufgrund all dieser vorstellbaren Möglichkeiten, die Biochips bieten könnten, entwickelte sich bereits eine heftige Diskussion über ethische Probleme, die durch den Einsatz von Biochips entsteht.

Durch die Möglichkeit des Einsetzens beliebiger Bewußtseinsinhalten wäre es nicht mehr notwendig, etwas zu erleben, um es zu wissen. Insofern könnten Biochips eine Möglichkeit darstellen, jegliche Art von Reisen zu unternehmen. So könnte sich eine Person nach Aktivieren eines "Reisechips" an einem karibischen Strand wiederfinden, weil der Chip dem Gehirn die Daten zu dieser Wahrnehmung überträgt. Genausogut könnte sich die Person in das 15. Jahrhundert zurückversetzen, was eine Zeitreise darstellen würde. Wie realistisch und perfekt diese Wahrnehmungen wären, würde letztendlich vom Speicherplatz abhängen. Zeitreisen mit Biochips würden meiner Meinung nach psychische Zeitreisen darstellen, rein physikalisch wäre keine relative Änderung der Zeit beobachtbar. Das Gefühl der Zeitreise würde durch Empfindungen und Wahrnehmungen ausgelöst werden, und nicht durch einen objektiven physikalischen Uhrenvergleich.

Bewußtseinsweiterung durch Biochips findet sich auch als Thema in der Romanliteratur wieder. Als Beispiel sei hier "Neuromancer"³⁸ von William Gibson angeführt: Die menschlichen Gehirne sind direkt mit elektronischen Datenverarbeitungssystemen verbunden. Dadurch steht dem Bewußtsein der gesamte "Datenkosmos" zur Verfügung. Die Menschen haben das Gefühl von Allwissenheit und Allgegenwart, ihr Lebensraum ist der "Cyberspace".

³⁸Gibson, William, *Neuromancer*, München: Heyne 1997, Nr. 1290

KAPITEL DREI

DIE ZEIT IN DER PHYSIK

"Natur ist für den Menschen, was immer er mit diesem Namen bezeichnen möchte. Er wird die Natur den Namen entsprechend wahrnehmen, die er ihr gibt, und der Beziehung und Perspektive entsprechend, die er wählt."

Ernest Schachtel, *Metamorphosis*,
New York 1959

Dieses Kapitel behandelt den physikalischen Zeitbegriff. Besondere Aufmerksamkeit wird auf die Veränderung, die der physikalische Zeitbegriff in diesem Jahrhundert erfuhr, gelegt. Die zentralen Fragen dieses Kapitels können folgendermaßen formuliert werden:

Worin ist die Notwendigkeit einer objektiven, allgemeingültigen Zeit begründet?

In diesem Zusammenhang werden die historische Entwicklung des objektiven Zeitbegriffs sowie Methoden der Zeitmessung behandelt.

Welche Veränderung erfuhr der Zeitbegriff durch die Relativitätstheorie?

Aufgrund welcher Argumente waren diese Veränderungen notwendig?

Hierbei wird auf das Problem der Gleichzeitigkeit, auf die Relativität der Zeit, die Verknüpfung von Raum und Zeit zur vereinheitlichten Raumzeit und die Krümmung der Raumzeit eingegangen.

Welche Möglichkeiten gibt es, die Raum-Zeit darzustellen bzw. vorstellbar zu machen?

Da der Raum "begreifbarer", im wahrsten Sinne des Wortes, ist als die Zeit und die Verbindung beider zu einer einheitlichen Raumzeit schwierig vorstellbar ist, werden geometrische Modelle zur Visualisierung der Raumzeit dargestellt.

Worin unterscheidet sich der Zeitbegriff der Quantentheorie von jenem der klassischen Physik?

Der Zeitbegriff der Quantenmechanik unterscheidet sich grundlegend von jenem der klassischen Physik. So ist es nicht möglich, zu einem bestimmten Zeitpunkt eine genaue Zustandsbestimmung eines quantenmechanischen Systems durchzuführen. Dieser Abschnitt dient dem Vergleich des Zeitbegriffs von klassischer und Quantenphysik.

Wie wird die Anisotropie der Zeit physikalisch erklärt?

Hier wird auf die Gerichtetheit der Zeit eingegangen und es werden verschiedene Erklärungsansätze für die Existenz eines physikalischen Zeitpfeils kurz dargestellt.

1. DER OBJEKTIVE ZEITBEGRIFF

1.1. Historische Entwicklung

Als Grundlage für den ganzen Entwicklungsweg des Zeitbestimmens und der Zeitmaßstäbe sieht Norbert Elias "... die Fähigkeit des Menschen, verschiedene Sequenzen kontinuierlicher Veränderungen miteinander zu verknüpfen, wobei eine Sequenz als Maßstab für die andere gilt."¹

Für das Bewußtsein eines Menschen stellt der Begriff der Zeit quasi eine Form dar, in die Ereignisse eingereiht werden (vgl. Kapitel Zwei). Würde das Gebiet des eigenen Bewußtseins nicht verlassen werden, gäbe es keinen Anlaß, eine andere "Form" zum Ordnen von Ereignissen zu suchen. Da uns aber auch Ereignisse im Bewußtsein anderer Menschen und vor allem auch äußere Ereignisse unbelebter Materie interessieren, müssen wir nach einer Form suchen, die alle diese Ereignisse zu ordnen imstande ist: die objektive Zeit.

Henri Poincaré schreibt:

*"... der psychologische Zeitbegriff ist uns gegeben, und wir wollen den wissenschaftlichen und physikalischen Zeitbegriff schaffen."*²

Daß schließlich Newton die Prinzipien vom absoluten Raum und der absoluten Zeit in die Wissenschaft einführen konnte, bedurfte es allerdings der Arbeiten und Erkenntnisse von Kopernikus, Kepler, Galilei und von vielen anderen unbekanntem Naturwissenschaftler/innen. Sie bereiteten das Weltbild vor, in das die Newtonsche Physik passen würde.³

Nikolaus Kopernikus

Zu Zeiten von Kopernikus, der 1473 in der polnischen Stadt Thorn geboren wurde, vertrat die römische Kirche offiziell den Glauben, die Erde stehe fest im Zentrum des Universums. Nikolaus Kopernikus hatte die Kühnheit, eine Theorie aufzustellen, nach der nicht die Erde sondern die Sonne im Mittelpunkt des Alls ruht und die Planeten sich um sie in Kreisbahnen bewegen. Man versuche, alle Kenntnisse aus Physik beiseite zu lassen und stelle sich das Universum vor. Es ist, nicht nur aus religiösen

¹Elias, Norbert, *Über die Zeit*, Frankfurt am Main: Suhrkamp 1997, S.26

²Poincaré, Henri, *Das Maß der Zeit*, in: Aichelburg, Peter C. (Hrsg.), *Zeit im Wandel der Zeit*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1988

³Vgl. Biagioli, Mario, *Galilei, der Höfling. Entdeckungen und Etikette: Vom Aufstieg der neuen Wissenschaft*, Frankfurt am Main: Fischer 1999

Gründen, viel naheliegender und einsichtiger, die Erde als ruhend anzunehmen. Lebewesen und Gegenstände bewegen sich auf ihr oder fallen auf sie zu, die Sonne geht auf und unter - bewegt sind die anderen Dinge, die Erde aber ruht. Die religiösen Gründe waren jene, daß der Mensch als Ebenbild Gottes den zentralen Platz des Universum einnehme. Wie kam Kopernikus zu seiner Theorie? Zweifelsohne waren Gründe der Einfachheit - ein nach wie vor entscheidendes Argument für eine Theorie - dafür ausschlaggebend, die heliozentrische Theorie der geozentrischen vorzuziehen. So konnte die für alle Planeten übereinstimmende Umlaufzeit von einem Jahr - aus ptolemäischer Sicht ein unerklärbarer Zufall - mit dem jährlichen Erdumlauf um die Sonne erklärt werden. Außerdem waren mit dem kopernikanischen System die relativen Entfernungen der Planeten von der Sonne berechenbar.

Johannes Kepler

1571 wurde Johannes Kepler geboren. Er war sowohl Mystiker als auch Wissenschaftler und suchte, dem Geist der Pythagoräischen Philosophie folgend, nach Schönheit und Harmonie im Universum. Auch in seinen drei Gesetzen zur Planetenbewegung findet sich antikes Gedankengut wieder, nämlich die Kegelschnitte. Diese wurden vom Philosophen und Mathematiker Apollonius im 3. Jhdt. v.Chr. untersucht und in Kreis, Ellipse, Parabel und Hyperbel unterschieden. Durch Kepler fanden diese rein mathematischen Erkenntnisse eine Anwendung in der Astronomie. Die Planetenbahnen konnten nunmehr mathematisch beschrieben werden.

Galileo Galilei

Galileo Galilei wurde 1564 in Pisa geboren, war also ein Zeitgenosse Keplers, aber die beiden begegneten sich nie persönlich. Galilei war, bestärkt durch die Beobachtung der um den Jupiter kreisenden Jupitermonde, davon überzeugt, daß sich die Erde nach dem gleichen Prinzip um die Sonne bewegt⁴ und daher ein Anhänger des kopernikanischen Systems. Aus diesem Grund wurde er vor die Inquisition zitiert und mußte seine Überzeugung widerrufen.⁵ Galileis eigentlich revolutionäres Werk betrifft die Bewegung von Gegenständen auf der Erde. Damit legte er das Fundament zur Mechanik. In seinem Werk *Discorsi dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (*Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige*,

⁴Vgl. Galilei, Galileo, *Dialogo dei Massimi Sistemi*, a cura di Ferdinando Flora, Mondadori 1996

⁵Siehe dazu den Originalwortlaut des Widerrufs in: Geymonat, Ludovico, *Galileo Galilei*, Torino: Einaudi 1969, S.190

*die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*⁶⁾ berichtet Galilei von seinen berühmten Experimenten zur Fallbewegung von Körpern. Galilei war der Meinung, man hätte bisher immer die falschen Fragen gestellt. So sei es müßig darüber nachzudenken, wieso ein Körper sich mit unveränderter Geschwindigkeit gleichmäßig bewege. Man sollte nur dann nach einer Erklärung suchen, wenn der Körper dies nicht mehr täte sondern langsamer würde und stehenbliebe. Das war die grundlegende Überlegung zu einem Trägheitsgesetz.

Isaac Newton

Isaac Newton wurde 1643, ein Jahr nach Galileis Tod, geboren. Seine Untersuchungen knüpften an jene von Galilei an, nur war Galilei noch "erdverbundener", seine Versuche zur Fallbewegung fanden vor dem Hintergrund einer ruhenden Erde als Bezugssystem statt. Newton wollte kosmisch gültige Gesetze finden.

Man stelle sich vor, man stünde irgendwo im All und blicke auf die Erde. Wie kann der Vorstellung von Ruhe und geradliniger Bewegung ein kosmischer Sinn gegeben werden, wenn wir die Erde nicht mehr als ruhendes Bezugssystem betrachten können? Sind die Begriffe von Ruhe und geradliniger Bewegung dann nicht leere Begriffe? Newton wollte eine Lösung für dieses Problem - und fand sie. Die Lösung war der *absolute Raum* und die *absolute Zeit*.

1687 erhob Isaac Newton in seinen *Mathematischen Prinzipien der Naturlehre (Philosophiae naturalis principia mathematica)* das Prinzip vom absoluten Raum und der absoluten Zeit⁷⁾:

"Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich."

"Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig, und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird auch mit dem Namen "Dauer" belegt."

Unter dieser Annahme formulierte er die in die Geschichte der Physik eingehenden drei Bewegungsgesetze:

⁶⁾Galilei, Galileo, *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*, Darmstadt 1973

⁷⁾Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997, S.47

1. *Trägheitssatz*: Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn keine Kräfte auf ihn wirken.
2. *Kraftgesetz*: Eine auf einen Körper wirkende Kraft versetzt diesen in eine beschleunigte Bewegung, und zwar umso stärker, je kleiner die Masse des Körpers ist.
3. *Wechselwirkungsgesetz*: Ein Körper, der eine Kraft auf einen anderen Körper ausübt, erfährt seinerseits durch diesen zweiten Körper eine Kraft, die mit gleicher Stärke in die umgekehrte Richtung wirkt. (Kraft = Gegenkraft)

Weiters bewies Newton in der *Principia*, daß die Gravitationskraft mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Dies leitete er nicht nur für die Ellipsenbahnen der Planeten ab, sondern für alle Kegelschnitte: Wenn die Abnahme der Gravitationskraft umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung ist, muß die Planetenbahn ein Kegelschnitt mit der Sonne im Brennpunkt sein. Eine Erklärung für die Abnahme der Gravitationskraft mit dem Quadrat der Entfernung konnte er jedoch nicht finden.

Auch Galileis Überlegungen zu träger und schwerer Masse wurden von Newton weitergeführt. Galilei unterschied zwischen *träger Masse* - sie ist ein Maß für den Widerstand gegen Beschleunigung - und *schwerer Masse*, die sich auf die Gravitation, die Schwere eines Körpers, bezieht. Newton ersetzte diese beiden Massen durch eine einzige Größe, die er einfach *Masse* nannte.

Aus seinen Gesetzen konnte Newton eine Folgerung ableiten, die er jedoch als störend empfand, da sie der Idee eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit widersprach: das Newtonsche Relativitätsprinzip:

*"Körper, welche in einem gegebenen Raum eingeschlossen sind, haben dieselbe Bewegung unter sich; dieser Raum mag ruhen oder sich gleichförmig geradlinig, nicht aber im Kreise fortbewegen."*⁸

Einerseits hatte Newton den absoluten Raum eingeführt, um Ruhe und Bewegung scharf unterscheiden zu können, andererseits ergibt sich aus seinen Gesetzen eine Äquivalenz dieser beiden Zustände, die physikalischen Gesetze sind in beiden gleichermaßen gültig. Ruhe und gleichförmige Bewegung sind in der Praxis nicht absolut sondern *r e l a t i v*!

Um die Widersprüchlichkeit von Relativität von Ruhe und gleichförmiger Bewegung einerseits und dem Prinzip des absoluten Raumes andererseits aufzulösen, fügte

⁸Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997, S.55

Newton seinen *Principia* ein Postulat hinzu: *Der Mittelpunkt des Weltalls befindet sich in Ruhe*⁹. Auf der Suche nach einem absolut ruhenden Punkt im All machte er die Feststellung, daß zwar Erde und Sonne nicht in Frage kommen, da sie sich beschleunigt bewegen, ihr gemeinsamer Schwerpunkt hingegen war unbeschleunigt. Mit Hinweis auf das Postulat konnte Newton nun behaupten, daß dieser in Ruhe sei. Damit war ein Fixpunkt im Newtonschen System geschaffen, absolute Ruhe und absolute Bewegung erhielten überall im Raum Gültigkeit.

1.2. Zeitmessung, Uhren

Eine objektive Zeit ist notwendig, um überhaupt Naturwissenschaft betreiben zu können, um den Ablauf von Vorgängen meßbar zu machen. Für die Newtonsche Physik war und ist es unerläßlich, die Zeit bestimmen zu können, um so zwischen gleich-förmiger und beschleunigter Bewegung unterscheiden zu können. Bei gleich-förmiger Bewegung werden gleiche Wege in gleichen Zeiten zurückgelegt. Ist die Zeitmessung nicht entsprechend genau, ergibt sich eine beschleunigte Bewegung, wo eigentlich keine ist.

Das Problem der Zeitmetrik und allgemein der Diskrepanz von subjektiver Empfindung und objektiver Physik beschäftigte auch Ernst Mach. Zur Auswahl eines Zeitmaßes meinte er, daß, wenn durch die Naturgesetze ein Vorgang besonders ausgezeichnet wäre, man diesen zur Definition einer "absoluten" Zeit verwenden könnte. Da aber kein solcher ausgezeichnete Vorgang existiert, muß die Auswahl eines Zeitmaßes nach anderen Kriterien erfolgen. Mach schlug vor, das subjektive Zeitempfinden, die "physiologische Zeit" dazu heranzuziehen¹⁰. Mach war der Auffassung, daß die ausgewählte objektive Zeitskala der subjektiven Empfindung der Zeitdauer entsprechen sollte. Ein Beispiel dafür wäre die Rotation der Erde als Zeitmaß. Mach verglich die Schwierigkeit, eine Zeitskala zu finden, mit jener der Temperaturmetrik, da auch hier keine Temperaturskala objektiv ausgezeichnet ist¹¹.

⁹Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997; S.56

¹⁰Mach, Ernst, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, zitiert in: Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften*, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wissenschaftsverlag 1989, S.21

¹¹Mach, Ernst, *Die Prinzipien der Wärmelehre*, zitiert in: Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften*, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wissenschaftsverlag 1989

Messung von zeitlicher Dauer

Gefragt ist also die Messung der Dauer eines Vorganges. Da es keine direkte Empfindung für die Gleichheit zweier Zeiträume gibt, muß man eine Möglichkeit zur Bestimmung der Quantität von Zeit, der Zeitdauer, finden, eine *Uhr*. Hierbei kann man grundsätzlich zwei Arten von Uhren unterscheiden. Bei der einen Uhrenart wird die Zeit durch die Anzahl von sich regelmäßig wiederholenden, also periodischen Ereignissen gemessen, wobei die Zeiteinheit eine Periodendauer ist. Bei der anderen Uhrenart wird eine einmalig stattfindende gleichmäßige Veränderung eines Zustandes, also ein monotoner Vorgang, als Maß für die Zeit herangezogen. Gleichförmige Bewegungen kann man als Uhren verwenden, indem man aus der bereits vorhandenen Längemetrik eine Zeitmetrik konstruiert.¹²

Als Galileo Galilei seine Experimente zum Freien Fall durchführte, maß er die Zeitdauer mit beiden Meßmethoden: Zuerst maß er die Zeit mit seinem Puls¹³. Da jedoch verschiedene Menschen verschiedene Pulsfrequenzen haben und selbst bei einem Menschen der Pulsschlag am Morgen sich von dem am Abend unterscheidet, wird man bei verschiedenen Messungen verschiedene Ergebnisse bekommen. (Ich möchte diese Methode nicht als "ungenau" bezeichnen, weil der wissenschaftliche Begriff "genau" ja nur im Vergleich mit einer anderen Uhr einen Sinn hat. Es stellt sich die Frage, woran der Grad der Genauigkeit gemessen wird.) Mit dieser Methode zeigen die Experimente bei Wiederholung nicht die selben Ergebnisse. Infolgedessen ist es nicht möglich, Gesetzmäßigkeiten zu finden bzw. physikalische Gesetze zu formulieren. Das ist jedoch das Ziel einer Naturwissenschaft. Daher erscheint es mir passend, diese Methode zu beschreiben als "nicht geeignet zum Zweck der Formulierung von physikalischen Gesetzen."

In diesem Zusammenhang sei nochmals Henri Poincaré zitiert:

*"Die Zeit muß so definiert werden, daß die Gleichungen der Mechanik so einfach wie möglich werden. ... es gibt keine Art, die Zeit zu messen, die richtiger ist als eine andere; die, die allgemein angewendet wird, ist nur bequemer."*¹⁴

¹²Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik*. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wissenschaftsverlag 1989, S.18

¹³Sexl, Raab, Streeruwitz, *Physik I*, Wien: Ueberreuter, 1982, S.13

¹⁴Poincaré, Henri, *Das Maß der Zeit*, in: Aichelburg, Peter C. (Hrsg.), *Zeit im Wandel der Zeit*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1988, S.93

Dies ist das *Poincarésche Einfachheitsprinzip*, nach dem nicht nur die Metrik der Zeit abgeleitet werden soll. Es soll nach Poincaré vielmehr ein leitendes Prinzip bei der Auswahl physikalischer Theorien darstellen.¹⁵

Galilei erkannte den Nachteil der Pulsschlagmethode und ging auf die andere Art der Zeitmessung über, die Messung einer gleichförmigen Veränderung. Er ließ Wasser gleichmäßig in einen Becher rinnen und wog diesen. So schreibt er: *"Zur Ausmessung der Zeit stellten wir einen Eimer voll Wasser auf, in dessen Boden ein enger Kanal angebracht war, durch den sich ein feiner Wasserstrahl ergoß, der mit einem kleinen Becher aufgefangen wurde. Das auf diese Weise aufgefangene Wasser wurde auf einer sehr genauen Waage gewogen. Aus der Differenz der Wägungen erhielten wir die Verhältnisse der Zeiten."*¹⁶ Das Maß für die Zeit war das Gewicht des Wassers. Diese Methode stellt eine Wasseruhr dar. Nach dem gleichen Prinzip wird Zeitdauer mit Sanduhren gemessen, man denke an die "Zähneputzuhr" für die Zeitdauer von drei Minuten. Die Menge des Sandes, die im Zeitraum von drei Minuten unter dem Einfluß der Schwerkraft durch die Öffnung fällt, ist vorher schon abgemessen worden. (Man kann mit dieser Uhr nicht nur die Dauer von drei Minuten, sondern auch von sechs, neun, zwölf Minuten messen, man muß die Uhr nur schnell genug umdrehen. Problematisch ist jedoch die Messung der Dauer von einem nicht-ganzzahligen Vielfachen von drei Minuten.) Die oben beschriebenen Methoden der Zeitmessung sind zwar für einzelne Vorgänge praktisch, für die Ordnung von Ereignissen größeren Ausmaßes, wie z.B. daß Lehrer/innen und Schüler/innen zur gleichen Zeit im selben Gebäude sind, ungeeignet. Was heute, im Zeitalter der Telekommunikation unproblematisch erscheint, war für frühere Gesellschaften ein schwieriges Problem. Zur Organisation größeren Ausmaßes bedarf es einer Uhr, die von allen, wo auch immer sie sich befinden, wahrgenommen werden kann. Außerdem sollte das zeitbestimmende Ereignis nicht nur einmalig stattfinden.

Ein solches periodisch wiederkehrendes Ereignis stellt der - scheinbare - Umlauf der Sonne um die Erde dar. Die Periodendauer ist ein Erdentag. Ausgezeichnete Punkte, *Zeitpunkte*, diese Umlaufs sind Sonnenuntergang und Sonnenaufgang. Um auch dazwischenliegende Zeitpunkte angeben zu können, wurden *Sonnenuhren* konstruiert. Verallgemeinert kann gesagt werden, daß jede periodische Bewegung eine Uhr darstellt, wie beispielsweise die Schwingung eines Pendels. Pendeluhren erfordern allerdings eine exakt lotrechte Lage, was zu dem Problem führte, daß sie in der Schifffahrt bei all den Stürmen auf hoher See nicht eingesetzt werden konnten. Außerdem verän-

¹⁵Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik*. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wissenschaftsverlag 1989, S.28

¹⁶Galilei, Galileo, zitiert in: Sexl, Raab, Streeruwitz, *Physik I*, Wien: Ueberreuter, 1982, S.14

derte sich ihr Gang bei Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen. Ein Zeitmeßgerät war aber zur Kursbestimmung auf hoher See dringend erforderlich. Aus Uhrzeit und Sternenstand wurde nämlich der Längengrad bestimmt, auf dem man sich gerade befand. Aus diesem Grund wurde eine hohe Belohnung für jenen versprochen, der eine Uhr konstruierte, die diesen Anforderungen entsprach. Das Problem konnte schließlich vom schottischen Uhrmacher John Harrison gelöst werden.¹⁷

Auf der Suche nach immer genaueren Uhren wurde schließlich die *Quarzuhr* entwickelt. Das schwingende Element ist ein Quarzkristall. Das Funktionsprinzip ist in der piezoelektrischen Eigenschaft des Quarzkristalls begründet¹⁸. Dies bedeutet, daß bei Ausübung von mechanischem Druck auf den Kristall im Inneren des Kristalls ein elektrisches Dipolmoment entsteht. In der Quarzuhr wird dieser Effekt umgekehrt: Es wird durch eine Batterie ein elektrisches Wechselfeld angelegt, infolgedessen ändert der Quarzkristall seine Länge, und es entstehen elastische Deformationsschwingungen. Die genauesten Uhren sind heute die *Atomuhren*¹⁹. Sie beruhen ebenfalls auf dem Schwingungsprinzip. Die herangezogene Schwingung ist die jener elektromagnetischen Welle, die von einem Caesiumatom Cs_{133} beim Übergang zwischen zwei Spineinstellungen des äußeren Hüllenatoms abgestrahlt wird. Eine Sekunde ist demnach definiert als das 9 129 631 770 fache der Schwingungsdauer dieser Strahlung. Die Strahlung wird in Wechselwirkung gesetzt mit magnetischen Hochfrequenzfeldern, die durch einen Hilfsgenerator gespeist werden. Entspricht die Frequenz des Magnetfeldes genau jener der beim Atomübergang ausgesendeten Welle, wird der Hilfsgenerator auf diese Frequenz hin stabilisiert. Die Uhr ist umso genauer, je kleiner die Regelabweichung ist. Aber woran mißt man die Genauigkeit? Was ist die Referenzuhr? Die Referenzuhr kann nur eine andere Atomuhr sein, da eben keine andere Uhr so genau ist wie eine Atomuhr. Vergleicht man zwei Atomuhren, so zeigen die Werte innerhalb eines Jahres eine Abweichung von einigen 10^{-6} Sekunden. Dies bedeutet, daß eine Atomuhr erst in etwa 10^5 bis 10^6 Jahren um eine Sekunde falsch geht (im Vergleich zu einer anderen Atomuhr).

Welche Uhr zur Messung herangezogen wird, hängt vor allem von der Größe des zu messenden Zeitraumes ab. Für Zeiträume in der Größe von einigen tausend Jahren verwendet man als Uhr den monotonen Vorgang des Zerfalls radioaktiver Substanzen.

¹⁷Vgl. Sobel, Dava, *Längengrad*, btb Taschenbuch, Berlin: Goldmann 1998

¹⁸Vgl. Rennert, P., Schmiedel, H., Weißmantel, Ch. (Hrsg.), *Kleine Enzyklopädie, Physik*, Thun, Frankfurt/M.: Deutsch 1987, S.560f

¹⁹Vgl. Rennert, P., Schmiedel, H., Weißmantel, Ch. (Hrsg.), *Kleine Enzyklopädie, Physik*, Thun, Frankfurt/M.: Deutsch 1987, S.443f

Hier sei die Kalium-Argon-Methode und die Kohlenstoff-Methode (C_{14} -Methode) erwähnt. Letztere wird zur Altersbestimmung von organischer Materie verwendet. Es wird im Prinzip davon ausgegangen, daß Elemente und ihre radioaktiven Isotope in einem bestimmten Konzentrationsverhältnis vorkommen. Dieses Konzentrationsverhältnis ändert sich im Laufe der Zeit aufgrund des radioaktiven Zerfalls der Isotope. Unter Berücksichtigung des ursprünglichen Verhältnisses und der Halbwertszeit des Zerfalls kann aus dem neuen Konzentrationsverhältnis die dazwischenliegende Zeitdauer berechnet werden. Diese Zerfallsuhr beruht also nicht auf dem Schwingungsprinzip, sondern ist ein Beispiel für jene Uhrenart, bei der die Größe einer Veränderung eines einmaligen Vorgangs als Maß genommen wird.

Um sehr kurze Zeiten zu bestimmen, etwa jene von molekularen Wechselwirkungen in der Größenordnung von 10^{-11} Sekunden, wird die Periodendauer der Molekülschwingung direkt aus den entsprechenden Spektren abgeleitet.

Geschwindigkeitsmessung

In Anbetracht der folgenden Thematik von Lichtgeschwindigkeit und Relativgeschwindigkeiten möchte ich noch kurz auf die Messung von Geschwindigkeiten eingehen. Im Prinzip wird die Geschwindigkeit auf eine Längen- und Zeitmessung zurückgeführt. Ist aus verschiedenen Gründen keine Längen- oder Zeitmessung möglich, wie z.B. bei astronomischen Messungen, wird die Geschwindigkeit indirekt gemessen. Ein solches indirektes Geschwindigkeitsmeßverfahren ist beispielsweise der Dopplereffekt. Dieser Effekt bezeichnet die Verschiebung der Frequenz (oder Wellenlänge) einer Welle bei einer Relativbewegung v zwischen der Quelle und dem Empfänger. Bei Schallwellen ist ein Beispiel für diesen Effekt die Änderung der Tonhöhe eines sich nähernden oder entfernenden hupenden Autos. Bei Lichtwellen tritt dieser Effekt als Rotverschiebung des Lichts von Sternen und Galaxien auf. Dies bedeutet, daß bei der Spektralanalyse des Sternenlichts jener Sterne, die sich von uns entfernen, die Spektrallinien in den roten Wellenlängenbereich hin verschoben sind. Beobachter/in ist in diesem Fall der/die Astronom/in auf der Erde, Quelle ist der Stern. Das Sternenlicht ist im wesentlichen emittierte Energie aus den Verbrennungsprozessen der Sterne. Energien, und somit Lage der Spektrallinien der Verbrennungsprozesse sind bekannt. Aus dem Vergleich von bekannter und gemessener Lage der Spektrallinien ist jene Rotverschiebung erkennbar. Interpretiert wird sie dadurch, daß das Universum expandiert und die Galaxien sich somit entfernen. Eine andere Interpretation der Rotverschiebung ist jene, daß sich der Raum zwischen den Galaxien vergrößert

und dadurch die Lichtwellen gedehnt werden. Vergrößerte Wellenlänge bedeutet ebenfalls "roteres" Licht²⁰.

2. DAS MODERNE RELATIVITÄTSPRINZIP

Es wäre zu vermuten, daß die Relativitätstheorie Einsteins aus ähnlichen, aus dem Newtonschen Relativitätsprinzip weitergeführten, Überlegungen entstanden ist. Dem war aber nicht so. Die moderne Relativitätstheorie entwickelte sich aus den Theorien der Optik, der Elektrizität und des Magnetismus. Deshalb möchte ich kurz die Theorie des Lichts behandeln.

2.1. Lichtgeschwindigkeit

Schon Galilei stellte Versuche an, um eine etwaige Lichtgeschwindigkeit zu messen. Dazu postierte er zwei Männer mit Laternen auf jeweils einem Hügel. Unter Berücksichtigung der Entfernung und der Reaktionszeiten der Männer (der eine mußte die Hand von der Laterne nehmen, wenn er das Licht des anderen erblickte), konnte er feststellen, daß das Licht sich entweder instantan oder mit einer außerordentlich schnellen Geschwindigkeit ausbreiten mußte. (Anm.: Für eine Strecke von 3 km braucht das Licht weniger als eine Hunderttausendstelsekunde - eine für Galilei unmeßbare Zeit. Bemerkenswert ist jedoch, daß er in seiner Zeit überhaupt die Idee hatte, das Licht könnte *n i c h t* instantan sein.)

In den Jahren nach 1670 erforschte der dänische Astronom Ole Rømer die Verfinsterungsperioden des Jupitermondes Io. Dabei machte er die Feststellung, daß die Verfinsterungen umso früher einsetzten, je näher die Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne an den Jupiter herankam. Rømer führte dies auf eine endliche Lichtgeschwindigkeit zurück und maß, daß Licht 22 Minuten braucht, um die Erdbahn zu durchlaufen. Damit konnte er die 22 minütige Eklipsenverzögerung erklären.

Abb.III.1 zeigt die Skizze zur auf der Erde beobachtbaren Verfinsterung des Jupitermondes Io.

Aus der Differenz der Lichtlaufzeiten errechnete Roemer eine Lichtgeschwindigkeit von 210 000 km/s. Zum Vergleich: Der heutige Meßwert liegt bei etwa 300 000 km/s.

²⁰Hogan, C., Kirschner, R., Suntzeff, N., *Die Vermessung der Raumzeit mit Supernovae*, Artikel in: *Spektrum der Wissenschaft*, März 1999

Für die Menschen damals war es einerseits schwer zu glauben, daß Licht sich nicht instantan ausbreitet, andererseits war diese enorme Geschwindigkeit unvorstellbar groß. In der Tat, es fällt auch heute noch schwer, sich die Ausbreitung des Lichts vorzustellen, nur haben sich die Menschen daran "gewöhnt". Die endliche Lichtgeschwindigkeit ist zu einem nicht mehr weiter hinterfragten Faktum geworden.

Ein weiteres Phänomen gab den Astronomen im 17. Jhdt. zu denken: Die Sterne vollführten jährlich eine merkwürdige Zusatzbewegung, sie durchliefen einmal im Jahr eine Ellipse. Auch dieses Phänomen kann durch die Existenz einer endlichen Lichtgeschwindigkeit erklärt werden. Vergleichbar ist dies mit einem Spaziergang im Regen und der Frage, wie man den Regenschirm halten sollte, damit man nicht naß wird. Je schneller man geht, desto stärker kommt der Regen "von vorne" und man muß den Schirm nach vorne neigen.

Nun ersetze man in dieser Überlegung den Regenschirm durch ein Fernrohr und den Regen durch Licht. Daraus ergibt sich, daß der Einfallswinkel des Lichts umso flacher wird, je stärker sich das Fernrohr, oder die Erde, bewegt (siehe **Abb.III.2**).

Der Stern täuscht so eine nach vorn versetzte Standortrichtung vor, obwohl er senkrecht oben steht. Da die Erde sich in einer Umlaufbahn befindet, ändert der Stern scheinbar ständig seinen Standort, und zwar in der Miniaturkopie der Erdbahn, einer Ellipse.

Heute wird die Vakuumlichtgeschwindigkeit durch gleichzeitige Messung von Wellenlänge λ und Frequenz ν festgestellt. Die Lichtgeschwindigkeit c berechnet sich aus

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Das Verfahren beruht darauf, daß die Frequenz eines He-Ne-Lasers, der eine Strahlung mit einer Wellenlänge von $3,39 \mu\text{m}$ besitzt, an der Absorptionslinie von Methan stabilisiert wird²¹. Daraus ergibt sich eine Vakuumlichtgeschwindigkeit von:

$$c = 299\,792\,458,0 \pm 1,2 \text{ m/s}$$

Bis zum 19. Jhdt. war die Meinung vorherrschend, das das Licht aus Lichtteilchen bestünde. So war Newton davon überzeugt und führte das Argument an, daß die

²¹ Rennert, P., Schmiedel, H., Weißmantel, Ch. (Hrsg.), *Kleine Enzyklopädie, Physik*, Thun, Frankfurt/M.: Deutsch 1987, S.506

Gegenstände scharfe Schatten werfen. Der holländische Physiker Christiaan Huygens war hingegen der Ansicht, daß es sich um eine Wellenerscheinung handle.

Im 19. Jhdt. führte der englische Arzt und Physiker Thomas Young überzeugende Argumente vor, daß Licht eine Welle sei. Er zeigte, daß wenn Licht mit anderem Licht zusammenfällt, sich dunkle und helle Stellen abwechselten. Dies verglich er mit Wasserwellen und argumentierte, daß nur Wellen, nicht aber Teilchen sich gegenseitig verstärken oder auslöschen konnten. Dieses Phänomen bezeichnete er als *Interferenz*. Hinzu kam, daß etwa das Phänomen der Lichtbrechung in Wasser sehr gut mit der Wellentheorie erklärbar war, sodaß die Wellentheorie die Teilchentheorie schließlich verdrängt hatte. Ungeklärt war jedoch noch die Frage, was für eine Art von Welle Licht sei.

Felder, Elektromagnetismus

Michael Faraday wurde 1791 geboren. Mit seinem Induktionsgesetz erfaßte Faraday das Wesen des Elektromagnetismus. Für ihn war der Raum um einen Magneten nicht leer, sondern von *magnetischen Kraftlinien* durchdrungen. Ganz analog stellte er sich ein elektrisches Feld vor, das von elektrischen Ladungen erzeugt wird. Damit begründete er den Feldbegriff. Bis zum Auftreten Faradays bestand die Vorstellung, daß zwischen den Körpern eine unendlich schnelle und ohne den dazwischenliegenden Raum beteiligte Fernwirkung bestünde. Diese Vorstellung ersetzte Faraday durch eine Nahwirkungstheorie, nach der sich elektrische und magnetische Wirkungen mit einer endlichen Geschwindigkeit fortpflanzten.

Maxwell gab Faradays Ideen schließlich die heute noch gültige Form, die *Maxwell'schen Feldgleichungen*.

Die mathematische Schlußfolgerung der Feldgleichungen sagen die Existenz von elektromagnetischen Wellen voraus und daß diese Wellen transversal sind. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Welle ergibt sich ein Wert, der mit dem experimentell bestimmten Wert der Lichtgeschwindigkeit genau übereinstimmt. Das nahm Maxwell zum Anlaß, das Licht als elektromagnetische Welle zu betrachten. Von nun an war die Lichttheorie in die Theorie des Elektromagnetismus integriert.

2.2. Äther

Eine wichtige Frage in der Lichttheorie war auch durch Maxwell noch nicht geklärt worden: Die Frage nach dem Ausbreitungsmedium des Lichts, dem "Lichtäther". Auf Grundlage der Newtonschen Physik konnten bis dahin alle Fragen geklärt werden. Es wurden keine Unstimmigkeiten zwischen der Lichttheorie und der Newtonschen Physik festgestellt - bis Albert Michelson im Jahr 1881 begann, die Geschwindigkeit der Erde durch den Weltraum (bzw. des Ätherwindes um die Erde) mit Hilfe von

Lichtstrahlen zu messen. Nach der Newtonschen Theorie hängt die gemessene Geschwindigkeit vom Bewegungszustand ab. Das hieße:

- Verharrt man in Ruhe im absoluten Raum, mißt man in alle Richtungen die gleiche Lichtgeschwindigkeit.
- Bewegt man sich in Richtung des Lichts mit, sollte die Lichtgeschwindigkeit geringer, bei Bewegung in entgegengesetzte Richtung größer sein - man mißt also Relativgeschwindigkeiten.

Man nahm an, daß der Äther die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts bestimme. Gemäß der Newtonschen Vorstellung wurde der Äther als im absoluten Raum ruhend betrachtet und die Lichtgeschwindigkeit durch den Äther sei demnach stets die selbe. Nachdem sich die Erde bewegt, müßte also eine Relativgeschwindigkeit der Erde relativ zum Äther feststellbar sein. Dies müßte sich, da das Licht sich im Äther mit einer konstanten Geschwindigkeit ausbreitet, durch eine relative Änderung der auf der Erde gemessenen Lichtgeschwindigkeit bemerkbar machen, je nachdem, in welche Richtung von der Erde aus die Lichtgeschwindigkeit gemessen würde. Genaugenommen müßte sich die Lichtgeschwindigkeit jahreszeitlich ändern, da die Erde auf ihrer Ellipsenbahn eine ständige Änderung ihrer Bewegungsrichtung durch den absoluten Äther vollführt. Aufgrund der großen Lichtgeschwindigkeit und der im Verhältnis dazu kleinen Erdgeschwindigkeit wären die Unterschiede zwar sehr klein (ca. ein Zehntausendstel der Lichtgeschwindigkeit), müßten aber mit einem sehr präzisen Instrument meßbar sein. Michelson entwickelte zu diesem Zweck ein Instrument, das Michelson-Interferometer. Seine Untersuchungen wurden von Edward Morley unterstützt. Der Apparat war so aufgebaut, daß er einen Lichtstrahl in zwei zueinander rechtwinkelige Teilstrahlen aufspaltete. Diese wurden auf Spiegel gelenkt und reflektiert. Die wieder zusammengeführten Teilstrahlen wurden auf einen Schirm gelenkt und das Interferenzbild durch ein Mikroskop betrachtet. Die Theorie war, daß aufgrund der verschiedenen Bewegungsrichtung des Lichts (normal zueinander) ein Geschwindigkeitsunterschied in Form eines veränderten Interferenzmusters auftreten müßte. Es konnte jedoch keinerlei Veränderung festgestellt werden, damit konnte keine Geschwindigkeit der Erde relativ zum Ätherwind gemessen werden. Die Möglichkeit, daß die Erde im absoluten Äther ruht, wurde nicht in Erwägung gezogen, da dies einen Rückschritt zum vorkopernikanischen geozentrischen System bedeutet hätte. Es wurde die andere Lösung akzeptiert, nämlich jene, daß ein Äther einfach nicht existiert!²²

²²Vgl. Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997, S.89f

Albert Einstein

Albert Einstein war als Mann bekannt, der seine Theorien "von oben nach unten" entwickelte. Er begann mit großen, übergreifenden Grundsätzen, weil sie philosophisch reizvoll oder logisch zwingend waren, und projizierte erst dann nach unten auf die Ebene der Experimente, um Folgerungen aus den Grundsätzen zu ziehen.²³ Unter diesem Gesichtspunkt muß auch die Entwicklung seiner Relativitätstheorie gesehen werden. So war Einstein davon überzeugt, daß das Relativitätsprinzip der gleichförmigen Bewegung unter allen Umständen erhalten bleiben müsse. Darin stützte er sich auf Ernst Mach. Andererseits wollte Einstein die erfolgreiche Theorie der Elektrodynamik mit ihren hervorragenden Werten für die Lichtgeschwindigkeit nicht in Zweifel ziehen. Daher entschied er sich, die beiden Theorien zu einer völlig neuen Theorie zu vereinen - der *Relativitätstheorie*.

Die Prinzipien, nämlich die Relativität der gleichförmigen Bewegung und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, waren aber scheinbar unvereinbar. Also was tun? Die einzige Möglichkeit, hier auf einen Nenner zu kommen, war, etwas aufzugeben, was seit Anfängen der Wissenschaft angenommen wurde: die Absolutheit von Raum und Zeit. Nur wenn Raum und Zeit als relativ angenommen werden, ist es möglich zu erklären, daß zwei Beobachter/innen, die sich relativ zueinander bewegen, *denselben* Lichtimpuls mit *derselben* Geschwindigkeit wahrnehmen. Denn Geschwindigkeit ist nichts anderes als Weg durch Zeit. Wird nun postuliert, daß auch bei Relativbewegung der Wert der Geschwindigkeit konstant ist, so folgt daraus, daß die Längen- und Zeitmaßstäbe für verschiedene Beobachter/innen verschieden sind!

²³Vgl. Davies, Paul, *Die Unsterblichkeit der Zeit. Die moderne Physik zwischen Rationalismus und Gott*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1995

3. DIE RELATIVISTISCHE RAUMZEIT (SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE)

Raum und Zeit wurden von nun an als miteinander verknüpft und relativ betrachtet. Sie sind gewissermaßen verformbar und können sich strecken und schrumpfen, je nachdem, wie sich der/die Beobachter/in bewegt. In der sogenannten Speziellen Relativitätstheorie gelten folgende Postulate:

1. *Spezielles Relativitätspostulat*: Alle gleichförmig geradlinig zueinander bewegten Inertialsysteme sind physikalisch gleichwertig.

2. *Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*: Die Lichtgeschwindigkeit ist in einem Inertialsystem konstant unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle.²⁴ Daraus folgt: Kein Körper und kein Signal kann sich schneller als das Licht ausbreiten.

Von nun an spricht man von Ereignissen, die sowohl räumlichen als auch zeitlichen Abstand haben. Der neue Zusammenhang von Raum und Zeit drückt sich dadurch aus, daß, wenn man die Art der Ortsbestimmung ändert, man möglicherweise auch ihren zeitlichen Abstand ändert, wenn man die Art der Zeitbestimmung ändert, man möglicherweise auch ihren örtlichen Abstand ändert. Anstelle der universellen Zeit treten verschiedene Eigenzeiten der verschiedenen Körper im Weltall. Die Eigenzeiten zweier Körper stimmen nur dann exakt überein, wenn die Körper sich relativ zueinander in Ruhe befinden:²⁵

Hätten die Physiker/innen der damaligen Zeit sich nicht zu diesem Schritt entschlossen, hätte man die Gesetze der Elektrodynamik bzw. das Relativitätsprinzip der Bewegung revidieren oder verändern müssen. Beide haben sich jedoch vorzüglich bewährt. Im Vergleich dazu war es "einfacher", das Postulat von der Absolutheit der Zeit aufzugeben. Vor allem, weil durch die neue Theorie vieles erklärbar wurde, was in der Newton'schen Theorie nur mit "Kunstgriffen" handzuhaben war. Die Relativitätstheorie war eine enorme Veränderung des bestehenden Weltbildes, was darin zum Ausdruck kommt, daß diese Theorie auch unter Philosoph/inn/en diskutiert wird. In der Physik beschränkte sich das Problem darauf, passende Transformationsgleichungen zu finden, um Bewegungen beschreiben zu können, die sich *n i c h t* vor dem Hintergrund eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit ereignen. Dadurch gewinnt der Beobachter/innen/standpunkt immer mehr an Bedeutung. (Dies ist übri-

²⁴Mainzer, Klaus, *Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit*, München: Beck 1995, Beck'sche Reihe Nr. 2011, S. 45

²⁵Russell, Bertrand, *Das ABC der Relativitätstheorie*, Frankfurt/Main: Fischer 1989, S.38f

gens auch in der Theorie der Quantenmechanik der Fall.) Fragen, die in der Newtonschen Physik hinfällig waren, sind nun ausschlaggebend.

So z.B.:

Von wo aus mißt der/die Beobachter/in die Zeitdauer eines Ereignisses?

Befindet er/sie sich im gleichen Inertialsystem oder in einem relativ dazu bewegten?

Was hat die Relativität der Zeit für Folgen in bezug auf die Aussagen über die zeitliche Reihenfolge zweier Ereignisse?

3.1. Inertialsysteme, Kräfte

Als *Inertialsystem* wird ein Bezugssystem dann bezeichnet, wenn ein Körper von sich aus in Ruhe oder in gleichförmig-geradliniger Bewegung verharrt (Trägheitsprinzip). Wirkt eine Kraft auf den Körper, erfolgt eine Impuls- und somit Geschwindigkeitsänderung. Somit gelten Systeme, in denen Kräfte wirken, nicht als Inertialsysteme. Die in der Natur beobachtbaren Kräfte kann man grob in zwei Gruppen einteilen, nämlich in *Nah-* und in *Fernwirkungskräfte*.²⁶

- *Nahwirkungskräfte*

Diese Kräfte beruhen auf direkter Kontaktwechselwirkung zwischen Körpern, wie z.B. *Reibungskräfte*.

- *Fernwirkungskräfte*

Bei den Fernwirkungskräften ist keine direkte Kontaktwechselwirkung nachweisbar. Zu dieser Gruppe zählen die *Trägheitskräfte*. Diese Kräfte treten nur in der Beschreibung eines Bezugssystems auf, in einem anderen Bezugssystem wären sie nicht vorhanden. Deshalb bezeichnet man sie auch als "Scheinkräfte".

Kräfte, die durch keine Änderung des Bezugssystems zu beseitigen sind, bezeichnet man als *echte Fernkräfte*.

Die Gravitation wurde ebenfalls zu den Fernkräften gezählt, bis Einstein jene Transformationen des Bezugssystems fand, die die Gravitationskraft zum verschwinden brachten. Somit zählt die *Gravitationskraft* zu den *Trägheitskräften*²⁷.

(Anm.: Einstein versuchte auch, durch entsprechende Transformationen die elektromagnetischen Kräfte zum Verschwinden zu bringen, was ihm jedoch nicht gelang.)

Der Begriff des Inertialsystems ist sehr theoretisch. Es ist daher zu fragen, was ein Inertialsystem darstellen könnte?

²⁶Gerthsen, Ch., Kneser, H.O., Vogel, H., *Physik*, 16.Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer 1989, S.48

²⁷Gerthsen, Ch., Kneser, H.O., Vogel, H., *Physik*, 16.Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer 1989, S.49

Ein Laboratorium auf der Erde stellt offensichtlich *kein* Inertialsystem dar. Auch ein antriebsloses, die Erde umkreisendes Raumschiff ist kein Inertialsystem, da sogenannte Gezeitenkräfte bemerkbar sind. Eine Annäherung an ein Inertialsystem wäre eine antriebslose, nicht-rotierende Rakete im interstellaren Raum fern von allen Massen. Ein solches "Raumschiff" ist z.B. die Sonne (abgesehen von ihrem Umlauf um das Zentrum der Galaxis). Ein mit der Sonne verbundenes Koordinatensystem, dessen Achsen auf bestimmte Fixsterne zeigen, ist ein ausreichendes Inertialsystem (abgesehen von den Gravitationswirkungen der Sonne und der Planeten).

Zwischen Inertialsystemen können Relativbewegungen festgestellt werden. Schon z.B. Galilei und Huygens stellten aufgrund dessen das Relativitätspostulat als Forderung auf. Man denke beispielsweise an eine Zugfahrt: Man hat das Gefühl, sich in Ruhe zu befinden, und sieht die Umgebung sich am Fenster vorbeibewegen. Die Koordinaten in einem Inertialsystem können durch Gleichungen, die bereits Galilei gefunden hat, in das andere Inertialsystem transformiert werden. Diese werden als *Galilei-Transformationen* bezeichnet.

Galilei-Transformationen

Man stelle sich zwei Inertialsysteme vor. Das eine habe gegenüber dem anderen eine relative Geschwindigkeit v in Richtung der x -Achse. (Dies stellt keine Einschränkung dar, da die x -Achse immer in Bewegungsrichtung gelegt werden kann.) Inertialsystem I kann als ruhend, Inertialsystem I' als bewegt bezeichnet werden (siehe **Abb.III.3**). Jedes Ereignis wird in einem Inertialsystem durch jeweils vier Koordinaten angegeben werden: drei Ortskoordinaten x, y, z , und eine Zeitkoordinate t . Im System I hat ein Ereignis die Koordinaten (x, y, z, t) und im System I' (x', y', z', t') . Nun sei der Zusammenhang zwischen den Koordinatenwerten auf Grundlage der klassischen Mechanik gesucht.

Die Absolutheit der Zeit führt sofort zu:

$$t = t'$$

Da die x -Achse in Bewegungsrichtung gelegt wurde, ergibt sich für die beiden anderen Ortskoordinaten:

$$y = y'$$

$$z = z'$$

Die x' -Koordinate ergibt sich aus der Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit v .

$$x' = x - vt$$

$$x = x' + vt'$$

Da Raum und Zeit als homogen und unabhängig vom sich bewegenden Körper betrachtet werden, behalten die Newtonschen Gleichungen auch nach der Transformation ihre Gültigkeit, allerdings nur, solange die Geschwindigkeit v klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit ist.

3.2. Gleichzeitigkeit

Da die Zeit in der Physik Newtons absolut und unabhängig von den Ereignissen existiert, ist auch eine absolute zeitliche Reihenfolge sowie Gleichzeitigkeit von Ereignissen konstruierbar. Um dies festzustellen, braucht man am Ort eines jeden Ereignisses jeweils eine Uhr. Diese Uhren müssen synchronisiert sein. Nun stellt sich schon das erste Problem: Wie synchronisiert man Uhren? Man braucht einen Austausch zwischen den Uhren, ein Zeitsignal. Wenn sich beide Uhren im gleichen Inertialsystem befinden (also immer den gleichen Abstand D haben), kann man unter Berücksichtigung der Laufzeit t des Zeitsignals die beiden Uhren synchronisieren. Als Zeitsignale können in diesem Fall sowohl akustische als auch elektromagnetische Signale, wie Licht oder Radiowellen, verwendet werden.

Sendet also die Uhr A um 12 Uhr das Signal aus, und empfängt die Uhr B um $(12 \text{ Uhr} + D/c)$ dieses Signal, so laufen die Uhren synchron. Will man eine Synchronisation unabhängig von der Laufzeit der Signale durchführen, so könnte man einen in der Mitte der Uhren befindlichen Empfänger aufstellen. Nun sollen beide Uhren um 12 Uhr ein Lichtsignal aussenden. Wenn beide Signale beim Empfänger gleichzeitig eintreffen, sind die Uhren synchron (siehe **Abb.III.4**).

Die routinemäßige Uhrensynchronisation des Uhrennetzes der Welt bestätigt übrigens die Nicht-Existenz des Äthers, die Zeitsignale wechseln nicht ständig ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit. Dies wäre nämlich der Fall, wenn es eine Relativbewegung der Erde durch den Äther gäbe. Dann wäre eine Uhrensynchronisation praktisch unmöglich.

Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse im selben Bezugssystem kann somit folgendermaßen definiert werden²⁸:

Zwei Ereignisse sind dann gleichzeitig, wenn die von ihnen ausgesendeten Signale eine/n in der Mitte befindliche/n Beobachter/in zugleich erreichen.

²⁸Die folgenden Überlegungen zu Gleichzeitigkeit sind im wesentlichen aus Sexl 1991, S. 54-58 entnommen.

Es ist von Vorteil, als Zeitsignal eine elektromagnetische Welle zu verwenden, da deren Geschwindigkeit nach dem Postulat von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, unabhängig von der Bewegung des Systems immer gleich ist. Die Gleichzeitigkeit könnte somit folgend formuliert werden:

*Zwei Ereignisse sind gleichzeitig, wenn die von ihnen ausgesandten **Lichtsignale** bei einem/einer in der Mitte befindlichen Empfänger/in zugleich eintreffen.*

Der Begriff Gleichzeitigkeit ist also mit einem Bezugssystem verbunden (erkennbar durch den in der Mitte befindlichen Empfänger).

Was aber, wenn die beiden Systeme gegeneinander bewegt sind? Man stelle sich dazu zwei Raketen vor, die gegenseitig eine Relativgeschwindigkeit von $v = c/2$ aufweisen (siehe **Abb.III.5**). Sowohl Rakete A als auch Rakete B habe vorne und hinten eine Uhr (A_v, A_h, B_v, B_h). Die Uhren werden durch ein Lichtsignal in Gang gesetzt, das von einer Blitzlampe in der Mitte der beiden Raumschiffe kommt. Es sei zunächst die Sachlage aus der Sicht des Raumschiffs A betrachtet, das somit als ruhend angenommen wird. Ihm Gegensatz zu ihm bewegt sich B mit $c/2$.

Nachdem beide Inertialsysteme nach der Relativitätstheorie gleichberechtigt sind und die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, kann man weder der einen noch der anderen Seite rechtgeben. Wenn A und B ihre Aufzeichnungen vergleichen, können sie zu zwei Schlüssen kommen:

1. Das von den Blitzen ausgesandte Licht bewegt sich im bewegten Inertialsystem mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, im ruhenden jedoch nur mit einer. Diese Folgerung muß aufgrund des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verworfen werden.
2. Die Zeit- und Ortsmaßstäbe sind im bewegten Bezugssystem anders als im ruhenden. Die bewegte Uhr des jeweils bewegten Raumschiffs geht schneller. Gemäß der Relativitätstheorie ist diese Schlußfolgerung die richtige. Dieser Effekt wird als *Zeitdilatation* bezeichnet.

(Die Folgerungen gelten vice versa für A und B.)

Außerdem folgt, daß Ereignisse, die in einem Inertialsystem gleichzeitig stattfinden (also das gleichzeitige Starten der Uhren), in einem relativ dazu bewegten Inertialsystem *n i c h t* gleichzeitig sind. Aufgründdessen muß die obige Definition von Gleichzeitigkeit erweitert werden:

Zwei Ereignisse, die in einem Inertialsystem gleichzeitig eintreten, finden in einem relativ dazu bewegten Inertialsystem nicht gleichzeitig statt.

Das obige Beispiel zeigt, daß die Beurteilung des vom einen System A aus betrachtete Uhrgangs B im System B von der Relativgeschwindigkeit der beiden Systeme abhängt.

Nun will ich auf jene Änderungen der Orts- und Zeitmaßstäbe, also *Längenkontraktion* und *Zeitdilatation*, eingehen, die sich durch das Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ergeben.

3.3. Zeitdilatation, Längenkontraktion

Man stelle sich eine Uhr vor, deren Unruh ein hin- und herlaufendes Lichtsignal ist, eine sogenannte "Lichtuhr". Die Zeit, die der Lichtstrahl zum Hin- und Rücklauf braucht, ist die Zeiteinheit dieser Uhr. Wenn die Uhr eine Länge von 15 cm hat, ergibt sich eine Zeiteinheit von $t = 0.3\text{m}/c = 10^{-9}\text{s} = 1 \text{ Nanosekunde (ns)}$.

Nun sei folgendes Beispiel betrachtet: (siehe **Abb.III.6**)

Zwei Uhren A und B ruhen relativ zueinander und sind synchronisiert. Eine dritte Uhr C bewegt sich relativ zu A und B mit der Geschwindigkeit $v = c(\sqrt{3})/2$. Die Zeit t_b der Uhr C wird bei Passieren der Uhren A und B mit deren Zeit t_r verglichen.

Berechnet werden kann der Effekt der Zeitdilatation aus der Beziehung zwischen den beiden Zeitangaben t_r und t_b .

Vom Standpunkt der bewegten Uhr hat das Licht lediglich die Zylinderlänge $l = ct_b$ zurückgelegt, daher zeigt C die Zeit $t_b = l/c$ an.

Vom Standpunkt der ruhenden Uhr hat das Lichtsignal in C einen wesentlich längeren Weg zurückgelegt, nämlich (nach Pythagoras):

$$l^2 + (vt_r)^2 = (ct_r)^2$$

Durch Einsetzen von $l = ct_b$ folgt:

$$(ct_b)^2 + (vt_r)^2 = (ct_r)^2$$

Nach t_b aufgelöst ergibt sich die Relation der beiden Zeiten folgendermaßen:

$$t_b = t_r \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

In Worten ausgedrückt:

Eine bewegte Uhr geht langsamer.

Nun könnte man meinen, daß das Ergebnis dieser Überlegungen, nämlich daß die bewegte Uhr langsamer geht als die ruhenden, im Widerspruch zum Relativitätsprinzip steht, nachdem ja die Bezeichnungen "bewegt" und "ruhend" nicht absolut sondern relativ sind. Sollte aus diesem Grund nicht gleichermaßen die bewegte Uhr A (oder B) langsamer gehen als C?

Dieser scheinbare Widerspruch löst sich auf, wenn man bedenkt, daß die Verlangsamung von C nur dadurch festgestellt werden kann, daß C an *zwei* ruhenden Uhren vorbeifliegt. Die gedehnte Zeit wird hingegen nur an einer Uhr abgelesen. Wird C als ruhend betrachtet, so kann zwar die Zeit der vorbeifliegenden Uhren A und B abgelesen werden, aber es kann keinerlei Aussage über den *Gang* der Uhren gemacht werden. Dazu sind zwei synchronisierte Uhren erforderlich. (Dazu vergleiche man das obige Beispiel der beiden Raumschiffe. Hier ist sehr wohl der Zeitdilatationseffekt symmetrisch bemerkbar.)

Analog zur Veränderung der Zeitmaßstäbe gibt es eine Veränderung der Raummaßstäbe in bewegten Systemen, die sogenannte *Längen- oder Lorentzkontraktion*.²⁹ Der bewegte Maßstab erscheint dem ruhenden Beobachter gegenüber dem ruhenden Maßstab um den Faktor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ verkürzt.

$$l_b = l_r \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Räumlich Maßstäbe sind in Bewegungsrichtung bewegter Systemen verkürzt.

Nun möchte ich wieder auf die zeitlich Relation von Ereignissen zurückkommen.

²⁹Eine gut verständliche Herleitung der Lorentz-Kontraktion aus Minkowskidiagrammen sowie der Lorentz-Transformation bietet: Sexl, Roman, Schmidt, Herbert K., *Raum, Zeit, Relativität*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1991, S.77ff

Was kann über die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen ausgesagt werden? Ist darüber überhaupt keine Aussage mehr möglich?

Doch! Angenommen, ich erlebe ein Ereignis E und gleichzeitig geht von mir ein Lichtblitz in alle Seiten aus. Jedes Ereignis, daß durch diesen Lichtblitz irgendwo anders, sagen wir auf einem Stern, ausgelöst wird, findet in jedem Fall *s p ä t e r* statt als mein Ereignis E. Alles, was ich von diesem Stern sehe, bevor ich das Ereignis E erlebe, findet in jedem Fall *f r ü h e r* statt als das Ereignis E. Aber es kann keine Aussage über die zeitlich Ordnung von jenen Ereignissen getroffen werden, die ich von dem Stern sehe, nachdem ich das Ereignis E erlebe und die stattfinden, bevor der Stern mein Ereignis sieht. Diese Ereignisse sind nicht eindeutig früher oder später als E.

A.A. Robb schlug vor, zum Verständnis der Sachlage die *Wirkung* eines Ereignisses auf ein anderes zu betrachten. *Ein Ereignis findet nur dann eindeutig früher statt als ein anderes, wenn es auf das andere irgendwie einwirken kann*³⁰.

Raumzeitdiagramme

Um ein Ereignis in der vierdimensionalen Raumzeit graphisch darzustellen, bedient man sich der Darstellung von Raumzeitdiagrammen. In diesen ist jedes Ereignis dargestellt durch vier Koordinaten, drei Ortskoordinaten und einer Zeitkoordinate. Üblicher-weise wird eine räumliche dimension vernachlässigt und der Raum als eine Ebene dargestellt, aus der die Zeitachse senkrecht herausragt. Der Zeitablauf der Bewegung eines Massenpunktes bzw. die aufeinanderfolgenden Positionen ergeben die *Weltlinie*. Die Weltlinie einer geradlinig-gleichförmigen Bewegung ist eine Gerade, jene einer beschleunigten Bewegung ist gekrümmt. In der folgenden Abbildung sei der Einfachheit halber nur eine Raumdimension dargestellt (**Abb.III.7**).

Hermann Minkowski, ehemals Einsteins Lehrer, entwickelte Raumzeitdiagramme, die den Postulaten der Relativitätstheorie genügen. Sie werden als *Minkowski-Diagramme* bezeichnet. Durch die Minkowskidiagramme ist es möglich, einen raumzeitlichen Abstand zweier Ereignisse zu berechnen. Die Minkowski-Geometrie erlaubt es, Vorgänge vom Standpunkt zweier verschiedener Inertialsysteme graphisch zu beschreiben und somit relativistische Probleme zeichnerisch darzustellen. Da man in der Relativitätstheorie mit sehr hohen Geschwindigkeiten zu tun hat, wählt man als Maßeinheit die Lichtsekunde, das ist jener Weg, den das Licht in einer Sekunde zurücklegt:

$$1 \text{ Ls} = 300\,000 \text{ km}$$

³⁰Robb, A.A., *The Theory of Space and Time*, zitiert in: Russell, Bertrand, *Das ABC der Relativitätstheorie*, Frankfurt/Main: Fischer 1989, S.52

Ein ruhender Körper bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v = 0$ durch den Raum, und mit der Geschwindigkeit c durch die Zeit. Seine Weltlinie ist eine Gerade. (**Abb.III.8**)

Die Gegenwart (oder Gleichzeitigkeit) entspricht im System I Ebenen, die parallel zur Raumebene und normal zur t-Achse liegen. Im System I', also aus der Sicht des/der bewegten Beobachterin bilden alle gleichzeitigen Punkte geneigte Ebenen. Der Unterschied zwischen den Minkowski-Diagrammen und gewöhnlichen Raumzeit-Diagrammen besteht darin, daß die Neigung der Weltlinie eines gleichförmig bewegten Objekts durch die Lichtgeschwindigkeit begrenzt ist.

Um den raumzeitlichen Abstand zweier Ereignisse zu bestimmen, bedarf es einer *Metrik*, die ebenfalls Hermann Minkowski entwickelte. Man würde meinen, daß sich die Quadrate der Abstände in Koordinatensystemen immer gemäß dem Satz von Pythagoras aus der Summe der Kathetenquadrate ergäbe. In Minkowskis Metrik errechnet sich das Quadrat des raumzeitlichen Abstands jedoch aus dem Quadrat des zeitlichen Abstand *minus* dem Quadrat der räumlichen Abstände. Dieses Minuszeichen spielt eine große Rolle, denn nur so kann das Quadrat des Abstands sowohl positiv, als auch negativ oder Null sein.

$$c^2(t_2-t_1)^2-(x_2-x_1)^2 = A^2$$

A ist der raumzeitliche Abstand der beiden Ereignisse, wobei drei Fälle zu unterscheiden sind.

- $A^2 > 0$ Dies bedeutet, daß die beiden Ereignisse kausal verknüpft sind. Ihr Zusammenhang wird als *zeitartig* bezeichnet. Dieser Zusammenhang heißt *Einsteinkausalität*.
- $A^2 < 0$ Die Ereignisse sind *raumartig* miteinander verknüpft, es kann zwischen ihnen absolut keine kausalen Zusammenhang geben. Die Wurzel aus A^2 ist eine imaginäre Zahl. Der raumzeitliche Abstand A ist somit "imaginär".

$A^2=0$ Der Abstand zwischen den Ereignissen wird als *lichtartig* bezeichnet, da nur Licht diesen Abstand überwinden kann. So haben z.B. die beiden Enden eines Laserstrahls den Abstand 0, weil sich der Strahl exakt mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt.³¹

Die raumartigen und zeitartigen Gebiete können durch einen sogenannten *Lichtkegel* veranschaulicht werden. (**Abb.III.9**)

Die Raumzeit wird in drei Regionen unterteilt: *Vergangenheitslichtkegel*, *Zukunftslichtkegel* und das "*Anderswo*". Die absolute Zukunft eines Ereignisses ist der Bereich innerhalb des Zukunftslichtkegels von P. Sie ist die Gesamtheit aller Ereignisse, die von P beeinflusst werden können. Ereignisse außerhalb des Zukunftslichtkegels können von P nicht beeinflusst werden, weil P keine Signale, die sich schneller als das Licht ausbreiten, aussenden kann. Die absolute Vergangenheit ist die Summe aller Ereignisse, die P durch Aussendung von Signalen mit maximal Lichtgeschwindigkeit, erreichen können. Ereignisse, die außerhalb des Vergangenheitslichtkegels liegen, können P nicht erreichen und damit nicht beeinflussen. Sie gehören nicht zu seiner Vergangenheit.

Das "Anderswo" wird auch als *raumartiges* Gebiet bezeichnet, die Gebiete innerhalb des Lichtkegels als *zeitartig*. Liegen zwei Ereignisse im zeitartigen Gebiet, kann eine zeitliche Folge festgestellt werden. Liegt ein Ereignis innerhalb des Lichtkegels, das andere Ereignis außerhalb, so kann keine zeitliche Ordnung angegeben werden. Der Begriff der Gleichzeitigkeit ist daher relativ. Anstelle der *Gegenwart* der klassischen Physik, die durch eine Fläche $t = \text{const.}$ dargestellt werden würde, tritt das gesamte raumartige Gebiet!

Jedes Ereignis hat seinen eigenen Lichtkegel, seine sogenannte *Eigenzeit*. Will ich geometrisch die Zeit darstellen, nach der eine Supernova auf der Erde beobachtbar ist, so muß ich vom Lichtkegel des Ereignisses, also der Supernova ausgehen und die Weltlinie der Erde mit dem Lichtkegel der Supernova schneiden. (In idealisierter Weise verändert die Erde in dieser Zeit ihren räumlichen Abstand zur Supernova nicht.)

Im Zusammenhang mit Zeitreisen erscheint mir die geometrische Darstellung der Raumzeit insofern von Bedeutung, weil sie eine Veranschaulichung von Vergangen-

³¹Vgl. Halper, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt 1977

heit und Zukunft bietet. Beachtenswert ist, daß Vergangenheit und Zukunft hier vollkommen symmetrisch sind.

Nun wurde die geometrische Darstellung der Raumzeit und die Raumzeitmetrik, die beide auf Minkowski zurückgehen, behandelt. Was noch fehlt, ist das "mathematische Werkzeug", nämlich jene Transformationsgleichungen für die Koordinaten zweier Inertialsysteme, die der Relativitätstheorie genügen: die *Lorentz-Transformationen*.

Lorentz - Transformationen

Die Geschichte der Lorentz-Transformationsgleichungen entwickelte sich unabhängig von Einsteins Veröffentlichungen zur Relativitätstheorie im Jahre 1905 und geht auf die vergeblich Suche nach dem Ätherwind zurück. Schon vor der Jahrhundertwende wurde von verschiedenen Physikern, vor allem von Henri Poincaré, das "theoretische Flickwerk der Physik" kritisiert, um das Mißlingen der Messung eines Ätherwindes zu erklären. Er vermutete, es müsse eine neue Mechanik geben, in der kein Körper sich schneller als das Licht bewegen könnte.

Im Jahre 1904 veröffentlichte der holländische Physiker Hendrik Anton Lorentz eine Arbeit³², in der er Transformationsgleichungen vorstellte, die die Längenkontraktion beinhalteten. Außerdem führte er den Begriff der *lokalen Zeit* ein. Er setzte in der Galilei-Transformation nicht mehr $t = t'$ sondern:

$$\begin{aligned}t' &= t - vx/c^2 \\t &= t' + vx'/c^2\end{aligned}$$

Ihre Bedeutung erhielten die Lorentzgleichungen, als Einstein 1905 zeigt, daß nicht die Galilei-Transformation, sondern die Lorentz-Transformation die universelle Beziehung von Raum und Zeit zum Ausdruck bringt.

Gesucht sind also Transformationsgleichungen, die Raum und Zeit in Abhängigkeit bringen und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gewährleisten. Dazu müssen die Galileitransformationen um einen Faktor korrigiert werden.

³²Lorentz, Hendrik Anton, *Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichtes nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt*, zitiert in: Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997

Galilei

$$x = x' + vt'$$

$$x' = x - vt$$

mit Korrekturfaktor

$$x = k(x' + vt')$$

$$x' = k(x - vt)$$

Der Korrekturfaktor soll von der Geschwindigkeit abhängen. Damit sich für kleine v wieder die Galilei-Transformation ergibt, muß k für kleine v gegen 1 gehen.

Es kann gezeigt werden, daß der Korrekturfaktor k diese Bedingungen erfüllt.³³

$$k = \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

Bei einer Geschwindigkeit v , die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit c ist, gilt:

$$1 - v^2/c^2 \cong 1$$

Daher ist $k=1$, und die Transformationsgleichungen entsprechen exakt denen der Galilei-Transformation.

Für eine Bewegung in x -Richtung ergeben sich daher die folgenden Gleichungen der Lorentz-Transformation:

$$x' = k(x - vt)$$

$$x = k(x' + vt')$$

$$y' = y$$

$$y = y'$$

$$z' = z$$

$$z = z'$$

$$t' = k(t - vx/c^2)$$

$$t = k(t' + vx'/c^2)$$

³³ Siehe dazu: Sexl, Roman, Schmidt, Herbert K., *Raum, Zeit, Relativität*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1991, S.74

Man beachte, daß der Korrekturfaktor k die gleiche Form hat, wie der Verkürzungsfaktor bei der Zeitdilatation oder Längenkontraktion.

Die klassisch gültige Galileitransformation folgt als Grenzfall für $v \ll c$.

Bewegte Massen

Die Masse wird in der speziellen Relativitätstheorie nur insofern berücksichtigt, als eine Erklärung dafür gefunden werden muß, wieso auch unter ständiger Beschleunigung einer Masse die Lichtgeschwindigkeit den obersten Grenzwert darstellt. Dazu sei folgendes Beispiel betrachtet (**Abb.III.10**):

Eine Kugel der Masse m fliegt in einem Inertialsystem I mit einer konstanten Geschwindigkeit w gegen eine Wand. Die Kugel schlägt ein Loch in die Wand und bleibt darin stecken. Derselbe Vorgang sei nun von einem Inertialsystem I' aus betrachtet, das sich gegenüber I mit der Geschwindigkeit v bewegt.

Vom System I' aus erscheinen alle Vorgänge in I um den Faktor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ verlangsamt. Deshalb wird von I' aus eine kleinere Geschwindigkeit der Kugel gemessen, und zwar:

$$w' = w \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Für beide Inertialsysteme ist jedoch die Tiefe des Lochs die gleiche! Ein Maß für die Tiefe des Lochs ist der Impuls p , den die Kugel an die Wand abgibt.

In I überträgt die Kugel einen Impuls von $p = mw$.

In I' überträgt die Kugel einen Impuls von $p = m'w'$.

Setzt man nun für w' ein, so ergibt sich für m' folgende Relation:

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

m wird von nun an als *Ruhemasse*, m' als *dynamische Masse* eines Körpers bezeichnet.

Betrachtet man nun die Differenz von m und m' , so kann man für $v \ll c$ einen Ausdruck für die kinetische Energie E_k finden:³⁴

³⁴Siehe: Sexl, Roman U., Urbantke, Helmuth K., *Relativität, Gruppen Teilchen*, Wien: Springer-Verlag 1976, S.126

$$m - m' = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{mv^2}{2} = \frac{E_k}{c^2}$$

Führt man einem System Energie zu, so erhöht sich dadurch seine Masse um E_k/c^2 . Dies ist jene Schlußfolgerung aus Einsteins Arbeit "*Hängt die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt ab?*", die als **Masse-Energie-Äquivalent** in der Form

$$E = mc^2$$

berühmt wurde.

Es besagt: Je mehr ein Körper durch eine Kraft beschleunigt wird, desto schneller ist er relativ zum ruhenden System und desto größer ist seine Masse. Folglich wird es immer schwerer, den Körper weiterzubeschleunigen, seine immer größere Masse setzt der Kraft eine immer größere Trägheit entgegen. Es würde schließlich unendlich lange dauern, bis der Körper auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wäre. Die Lichtgeschwindigkeit wird also nie erreicht.

4. EINSTEINS GRAVITATIONSTHEORIE (ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE)

Bisher wurde der Zusammenhang von Raum und Zeit unabhängig von Massen erörtert. Da eine umfassende Theorie jedoch schwerlich Massen unbeachtet lassen kann, wollte Einstein nach der speziellen Relativitätstheorie nun auch eine Gravitationstheorie entwickeln.

Das Newtonsche Gravitationsgesetz, das besagt, daß die Anziehungskraft zweier Massen mit dem Quadrat ihrer Entfernung abnimmt ($F \sim 1/r^2$), hat sich zwar sehr gut bewährt, ist aber durch die neuen Überlegungen logisch nicht mehr richtig.³⁵ Denn das, was Newton als Abstand bezeichnet hat, kann nur ein Abstand zu einem bestimmten Zeitpunkt sein. Er dachte nicht, daß es im Zusammenhang mit der Zeit Mehrdeutigkeiten geben könnte. Seit der speziellen Relativitätstheorie ist der Abstand zweier Körper ein subjektiver Begriff, und daher für ein kosmisches Gesetz nicht geeignet.

Nach Veröffentlichung der Speziellen Relativitätstheorie arbeitete Einstein zehn Jahre intensiv an der Allgemeinen Relativitätstheorie, um sie 1915 zu veröffentlichen. Den Anstoß zur Beschäftigung mit Kräften und Beschleunigung gaben ihm ästhetische Mängel: So stellte er sich die Frage: Wenn Ruhe und gleichförmige Bewegung relativ sind, könnten nicht auch Beschleunigungen relativ sein?

Zunächst hatte Einstein versucht, die Gravitation in die Spezielle Relativitätstheorie einzugliedern, was aber nicht gelang.³⁶ Galileis Entdeckung, daß die Fallbeschleunigung für alle Körper gleich ist, führte Einstein zu folgender Überlegung: Da dadurch auch die Gleichheit von schwerer und träger Masse ausgedrückt wird, muß auch der Schlüssel zum Verständnis von Gravitation und Trägheit in diesem Satz liegen. Oder anders ausgedrückt: Wenn alles gleich schnell fällt, bleibt in Relation zum/zur fallenden Beobachter/in alles an seinem Platz, wie im Ruhesystem!!

4.1. Äquivalenzprinzip

Um sich diese Überlegung bildhaft zu machen, stelle man sich ein Himmelslabor vor, das von allen Massen so weit weg ist, daß es keine nennenswerte Gravitation spürt. Nun zieht ein Geist am oberen Ende des Labors und setzt es mit der Beschleunigung g in Bewegung. Parallel dazu betrachte man ein Erdlabor, das auf der Erde ruht. In beiden Laboratorien werden nun zwei Kugeln, die zuvor gehalten wurden, fallengelassen.

³⁵Vgl. Russell, Bertrand, *Das ABC der Relativitätstheorie*, Frankfurt/Main: Fischer 1989

³⁶Vgl. Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997

sen. In beiden Laboratorien ist gleichermaßen zu beobachten, daß sich die Kugeln mit einer Beschleunigung g nach unten bewegen, also fallen. Würde der Geist das Himmelslabor nicht in die Höhe beschleunigen, würden die Kugeln im Bezug zum Labor in Ruhe in der Luft schweben. Zieht der Geist das Labor in die Höhe, beschleunigt er quasi den Boden des Labors auf die Kugeln zu.

Die beiden Vorgänge sind vollkommen äquivalent.

Ein anderes Beispiel ist der freie Fall einer Aufzugkabine. Im Bezugssystem der Kabine sind alle Körper in Ruhe, von außen gesehen fallen sie alle mit der gleichen Beschleunigung.

Als Beispiel für die Äquivalenz eines schwerelosen und eines frei-fallenden Bezugssystems sei nun folgende Szene betrachtet: (**Abb.III.11**)

Eine Person steht an einem Abhang, mit einem zwölfteiligen Fenster in den Händen, durch das sie die Flugbahn einer Kanonenkugel beobachtet. Die Person springt von der Klippe in dem Augenblick, indem die Kanonenkugel abgefeuert wird. Gemäß der speziellen Relativitätstheorie muß sich die Kanonenkugel in jedem beliebigen Inertialsystem mit gleichförmiger Geschwindigkeit entlang einer Geraden bewegen. Von einem/einer ruhenden Beobachter/in auf der Erdoberfläche aus gesehen beschreibt die Kugel eine Parabelbahn, aber die Erdoberfläche stellt, wie zu Beginn gezeigt wurde, kein Inertialsystem dar. Ein im Schwerfeld frei fallendes Bezugssystem stellt sehr wohl ein Inertialsystem dar. Was also beobachtet die frei fallende Person durch ihr Fenster?

Im System, in dem keine Gravitation existiert, also im frei fallenden System, bewegt sich die Kanonenkugel, gemäß den Gesetzen der speziellen Relativitätstheorie auf einer Geraden mit gleichförmiger Geschwindigkeit. Dies veranlaßte Einstein zu einer Verallgemeinerung des Beispiels und zur Formulierung des *Äquivalenzprinzips*:

*In jedem kleinen freifallenden Bezugssystem unseres realen, mit Gravitation ausgestatteten Universums müssen dieselben physikalischen Gesetze gelten wie in einem Inertialsystem, das sich in einem idealisierten Universum ohne Gravitation befindet.*³⁷

Zeit im Schwerfeld

Nun sei ein anderes Gedankenexperiment betrachtet, bei dem Einstein den Gang von Uhren im Schwerfeld verglich:

³⁷Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S.110

Es gäbe wieder ein von einem Geist nach oben beschleunigtes Himmelslabor und ein auf der Erde ruhendes Erdlabor. Beide Laboratorien haben sowohl an der Decke als auch am Boden jeweils eine Uhr. Ein/e Beobachter/in im Himmelslabor will überprüfen, ob die beiden Uhren wohl exakt gleich gehen. Dazu muß er/sie beide Uhren im Blick haben. (Die Uhren senden bei jedem "Tick" einen Lichtimpuls aus.) Nun klettert unser/e Beobachter/in zur Deckenuhr und schaut zur Uhr am Boden herab. Um exakt zu sein, muß die Laufzeit des Lichts von der Bodenuhr bis zur Decke berücksichtigt werden. Nun sendet die Bodenuhr einen Lichtimpuls aus. Da das Laboratorium beschleunigt ist, bewegt sich die Decke immer schneller von dem heraufkommenden Lichtimpuls weg, sodaß die Lichtimpulse der Bodenuhr in immer langsamerer zeitlicher Abfolge eintreffen. Der/Die Beobachter/in wird also feststellen, daß die Bodenuhr nachgeht.

Da das Himmelslabor äquivalent zum Erdlabor zu sehen ist, kann für die Uhren im Gravitationsfeld ausgesagt werden, daß sie umso langsamer gehen, je näher sie dem Boden sind. Diese Tatsache wird auch als die *gravitationsbedingte Zeitdilatation* bezeichnet und kann folgend formuliert werden:

*Wenn ein/e Beobachter/in sich relativ zu einem Körper, der eine Gravitationskraft ausübt, in Ruhe befindet, dann fließt seine/ihre Zeit umso langsamer, je näher er/sie sich dem Körper befindet.*³⁸

Aufgrund dieses Effekts kann auch die *gravitationsbedingte Rotverschiebung* von Sternenlicht erklärt werden.³⁹ Ein Atom auf der Sternoberfläche stelle die Uhr A dar und sende Licht der Frequenz ν_0 aus. Weit weg vom Stern befinde sich ein/e Beobachterin, der/die sich ebenfalls in Besitz einer Atomuhr mit dem gleichen Atom (Uhr B) befindet und ebenfalls Signale der Frequenz ν_0 aussendet. Der Gang von A wird mit dem Gang von B verglichen. (**Abb.III.12**)

Von B werden ν_0 Wellenlängen ausgesendet. Für B vergeht dabei die Zeit $T_B = 1\text{s}$, und der Zeiger in B rückt vor. Im gleichen Zeitraum werden von B $\nu_1 = (\nu_0 - \Delta\nu)$ Wellenlängen empfangen. Diese zeigen das Vorrücken des Zeigers in A an. Aus der Beziehung: $T_A \nu_0 = T_B (\nu_0 - \Delta\nu)$ folgt, daß A eine Zeitdifferenz von

$$T_A = T_B (1 - (\Delta\nu/\nu_0))$$

³⁸Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S.112

³⁹Vgl. Sexl, R. u H., *Weißer Zwerge - Schwarze Löcher*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1979, S.21

anzeigt. Das Verhältnis von Frequenzunterschied und ursprünglicher Frequenz ($\Delta\nu/\nu_0$) soll nun in Beziehung zum Gravitationspotential gesetzt werden, um ein allgemeines Gesetz zur gravitationsbedingten Rotverschiebung formulieren zu können. Dazu geht man von der Energie E eines Photons in einem Lichtstrahl aus. Diese kann einerseits durch ihr Masseäquivalent $E = mc^2$, andererseits als Produkt von Frequenz und Planckschem Wirkungsquantum $E = h\nu$ ausgedrückt werden. Daraus ergibt sich folgende Relation:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

Wenn ein Photon in einem Gravitationsfeld nach oben steigt, muß es die Arbeit

$$A = m \Delta U$$

leisten. ΔU ist die Differenz des Gravitationspotentials U zwischen Anfang und Ende des Lichtweges. Daher kommt das Photon oben mit einer verminderten Energie $E' = E - A$ an, der eine verminderte Frequenz $\nu' = E'/h$ entspricht. Der Frequenzunterschied beträgt: $\Delta\nu = \nu - \nu'$

Durch Einsetzen in die Gleichung für A kann folgende Beziehung zwischen $\Delta\nu$ und ΔU abgeleitet werden:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta U}{c^2}$$

Dies ist die Beziehung für die gravitationsbedingte Rotverschiebung. Für den Gang von Uhren folgt daraus:

$$T_A = T_B \left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right)$$

In gleichem Maße ergibt sich eine Änderung der Längenmaßstäbe. Maßstäbe werden in der Nähe von Massen um den Faktor $\left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right)$ geschrumpft:

$$L_A = L_B \left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right)$$

Gezeitenkräfte

Die sogenannten Gezeitenkräfte sind ein Phänomen, das sich durch die Newtonsche Gravitationstheorie hervorragend erklären läßt. Eine relativistische Gravitationstheorie muß also dieses Phänomen erklären können, wenn sie anstelle der Newtonschen Theorie treten will.⁴⁰ (**Abb.III.13**)

Anhand der Gezeitenkräfte läßt sich auch erklären, wieso ein frei fallender Mensch nicht *k e i n e* Kraft spürt (wie man aufgrund der Elimination der Gravitation im frei fallenden Bezugssystem vermuten würde und wie Einstein zur Herleitung seines Äquivalenzprinzips selbst angenommen hatte!), sondern der Länge nach (in Richtung Erdmittelpunkt) ein wenig gedehnt, und der Breite nach ein wenig zusammengedrückt wird. (**Abb.III.14**)

Zuerst versuchte Einstein, die Gezeitenkräfte dadurch zu erklären, daß die Zeit gekrümmt, der Raum jedoch flach sei. Dieser Schluß würde auch aus der gravitationsbedingten Zeitdilatation folgen. Nur steckt in dieser Annahme ein Widerspruch zum Relativitätsprinzip. Denn wenn die Zeit einer Person A gekrümmt ist, deren Raum jedoch flach ist, dann sind Zeit und Raum einer relativ zu ihr bewegten Person B eine Mischung aus Zeit A und Raum A. Somit wären Zeit B und Raum B gekrümmt. Dies würde das System A gegenüber dem System B auszeichnen, was dem Relativitätsprinzip widersprechen würde. Außerdem würden sich daraus unendlich viele Bezugssysteme mit unendlich vielen gekrümmten Zeiten und Räumen ergeben. Die Lösung bestand darin, Hermann Minkowskis Idee zu folgen und *e i n e e i n z i g e* gekrümmte Raumzeit anzunehmen.

(Anm.: Man hat sich mit der Relativitätstheorie zwar von Newtons absoluter Zeit verabschiedet, durch das Konzept von allein *einer gekrümmten Raumzeit* doch wieder etwas Absolutes geschaffen. Somit ist der Begriff "absolut" auch in der Relativitätstheorie nicht ganz verschwunden. Daß mit der Relativitätstheorie nicht vollständig der Begriff des absoluten Bezugssystems I_0 aufgegeben wurde, äußert sich in der Praxis der Kosmologie. Hier wird heute die isotrope kosmische 3°K-Strahlung als Hintergrund allen kosmischen Geschehens, somit quasi als *absoluter Raum*, betrachtet.⁴¹)

⁴⁰Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.118

⁴¹Mansouri, R., Sexl, R.U., zitiert in: Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik*. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wissenschaftsverlag 1989, S.129

4.2. Krümmung der Raumzeit

Was war das Ziel, das Einstein anstrebte? Er wollte eine Theorie der Gravitation finden, in der die Gravitationskraft und die Gezeitenkräfte ebenfalls durch das Raumzeitkontinuum erklärt werden konnten. So sollten beschleunigte Bewegungen quasi auf gleichförmige Bewegungen zurückgeführt werden und somit wieder dem Relativitätsprinzip genügen. Wieder war eine Veränderung der Raumzeit, diesmal jedoch in geometrischer Hinsicht, zielführend.

In der speziellen Relativitätstheorie konnte die Raumzeit durch die euklidische Geometrie dargestellt werden, und es wurde lediglich ihre Metrik, also ihre Maßstäbe verändert. In der euklidischen Geometrie ist die Raumzeit flach, was dadurch ersichtlich ist, daß sich parallele Geraden nie (oder erst im Unendlichen) schneiden. Auf einer gekrümmten Fläche hingegen können sich parallele Geraden sehr wohl schneiden. Man denke nur an die Erdoberfläche mit ihren Längengraden. Diese verlaufen am Äquator parallel, schneiden sich aber an den Polen. Auf einer solchen sphärischen Fläche ist es auch möglich, ein Dreieck mit lauter rechten Winkeln zu konstruieren, was auf einer ebenen Fläche unmöglich ist.

Für die Gravitationstheorie reicht also die euklidische Geometrie nicht mehr. Das Raumzeitkontinuum ist gekrümmt, und zwar durch die Anwesenheit von Masse! Einstein erkannte, das es falsch war, anzunehmen, daß die Gravitation eine Krümmung *verursacht*. Vielmehr *ist* die Gravitation die Krümmung der Raumzeit! Ein Gravitationsfeld ist somit überhaupt kein Kraftfeld, sondern eine Krümmung in der Struktur der Raumzeit.

Zur Veranschaulichung sei folgendes Beispiel betrachtet (es seien Reibung und Fallbeschleunigung vernachlässigt).

Man lege eine schwere Kugel auf das gespannte Netz eines Trampolins. Das Netz versinnbildlicht die Raumzeit, die durch die Masse der Kugel gekrümmt wird. Nun stoße man eine kleinere Kugel so an, daß sie auf dem Netz an der großen Kugel vorbeiläuft. Man wird beobachten, daß die kleine Kugel auf dem Netz keineswegs eine gerade Bahn beschreibt, sondern vielmehr der gekrümmten Ebene folgt, auf der sie rollt. Sie beschreibt den kürzest möglichen Weg, um von ihrem Ausgangspunkt zum Zielpunkt (dieser sei auf der anderen Seite des Netzes gedacht) zu gelangen. Diese Linien nennt man *Geodäten*.

Die Kugel, die auf dem Trampolin rollt, weiß nichts von einer dritten räumlichen Dimension außerhalb ihrer Rollfläche und existiert quasi in einer zweidimensionalen Welt. Sie nimmt nur ihre Bewegung in x- und y-Richtung wahr, nicht aber jene Bewegungskomponente in z-Richtung. Dies kann man sich veranschaulichen, indem man

die Bewegung der Kugel "von oben", also im Grundriß der Skizze betrachtet. Dem gegenübergestellt soll das Geschehen von einem/einer Beobachter/in verfolgt werden, der/die drei Dimensionen wahrnimmt. (**Abb.III.15**)

Die Bahn der kleinen Kugel könnte also durch eine *Anziehungskraft*, die von der großen Kugel ausgeht und die Bahn der kleinen Kugel ablenkt, erklärt werden. Oder aber der Weg der Kugel wird erklärt durch die *Krümmung des Netzes*, das die Kugel in eine bestimmte Bahn zwingt.

Aber es wäre sinnlos, vom Zusammenwirken einer Anziehungskraft und des Einflusses der Krümmung des Netzes zu sprechen. Was soll eine Gravitationskraft noch bewirken, wenn die Bahn schon durch die Krümmung bestimmt ist, und umgekehrt? Dies sind zwei verschiedene Theorien! Genauso verhält es sich mit der Newtonschen Gravitationstheorie, die von einer Kraftwirkung ausgeht, und der Einsteinschen Gravitationstheorie, die auf einer Raumzeitkrümmung basiert.

Wenn man nun dieses Beispiel auf die Planeten und die Sonne anwendet, so sind deren Bahnen Geodäten in der durch die Sonne gekrümmten Raumzeit. Zeichnerisch ist dies nur durch Vernachlässigen einer Raumdimension darzustellen, da man, um die Krümmung eines dreidimensionalen Raumes darzustellen, in die vierte Dimension gehen muß. Hier sei angemerkt, daß die Zeit nicht als eine vierte Raumdimension zu sehen ist. Zeit und Raum sind zur vierdimensionalen Raumzeit verschmolzen, aber die Zeit bleibt Zeit. Der Raum, in dem gekrümmte Raumzeit dargestellt wird, wird als *Hyperraum* bezeichnet.

Die Krümmung der Raumzeit wird durch die Riemannsche Geometrie beschrieben. Der Vorteil der Riemannschen Geometrie liegt darin, ohne Annahme zusätzlicher Dimensionen auszukommen, um eine Krümmung zu beschreiben. Anstelle Newtonschen Gravitationsfeld tritt also eine rein-geometrische Beschreibung der Raumzeit ohne Feld.⁴²

Wahrnehmung der Krümmung

Wie soll man sich nun aber diese Raumzeitkrümmung im Universum vorstellen? Sieht man sie? Oder wodurch macht sie sich bemerkbar?

Die Krümmung der Raumzeit führt dazu, daß geodätische Linien entweder auseinanderlaufen (a) oder zusammenlaufen (b). (Siehe **Abb.III.16**)

⁴²Vgl. dazu: Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997

Denkt man z.B. an zwei Bälle, die parallel von einem Flugzeug aus auf die Erde zufallen und sogar durch sie durchfallen können (kleine Schwarze Löcher hätten diese Eigenschaft), so werden sie am Erdmittelpunkt aufeinandertreffen. Sie bewegen sich auf Geodäten wie in b). Jedes Teilchen der Erde bewegt sich entlang von Geodäten, so auch die Wassermoleküle im Meer. Einige bewegen sich aufeinander zu (Flut), andere befinden sich auf auseinandertriftenden Geodäten (Ebbe). Letztendlich folgt auch das Licht dem Weg einer Geodäte. Dies führt zur "Ablenkung" von Sternenlicht in der Nähe großer Massen. (Siehe **Abb.III.17**)

(Anm.: Der Begriff *Ablenkung* hat eigentlich nur aus Newtonscher Sicht eine Bedeutung. In der gekrümmten Raumzeit trifft dies nicht zu!)

Mit der Theorie der Krümmung der Raumzeit konnte ein astronomisches Phänomen erklärt werden, das durch die newtonsche Physik nicht erklärbar war, nämlich die Periheldrehung des Merkur. Diese wird verursacht durch Gezeiteneffekte, also Massenverschiebungen in der Sonne. Merkur ist der einzige Planet, bei dem dieser Effekt meßbare Ausmaße annimmt. Das war gewissermaßen die sichtbare Bestätigung der Einsteinschen Gravitationstheorie.

Die Krümmung ist auch körperlich spürbar!

Die vorhin behandelten Gezeitenkräfte, die der frei fallende Mensch in Form von Druck auf seinen Körper spürt, sind ein spürbarer Effekt der Krümmung. Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, daß sich alle Teilchen entlang ihrer eigenen Geodäten bewegen, so auch alle einzelnen Teilchen des Körpers oder der Erdoberfläche. Krümmung der Achsen bedeutet, daß sie einerseits gedehnt, andererseits zusammengedrückt werden. Das bedeutet, daß die Geodäten auseinander- oder zusammenlaufen. Befinden sich die "Teilchen" des menschlichen Körpers auf zusammenlaufenden Geodäten, so empfinden wir es als Druck, da die Körperoberfläche bzw. die Zellmembranen nicht so verformbar sind wie die Meeresoberfläche. Auf der Meeresoberfläche weichen die Teilchen unter Druck nach oben aus und der Meeresspiegel steigt. Im Gegensatz dazu empfinden wir es als Dehnung, wenn sich unsere "Körperteilchen" auf auseinanderlaufenden Geodäten befinden.

Nun verfolge man diesen Gedanken weiter: Was veranlaßt uns eigentlich dazu, etwas als Kraft zu bezeichnen? Eine Kraft an sich ist ja nicht spürbar, sondern immer nur die Wirkung einer Kraft, z.B. Druck. Um diese "Wirkung" zu erklären, wird auf den abstrakten Begriff der Kraft zurückgeführt. Würde man nun konsequent die Teilchen sich auf Geodäten bewegende vorstellen, so wird verständlich, daß der Kraftbegriff substituierbar sein kann. Da für den Kraftbegriff eine Letztbegründung fehlt (dieses

Problem war auch schon Newton bekannt), ist es Ziel der Physiker/innen, Kraftbegriffe so weit wie möglich zu substituieren. Hierfür reichen jedoch drei oder vier Dimensionen nicht aus (man denke an die Darstellung der gekrümmten Raumzeit). In der Regel gilt: Je mehr eine physikalische Theorie erklären kann, desto mehr Dimensionen werden benötigt. Hier sei die Theorie der *Superstrings* erwähnt⁴³.

Wie können nun aber die Gezeiteneffekte mit der Speziellen Relativitätstheorie und mit dem Äquivalenzprinzip vereinbart werden?

Dazu müßte die Aussage, daß sich jedes Teilchen, egal von welchem Inertialsystem beobachtet, auf einer Geraden mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt, revidiert werden. Nur in kleinen Bereichen trifft das zu, wie auch in kleinen Bereichen auf der Oberfläche einer Kugel mit euklidischer Geometrie gearbeitet werden kann. In großen Bereichen bewegen sich die Teilchen entlang der Geodäten der gekrümmten Raumzeit. In diesem Fall spüren sehr ausgedehnte Körper die Krümmung in Form der Gezeiten-effekte: Sie werden zur Masse hin in der Länge gedehnt und tangential zur Masse etwas zusammengedrückt. Je größer die Masse, die die Raumzeit krümmt, desto stärker sind die Gezeiteneffekte und desto kleiner werden jene Bereiche, in denen sie vernachlässigt werden können. Im Fall von Schwarzen Löchern sind die Gezeiteneffekte aufgrund der Masse des Loches so stark, daß ein Mensch, für den die Gezeiteneffekte im Mond-Erde-Sonne-System an seinem eigenen Körper praktisch nicht wahrnehmbar sind, in der Nähe eines Schwarzen Loches zerrissen werden würde. Daraus folgt, daß bei Schwarzen Löchern praktisch nicht mehr mit Euklidischer Metrik gearbeitet werden kann, weil der Bereich der Nicht-Spürbarkeit der Gezeiten nur mehr von atomarer Größenordnung ist.

Es kann verallgemeinert formuliert werden:

Jedes frei fallende Teilchen wandert entlang einer Geodäte durch die Raumzeit. In kleinen Bereichen kann die Raumzeit als eben angenommen und mit Euklidischer Geometrie dargestellt werden. In großen Bereichen muß die Raumzeitkrümmung berücksichtigt und daher mit Riemannscher Geometrie dargestellt werden.

Ich möchte hier den relativistischen Teil des zweiten Kapitels beenden. Es sei aber an dieser Stelle darauf verwiesen, daß die Entstehung und Auswirkungen großer Massensammlungen im Universum (wie z.B. Schwarze Löcher), die Krümmung der Raum-

⁴³Vgl. Davies, Paul, Brown, Julian R.,(Hrsg.) *Superstrings. Eine allumfassende Theorie der Natur in der Diskussion*, München: dtv 1996, Tb.Nr. 30035

zeit in der Umgebung Schwarzer Löcher und die Konsequenzen daraus (Grenzen der Relativitätstheorie) in Kapitel Fünf behandelt werden.

5. ZEIT UND QUANTENTHEORIE

Die Quantentheorie entwickelte sich, wie auch die Relativitätstheorie, um die Jahrhundertwende. 1900 wurde von Max Planck das nach ihm benannte Planck'sche Wirkungsquantum h eingeführt, um die Spektralverteilung eines schwarzen Hohlraumstrahlers zu beschreiben⁴⁴. Nach dieser Quantenhypothese treten Energien nur in bestimmten Beträgen auf, den sogenannten *Energiequanten*.

Albert Einstein verwendete Plancks Annahme kleinster Energiequanten zur Erklärung des Photoeffekts und stellte die These auf, daß auch Licht nur in Quanten vorkommt, den sogenannten *Photonen*. Dies wurde durch den Compton-Effekt 1927 bestätigt. Niels Bohr verwendete die Quantenhypothese zur Erklärung des Wasserstoffspektrums und anschließend zur Deutung weiterer Atome.

Ein Unterschied zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik besteht darin, daß ein gebundenes Teilchen nicht alle möglichen Energiezustände annehmen kann.

In der klassischen Mechanik ist der Zustand eines Systems durch zwei Paare kanonisch konjugierter Meßgrößen bestimmt. Diese zwei Paare können sein: (Ort x , Impuls p) und (Energie E , Zeit t). Aus dem Impuls ist zwar die kinetische Energie bestimmbar, jedoch nicht die gesamte Energie des Zustandes. Diese Größen können nach der klassischen Theorie beliebig genau gemessen werden, lediglich die Genauigkeit der Meßinstrumente setzten Grenzen. Im Unterschied dazu treten in der Quantenmechanik Gesetzmäßigkeiten auf, die eine beliebig genaue Bestimmung der kanonisch konjugierten Größen verhindern.

(An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß in der Literatur oftmals von der "Genauigkeit der *Messung*" die Rede ist. Da jedoch die Unschärfe eine intrinsische Eigenschaft des Teilchens ist, tritt sie nicht erst im Meßprozeß zu Tage. Anders ausgedrückt: Es gibt gar kein scharfes Teilchen. Das Teilchen ist "von Natur aus unscharf", egal, ob

⁴⁴Planck, Max, *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*, Annalen der Physik, IV, 1901; zitiert in: Segrè, Emilio, *Personaggi é scoperte della fisica contemporanea*, Milano: Mondadori 1996

es gemessen wird, oder nicht. Daher wird hier anstelle von "Messung" der Begriff "Bestimmung" verwendet.)

Es ist demnach unmöglich, eine gewisse Unschärfe in der Bestimmung zu unterschreiten. Dies besagt die *Heisenberg'sche Unschärferelation*:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Das Produkt der Streuungen der beiden kanonisch konjugierten Größen kann einen Mindestwert, der durch das Planck'sche Wirkungsquantum h bestimmt ist, nicht unterschreiten.

Für die Größen x und p bedeutet dies: Je genauer man den Aufenthaltsort eines Teilchens bestimmt, desto ungenauer kann man seinen Impuls bestimmen, und umgekehrt. Für E und t folgt daraus: Will ich in einem Experiment den Energieunterschied zwischen zwei Quantenzuständen messen, so kann die Dauer der Messung nicht beliebig kurz sein, sondern muß mindestens eine untere Schranke in Abhängigkeit vom Energieunterschied ΔE und von h überschreiten. Die Analogie zur Unschärfe von Ort und Impuls ist allerdings nur formal, da Zeit in der Quantenmechanik wie in der klassischen Mechanik ein invarianter Parameter ist und keine Meßgröße im Sinn eines quantenmechanischen Operators.⁴⁵

In der Quantenmechanik gilt das Superpositionsprinzip, was einen entscheidenden Unterschied zur klassischen Mechanik darstellt. Dieses Prinzip besagt, daß die Linearkombination zweier reiner Quantenzustände wieder einen Quantenzustand darstellt. Nach der Theorie von Erwin Schrödinger überlagern sich zwei Quantenzustände wie zwei Wellen und bilden ein Wellenpaket, das wieder einen Quantenzustand darstellt. Selbst wenn die beiden Ausgangszustände definite Werte haben, besitzt die Superposition nur indefinite Werte. Dies sei am Beispiel von Photonen erklärt:

Angenommen, zwei Photonen kommen aus einer Quelle, in der sie einmal einen gemeinsamen Zustand eingenommen haben (also einmal wechselgewirkt haben; z.B. vor einem Zerfallsprozeß) und fliegen in zwei verschiedene Richtungen. Ihr Polaritätszustand werde durch polarisierte Filter bestimmt. Das Superpositionsprinzip besagt nun, daß die beiden Polaritätszustände der bereits getrennten Photonen miteinander korrelieren, auch wenn sie keine physikalische Wechselwirkung miteinander mehr

⁴⁵Vgl. Mainzer, Klaus, *Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit*, München: Beck 1995, Beck'sche Reihe Nr. 2011

haben. Es reicht, daß sie einmal, nämlich in der Quelle miteinander wechselgewirkt haben.

Der Gesamtzustand des Photonenpaares ist durch den Anfangszustand bestimmt. Es genügt also, nur den Zustand eines Photons an einem Polarisationsfilter zu messen, um über das andere Photon Aussagen treffen zu können. Im Vergleich dazu werden zwei aus einer Wurfmachine in verschiedene Richtungen abgeschossene Tennisbälle nach der klassischen Mechanik als zwei separate lokale Zustände betrachtet.

Daß die Superposition der beiden Wellenpakete nur indefinite Werte aufweist, hat Konsequenzen für den quantenmechanischen Meßprozess. Ein Meßinstrument kann nämlich nur definite Werte angeben. Daraus folgt: Zum Zeitpunkt $t=0$ seien beide Photonen in wohldefinierten Zuständen. Zu einem späteren Zeitpunkt $t>0$ gilt wegen des Superpositionsprinzips, daß die Teilzustände nicht mehr separierbar und nur mehr indefinite Werte haben. Trotzdem zeigt der Meßapparat zum Zeitpunkt t einen definiten Meßwert. Dies wird als "Kollaps des Wellenpakets" gedeutet, der Gesamtzustand splittert während der Messung spontan in die separaten Zustände auf.

Hugh Everett hat eine Theorie entwickelt, nach der der durch den Meßakt auftretende Kollaps vermeidbar ist. Er meint, daß die Zustände nie in Teilzustände aufsplintern, sondern daß alle zeitlichen Entwicklungszweige parallel aktualisiert werden. Der Gesamtzustand beschreibt somit eine Mannigfaltigkeit von parallel existierenden Welten ("many-worlds-view").⁴⁶ Die Theorie der *Parallelen Welten* wird in Kapitel Fünf noch einmal behandelt, und zwar als Beispiel für Zeitreisen.

Wie kann nun allgemein der Unterschied zwischen der "Welt aus der Sicht der Quantenmechanik" und der "Welt aus der Sicht der klassischen Mechanik" in Hinblick auf den Zeitbegriff formuliert werden?⁴⁷

⁴⁶Everett, H., "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics, zitiert in: Mainzer, Klaus, Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit, München: Beck 1995, Beck'sche Reihe Nr. 2011, S.128

⁴⁷Vgl. Dürr, H.-P., Wie offen ist die Zeit? Die Verantwortung für unsere Zukunft, in: Weis, Kurt (Hrsg.), Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion, München: dtv 1995, Nr. 1990

Klassische Mechanik

- Es gibt scharfe Zustände der Materie, die zu einem scharfen Zeitpunkt meßbar sind. Die Gegenwart wird durch die gemessenen scharfen Zustände repräsentiert.

- Die scharfen Zustände sind durch Naturgesetze miteinander verknüpft. Somit ist zukünftiges Geschehen, also Zukunft, eindeutig vorhersagbar.

- Die "Schöpfung" der Welt ist quasi abgeschlossen, Naturgeschehen laufen wie ein mechanisches Uhrwerk ab. Die Welt entwickelt sich in zeitlicher Kontinuität und ist zeitlich objektivierbar.

- Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft sind, da sie miteinander deterministisch verknüpft sind, feststehende Tatsachen und stehen von ihrer Existenz her auf der gleichen Stufe.

Quantenmechanik

- Es gibt keine scharfen Zustände der Materie. Die Gegenwart ist nicht eindeutig durch bestimmte Werte repräsentierbar und daher "unscharf". Sie ist vielmehr eine stetige Ausformung vom Möglichen zum Tatsächlichen. Die Bestimmung des Zeitintervalls ist immer mit der entsprechenden Energie verbunden. Die Bestimmung eines "Zeitpunktes" wäre nur unter der Voraussetzung einer unendlichen Energie möglich, was die Bestimmung eines "Zeitpunktes" unmöglich macht.

- Die Naturgesetze haben statistischen Charakter. Zukünftiges Geschehen ist daher nicht determiniert sondern offen.

- Die Welt ereignet sich in jedem Augenblick neu und läßt sich nicht streng aus der Summe ihrer Teilzustände deuten. Der Endzustand ist nicht vorherbestimmbar.

- Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft sind nicht absolut konstruierbar und somit nicht deterministisch miteinander verknüpft.

Es gibt also zwischen der klassischen Theorie und der Quantentheorie grundsätzliche Unterschiede, vor allem den Begriff der *Gegenwart* betreffend. Aber: Sobald die Wellenfunktion zu einem Anfangszeitpunkt bekannt ist, kann man nach der Quanten-

mechanik ihren Wert für alle vergangenen und alle zukünftigen Zeitpunkte berechnen. Somit ist die Schrödinger-Gleichung ebenso deterministisch wie eine klassische Bewegungsgleichung⁴⁸. Beiden Theorien ist also gemeinsam, daß sie nicht explizit einen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft machen, die Zeit ist *symmetrisch*.

6. ZEITASYMMETRIE

6.1. Reversibilität - Irreversibilität

Menschen nehmen die Natur zeitgerichtet war. So zählen zum menschlichen Erfahrungsschatz viel mehr Beobachtungen von irreversiblen Vorgängen als von reversiblen. Eines der besten Beispiele ist der Tod, der immer ein Leben beendet und niemals am Anfang eines Lebens steht. In der folgenden Tabelle sind als Beispiel reversible und irreversible Vorgänge angeführt.⁴⁹

<i>Reversible Zeit t_r</i> (periodische, zyklische Systeme)	<i>Irreversible Zeit t_i</i> (evolutionäre, einmalig ablaufende Systeme)
Atome	Supernova
Planetensysteme	Vulkanismus
Pulsare	Lawinen
Tag und Nacht	Mutationen
Ebbe und Flut	Evolution
Jahreszeiten	Geburt
Zellteilung	Krankheit
Schlafrhythmus	Altern
Herzrhythmus	Tod
Menstruationszyklus	Geschichte

⁴⁸Vgl. Prigogine, Ilya, *Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*, München: Piper 1979, S.145

⁴⁹Vgl. Cramer, Friedrich, *Der Zeitbaum. Grundlegung einer allgemeinen Zeittheorie*, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1993, S.246

Stoffwechsel	Revolution
Rituale	Wissen
Generationen	Kunst
Fahrpläne	Ideen

Es stellt sich die Frage, wieso gerade jene äußere bzw. reversible Zeit sich als Zeitbegriff durchgesetzt hat, wo doch der menschlichen Erfahrung nach die Zeit irreversibel ist? Die Schrödingergleichung ist, ebenso wie die Newton'schen und die Einsteinschen Gleichungen, zeitsymmetrisch. Sie unterscheiden mathematisch nicht zwischen Vergangenheit und Zukunft⁵⁰. Aus Sicht der klassischen Physik ist die Zeitasymmetrie scheinbar. Es müßten nur jene Prozesse, die im mikroskopischen Bereich stattfinden, vollkommen entschlüsselt werden, dann wäre eine zeitsymmetrische Theorie, die auch die "scheinbare" Zeitasymmetrie erklärt, gefunden.

Für Aristoteles war die Physik noch die Wissenschaft von *Prozessen*. Galilei und andere Mitbegründer/innen der modernen Physik suchten hingegen exakte mathematische Ausdrucksweise, und das einzige, was sich präzise, exakt mathematisch ausdrücken ließ, war die Veränderung des Bewegungszustandes, die Beschleunigung. Von da an wurde die physikalische Zeit mit der in der Bewegung auftretenden Zeit gleichgesetzt, die Zeit wurde zu einem Parameter, der von den Veränderungen unabhängig ist. Hauptziel der Physik war es, die Gesetze der Dynamik zu finden, und zwar im Mikroskopischen wie im Makroskopischen. Der Newtonschen Physik wurden dabei durch zwei Universalkonstanten Grenzen gesetzt:⁵¹

Im mikroskopischen Bereich durch das Planck'sche Wirkungsquantum h :

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$$

Im makroskopischen Bereich durch die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c :

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$$

⁵⁰Zur Beweisführung der Zeitsymmetrie der Schrödingergleichung siehe: Frauenfelder, Hans, Henley, Ernest M., *Teilchen und Kerne. Subatomare Physik*, München, Wien: R. Oldenbourg Verlag 1979, Kap. 9.5

⁵¹Prigogine, Ilya, *Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*, München: Piper 1979, S.27

Es entwickelten sich daraus neue Formen der Dynamik: die Quantenmechanik und die relativistische Mechanik. Obwohl durchaus revolutionär übernahmen diese neuen Formen jedoch von der Newtonschen Physik das Ideal einer statischen Welt, einer Welt des *Seins* ohne *Werden*⁵², in der eine äußere Zeit gilt, die der Newtonschen Zeit entspricht. Ilya Prigogine unterscheidet demgemäß die "Physik des Seins" und einer "Physik des Werdens".

Wolfgang Kaempfer hat den "zweifachen Charakter der Zeit" in irreversibel, also ein *System verändernd*, und reversibel, ein *System stabilisierend*, dargestellt. Bezugnehmend auf lebende Systeme schreibt Kaempfer: "Obgleich begrenzt und kurz, ist ihre Lebenszeit verhältnismäßig sehr viel langsamer als die mehr oder minder kurzen Rhythmen, über die sie ihre Stabilität sichern (Atmung und Blutkreislauf, etc.)."⁵³ Im Weiteren spricht Kaempfer von der "Dilatation" zwischen t_r und t_i , die laut Kaempfer beliebig sein kann.

Meiner Meinung nach ist dies folgendermaßen zu interpretieren: In der irreversiblen Zeit passieren Veränderungen, die das jeweilige lebendige System betreffen, viel langsamer als in der reversiblen Zeit. Anders ausgedrückt: Die Veränderungen in der irreversiblen Zeit sind für das lebendige System erst nach einem viel größeren Zeitraum merkbar bzw. spürbar. So zum Beispiel passiert die Volumsänderung der Lunge beim Atmen für den Menschen schneller als etwa der Genesungsprozeß bei einer Krankheit. Aber nicht nur die Geschwindigkeit der Veränderung ist für die Unterteilung in reversible und irreversible Zeit heranzuziehen. So etwa bedeutet das Ausschütten einer vollen Kaffeetasse eine ebenfalls sehr rasche Volumsänderung, eindeutig der irreversiblen Zeit zuzurechnen. Der grundlegende Unterschied zwischen t_r und t_i ist meiner Meinung nach nicht in der Veränderungsgeschwindigkeit (langsam/schnell) sondern in der *Stabilitätssicherung* bzw. *Veränderung* des Systems zu suchen. Für uns als lebende Individuen erscheint das Ausschütten einer Kaffeetasse nicht als unser Lebenssystem sichernd (im weitesten Sinn), jedoch der tägliche Erdumlauf um die Sonne sehr wohl. Außerdem fehlt der irreversiblen Zeit der rhythmische Charakter, den Kaempfer der reversiblen Zeit zuspricht (siehe Zitat oben). Hier muß jedoch der Rhythmus als solcher für das Lebewesen erkennbar sein. Im Fall vom Menschen muß also die Periodendauer in irgendeiner Form rekonstruiert werden können (durch Beobachtung oder Berechnung).

⁵²Prigogine, Ilya, *Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*, München: Piper 1979, S.28

⁵³Kaempfer, W., *Die Zeit und die Uhren*, zitiert in: Cramer, Friedrich, *Der Zeitbaum. Grundlegung einer allgemeinen Zeittheorie*, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1993, S.61

Die Unterscheidung zwischen einer *inneren* und einer *äußeren Zeit* eines Systems sei in der folgenden Gegenüberstellung veranschaulicht⁵⁴:

Innere Zeit

- Es gibt einen Zeitpfeil, die Vorgänge sind irreversibel. Prigogine bezeichnet dies als die *Physik des Werdens*.
- Die irreversible Zeit verändert ein System.
- Vergangenheit und Zukunft sind durch ein Intervall getrennt, eine Übergangsschicht, die eine charakteristische Größe hat. Man kann also von der Dauer der Gegenwart sprechen.
- Die Gegenwart enthält Beiträge aus der Vergangenheit und aus der "nahen" Zukunft. Das heißt, der Zustand eines Systems in ferner Zukunft ist aus dem gegenwärtigen Zustand nicht vorhersagbar.

Äußere Zeit

- Die Vorgänge sind reversibel; die Zeit entspricht im wesentlichen der newtonschen Zeit. Prigogine bezeichnet die Physik, die der äußeren Zeit entspricht, als die *Physik des Seins*.
- Die reversible Zeit stabilisiert ein System.
- Die Zeit ist eine isomorphe Gerade, die sich von der fernen Vergangenheit in die ferne Zukunft erstreckt. Die Gegenwart ist lediglich ein Punkt, zwischen Vergangenheit und Zukunft gibt es keinerlei Abstand.
- Die Gegenwart schließt sowohl Vergangenheit als auch Zukunft ein.

Wie innere und äußere Zeit miteinander in Beziehung stehen, ist unklar.

In unterschiedlichen Bereichen der Physik und der menschlichen Wahrnehmung gibt es Hinweise auf eine Gerichtetheit der Zeit, auf einen sogenannten *Zeitpfeil*. Aus physikalischer Sicht stellt sich dabei die Frage, an welchem Punkt ein System, das im

⁵⁴Vgl. Prigogine, Ilya, *Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*, München: Piper 1979, S.244f

Mikroskopischen mit zeitsymmetrischen physikalischen Formeln beschreibbar ist, plötzlich eine zeitassymmetrische Entwicklung einschlägt.

Wie kann eine Zeitrichtung auf Basis der zeitsymmetrischen Naturgesetze physikalisch formuliert werden?

Im Folgenden werden sieben Bereiche der Natur besprochen, in denen eine zeitliche Gerichtetheit deutlich wird.

6.2. Die sieben Pfeile der Zeit

1. Der thermodynamische Zeitpfeil

Anfang des 19. Jahrhunderts, mit der Entwicklung der Dampfmaschine, war es von wirtschaftlichem und somit auch physikalischem Interesse, über die *Wärme* bescheid zu wissen. Wie schnell erwärmt sich ein Körper? Warum kühlt er wieder ab? Wie kann man Energieformen ineinander übertragen? Als Antworten auf diese und ähnliche Fragen wurden zwei wichtige physikalische Gesetze gefunden:⁵⁵

Erster Hauptsatz der Thermodynamik:

Wärme und andere Energien gehen nicht verloren (z.B. beim Abkühlen) sondern werden ineinander umgewandelt.

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik:

Die Umwandlungsmöglichkeiten der Energien sind eingeschränkt.

Es ist unmöglich, Wärme ohne Verluste von einem niedrigeren auf ein höheres Temperaturniveau zu heben.

(Anders ausgedrückt: Wärme fließt "bergab".)

Am Beispiel einer Dampfmaschine bedeutet dies, daß sie nie, auch wenn sie noch so gut isoliert ist, die Wärme vollständig in mechanische Energie umwandeln kann. Ist nur ein bestimmter Vorrat an Ausgangsenergie vorhanden, so würde der Gang der Maschine allmählich abebben und schließlich stillstehen. Als Maß für den Energieverlust sei der Begriff *Entropie* eingeführt.

Aus der Beobachtung des Vorgangs sind zwei Merkmale beachtenswert:

⁵⁵Vgl. Cramer, Friedrich, *Der Zeitbaum. Grundlegung einer allgemeinen Zeittheorie*, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1993, S.42f

1. Die Ausgangsenergie nimmt mit jedem Kolbenschub ab (Energieverlust!). Der Vorgang kann also nicht rückwärts laufen!
2. Somit ist die Entropie nicht nur ein Maß für den Energieverlust, sondern auch ein Maß für die Nichtumkehrbarkeit von Vorgängen, für deren *Irreversibilität!* Damit wird die Entropie zu einem Zeitmaß, und zwar für die *Nichtumkehrbarkeit der Zeit*.

Mathematisch kann dies folgendermaßen formuliert werden:

$$dS \geq dQ/(T_2 - T_1)$$

dS ... Entropiedifferenz zwischen zwei nahe benachbarten Zuständen

dQ ... Wärmeenergie, die das System beim Übergang zwischen den Zuständen aufnimmt oder abgibt

T_1 ... Temperatur von Körper 1

T_2 ... Temperatur von Körper 2

Das Gleichheitszeichen gilt, wenn der eine Zustand reversibel in den anderen Zustand übergeführt wird.

Entropie wird auch häufig gleich gesetzt mit dem Grad der Unordnung. Dazu meint Ilya Prigogine, daß Entropiezunahme nicht unbedingt steigende Unordnung bedeuten muß. Mit Ordnung assoziiert man einen Zustand des Gleichgewichts, wie z.B. im Fall der Kristalle. Mit Unordnung wird ein Zustand des Ungleichgewichts verbunden, wie z.B. Turbulenzen. Tatsache ist, daß Turbulenzen ein höchst strukturiertes Phänomen ist, in dem Millionen Teilchen sich höchst kohärent bewegen.⁵⁶ Prigogine bewies, daß auch bei irreversiblen Prozessen geordnete Strukturen entstehen können. Dies ist evolutionstheoretisch von Bedeutung, weil dadurch der erste Schritt zur naturwissenschaftlichen Erklärung von "Leben", also dem Übergang von toter zu lebender Materie, gegeben ist.

Einerseits steigt also mit der Zeit in allen Systemen die Entropie, was Irreversibilität bedeutet. Andererseits liegen allen irreversiblen Vorgängen elementare Phänomene zugrunde (mechanische, elektromagnetische, etc.), die wiederum reversibel sind. Es stellt sich daher die Frage: Ab welchem Punkt wird ein System irreversibel? Was gibt den Ausschlag?⁵⁷

⁵⁶Prigogine, Ilya, *La nascita del tempo. Le domande fondamentali sulla scienza dei nostri giorni*, Milano: Bompiani 1998, S.42

⁵⁷Segrè, Emilio, *Personaggi é scoperte della fisica contemporanea*, Milano: Mondadori 1996, S.63

Ludwig Boltzmann versuchte als einer der ersten, die Irreversibilität der Zeit physikalisch auszudrücken. Für die Beschreibung der Entropie verwendete er sowohl Begriffe aus der klassischen Dynamik wie auch aus der Wahrscheinlichkeitstheorie. Dies stieß auf heftigen Widerstand, da man bis dahin die Auffassung vertrat, physikalische Vorhersagen seien exakt und nicht statistisch. Außerdem wurde die Existenz einer Zeitrichtung als "subjektive" Empfindung abgetan. Sie war durch die klassische und relativistische Dynamik nicht faßbar und wurde somit physikalisch nicht behandelt. Albert Einstein schrieb dazu: "Der Unterschied zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ist für uns Wissenschaftler eine Illusion, wenn auch eine hartnäckige."⁵⁸ Nach Boltzmann folgt der 2. Hauptsatz nicht allein aus der Mechanik, sondern aus der zusätzlichen Annahme, daß die Anfangsbedingung einen sehr unwahrscheinlichen Zustand darstellt und daher in weiterer Folge einem wahrscheinlicheren Zustand zustrebt.

Was soll man sich unter der *Wahrscheinlichkeit eines Zustandes* vorstellen?

Ein makroskopischer Zustand (z.B. Druck, Temperatur) wird durch eine große Anzahl von mikroskopischen Zuständen verwirklicht. Ein Makrozustand ist umso wahrscheinlicher, je mehr Möglichkeiten es gibt, ihn herzustellen, also je mehr Variationsmöglichkeiten an Mikrozuständen bestehen.

Wahrscheinlichkeit W und Entropie S eines Zustandes hängen folgendermaßen zusammen:

$$S = k \ln W$$

k ... Boltzmann-Konstante; $k = 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

Da die Entropie eine additive Größe und daher eine additive Zustandsfunktion gesucht ist, die Wahrscheinlichkeit jedoch eine multiplikative Größe ist, besteht zwischen beiden Größen ein logarithmischer Zusammenhang. Höhere Entropie bedeutet demnach größere Wahrscheinlichkeit. Ein System hört erst dann auf, seinen Zustand zu ändern, wenn es den Zustand mit der maximalen Wahrscheinlichkeit erreicht hat.⁵⁹ Dann befindet es sich im Gleichgewicht. Es sind auch Abweichungen vom Gleichgewicht, sogenannte Fluktuationen möglich. Boltzmanns Fluktuationstheorie geht davon aus, daß sich das gesamte Universum im thermischen Gleichgewicht befindet, also maximale Entropie besitzt. In diesem Zustand ist keine Zeitrichtung ausgezeich-

⁵⁸Einstein, Albert, zitiert in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit? Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990, S.169

⁵⁹Vgl. Gerthsen, Ch., Kneser, H.O., Vogel, H., *Physik*, 16. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer 1989, S.225

net, die Zeit ist symmetrisch. In Gebieten der Raumzeit treten jedoch lokale Fluktuationen auf, also Abweichungen vom Gleichgewichtszustand.⁶⁰ Diese Gebiete streben dem Gleichgewicht zu, was eine Auszeichnung der Richtung der Zeit bedeutet. Wir befinden uns somit in einem Zustand des Nicht-Gleichgewichts hervorgerufen durch eine Entropiefluktuation.

Außer dem thermodynamischen Zeitpfeil gehen aus theoretisch-physikalischen Überlegungen noch andere Pfeile der Zeit hervor, die im Folgenden kurz dargestellt werden:

2. Ausdehnung des Kosmos

Unser Universum befindet sich in einer Ausdehnungsphase. Kosmologen, wie John A. Wheeler vertreten die Meinung, daß der Ausdehnungsphase eine weitere Kontraktionsphase folgen wird, in der das Universum sich wieder zusammenzieht und in einem "Big Crash" (als Pendant zum "Big Bang") endet. Es stellt sich die Frage, ob in einem solchen Universum die Zeit sich ebenfalls umkehren würde und plötzlich rückwärts liefe. Was hätte diese Zeitumkehr für Konsequenzen? Die beindruckendste und gleichermaßen schockierendste Konsequenz wäre, daß Tote auferstehen und am "Ende" ihres Lebens im Mutterleib verschwinden würden.⁶¹

3. Schwarze Löcher - Weiße Löcher

Ebenfalls aus der Kosmologie kommt jener Zeitpfeil, der aus der Spiegelbildlichkeit von Weißen und Schwarzen Löchern folgen würde. (Schwarze Löcher werden ausführlich in Kapitel Fünf behandelt. Daher wird hier von einer genaueren Erklärung abgesehen.)

Die Überlegung ist die, daß, wenn das Universum keinen Unterschied zwischen Vorwärts- und Rückwärtsrichtung der Zeit machen würde, dann genauso viele Weiße wie Schwarze Löcher existieren müßten. Aber obwohl die Existenz Schwarzer Löcher durch verschiedene Beobachtungen schon mehr oder weniger bestätigt wurde, gibt es keinerlei Anzeichen im Universum auf die Existenz Weißer Löcher. Im Gegensatz zu Schwarzen Löchern sind Weiße Löcher viel unbegreifbarer. Der Grund hierfür liegt in der Singularität, dem Zentrum eines Schwarzen und Weißen Lochs, einem Punkt mit unendlich großer Dichte, in dem die bekannten physikalischen Gesetze versagen. Im Falle des Schwarzen Lochs fällt alles in die Singularität hinein. Selbst Licht kann nicht

⁶⁰Vgl. Mainzer, Klaus, *Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit*, München: Beck 1995, Beck'sche Reihe Nr. 2011, S.78f

⁶¹Rothman, Tony, *Die sieben Pfeile der Zeit*, Wissenschaftsessay in: *Zeitmagazin*, Hamburg: Zeitverlag

entweichen. Daher ist das Zentrum eines Schwarzen Lochs für das ganze Universum unsichtbar. Aus dem Weißen Loch müßte hingegen alles herauskommen und sein Zentrum müßte überall hin sichtbar sein. Alles könnte plötzlich erscheinen, Fernsehapparate, Äpfel, Menschen, jedes Wesen, jeder Gegenstand. Roger Penrose findet ein solches Verhalten derart unerklärbar, daß er vorgeschlagen hat, Weiße Löcher einfach physikalisch zu verbieten.⁶² Würde die Natur Schwarze Löcher zulassen, Weiße jedoch nicht, so wäre das die Auszeichnung einer Zeitrichtung und somit ein Zeitpfeil.

4. Der elektromagnetische Zeitpfeil

Nach der Theorie des Elektromagnetismus, die von James C. Maxwell in den Maxwell'schen Gleichungen formalisiert wurde, gibt es keine ausgezeichnete Richtung der Zeit und "zeitverkehrtes" (in unserem Sinne) Verhalten müßte durchaus möglich sein. Zur Veranschaulichung sei eine Analogie aus der mechanischen Wellentheorie betrachtet. Jede/r konnte schon beobachten, daß, wenn man einen Stein ins Wasser wirft, sich mit der Zeit konzentrische Kreise ausbreiten. Demgemäß breiten sich von einer Antenne elektromagnetische Wellen in alle Richtungen des Raums aus. Es würde aus Erfahrung und weil wir uns an unseren Zeitpfeil gewöhnt haben, unserem Zeitempfinden völlig widersprechen, wenn die Wasserwellen plötzlich zusammenliefen und in einem Punkt verschwänden. Daß dies nicht möglich ist, wird durch den thermodynamischen Zeitpfeil zu erklären versucht. Tatsache ist, daß sich noch niemals beispielsweise Radiowellen so benommen hätten, daß sie zur Antenne zurücklaufen. Es muß also hier eine Gerichtetheit der Zeit vorliegen, und zwar ein elektromagnetischer Zeitpfeil.

5. Symmetriebrechung in der Quantenmechanik

Die Gleichungen der Quantenmechanik sind bis zu jenem Punkt zeitsymmetrisch, an dem eine Messung durchgeführt wird. Der Zustand eines Systems wird bis dahin charakterisiert durch Wahrscheinlichkeiten. Die Zeitsymmetrie bricht im Lauf der Messung zusammen, und zwar ohne irgendeinen Hinweis, daß dieser Vorgang auch wieder rückwärts verlaufen könnte. Es tritt also eine Symmetriebrechung auf, quantenmechanische Vorgänge sind nicht umkehrbar.

⁶²Penrose, Roger, zitiert in: Rothman, Tony, *Die sieben Pfeile der Zeit*, Artikel in: Zeitmagazin, Hamburg: Zeitverlag

6. Zerfall von Kaonen

Den letzten hier bekannten physikalischen Zeitpfeil stellt der Zerfall von neutralen Kaonen dar. Dies sind subatomare instabile Teilchen, die, wie alle anderen instabilen Teilchen, mit einer bestimmten Halbwertszeit zerfallen. Bis in die Sechzigerjahre hatte man allgemein angenommen, daß der Partikelzerfall in beide Zeitrichtungen immer im gleichen Tempo vor sich ginge. Die Physiker Val Fitch und James Cronin konnten jedoch demonstrieren, daß Kaonen in einem zeitverkehrten Universum mit einem winzigen Zeitunterschied zerfallen würden. Dies würde bedeuten, daß es für Kaonen keine Symmetrie der Zeitrichtung gäbe. Im Gegensatz konnte berechnet werden, daß radioaktive Elemente wie Uran, Thorium oder Radon in alle Zeitrichtungen gleich schnell zerfallen würden.

7. Der psychische Zeitpfeil

Der Vollständigkeit halber sei hier noch einmal der psychische Zeitpfeil erwähnt, der schon in Kapitel Zwei besprochen wurde. Dieser Zeitpfeil äußert sich vor allem darin, daß wir uns an die Vergangenheit, jedoch nicht an die Zukunft erinnern können. Selbst im Prozeß des Sich-Erinnerns wird immer in Vorwärtsrichtung der Zeit gedacht. In diesem Sinne möchte ich das dritte Kapitel beschließen und zu den physikalischen Zeitreisetheorien "vorschreiten".

KAPITEL VIER

ZEITREISE MITTELS ZEITDILATATION

Alexander Leidenfrost,
City of the Future (Rush Hour), um 1949

Physikalische Theorien zu Zeitreisen

In diesem und den folgenden Kapiteln werden physikalische Möglichkeiten für Zeitreisen erörtert. Manche dieser Zeitreisen sind beobachtbar bzw. können realisiert werden (Zeitdehnung der Lebenszeiten von Teilchen, "Beamen" von Teilchen), andere sind zwar theoretisch physikalisch möglich (d.h. sie stellen Lösungen der relativistischen und der quantentheoretischen Gleichungen dar), konnten aber noch nicht beobachtet bzw. durchgeführt werden (Wurmlöcher, Reisen in parallele Universen).

Die physikalisch möglichen Zeitreisen sind grob in zwei Gruppen einteilbar:

1. Zeitreisen, die durch Zeitdehnungseffekte (Zeitdilatation) hervorgerufen werden.

Hierbei bleibt das Raumzeitkontinuum als solches erhalten. Aufgrund von Relativbewegung oder durch Anwesenheit eines Gravitationsfeldes werden jedoch in einem Bezugssystem zeitliche und räumliche Maßstäbe relativ zu einem anderen Bezugssystem verändert. (Kapitel Vier)

2. Zeitreisen, die durch Zeitsprünge bzw. Zeittunnel stattfinden.

Hierbei werden sogenannte Risse oder Löcher im Raumzeitkontinuum dazu genützt, um aus dem gegenwärtigen Raumzeitkontinuum "auszureisen". Der raumzeitliche Punkt der Ankunft liegt entweder im selben Raumzeitkontinuum, aber sehr weit entfernt oder in einem anderen Raumzeitkontinuum (wie im Fall der Reise durch ein Wurmloch bzw. in parallele Universen). Aufgrund der zentralen Rolle des Schwarzen Lochs im Zusammenhang mit diesen Zeitreisen werden auch Entstehung und Charakteristika von Schwarzen Löchern behandelt. (Kapitel Fünf)

Eine dritte Gruppe bilden jene (Zeit-)Reisen, deren Möglichkeit sich aus der Quantentheorie, und nicht aus der Relativitätstheorie ergibt:

3. Reisen mit Überlichtgeschwindigkeit - "Beamen" (Kapitel Sechs)

Grundlegend für die Entwicklung jener physikalischen Lösungen, die als Zeitreisen bezeichnet werden können, ist die Physik der Allgemeinen und Speziellen Relativitätstheorie, der Kosmologie und der Quantentheorie. In diesen physikalischen Disziplinen und gerade bei einem Thema wie Zeitreisen müssen oft Lösungen akzeptiert werden, die völlig dem menschlichen "Hausverstand" widersprechen. Die Wissenschaftler/innen, an denen es ist, die vorerst rein mathematischen Ergebnisse etwa als Möglichkeiten für Zeitreisen zu interpretieren, müssen deshalb nicht nur über umfassendes Wissen in ihrem Fach, sondern auch über jene erforderliche Phantasie und Offenheit verfügen, um "Undenkbares" zu denken.

Zeitdilatation allgemein

Als Zeitdilatation wird eine *Verlangsamung des Zeitflusses* verstanden.¹

Zur Feststellung dieser Verlangsamung bedarf es des Zeitenvergleichs zweier irgendwann einmal synchronisierter und exakt gehender Uhren. Ich werde im Folgenden von Uhren sprechen, wobei die Uhren die Zeit des jeweiligen Inertialsystems repräsentieren, in dem sie sich befinden.

Zeitdilatation zeigt sich darin, daß eine Uhr trotz ihres exakten Ganges langsamer geht, also weniger verstrichenen Zeit anzeigt, als die Vergleichsuhr. Dieser Effekt kann auf zwei verschiedene Arten zustande kommen:

1. Die beiden Inertialsysteme sind gegeneinander mit gleichförmiger Relativgeschwindigkeit bewegt.

2. Die beiden Uhren befinden sich in einem Gravitationsfeld, und zwar in unterschiedlicher Entfernung zur Zentralmasse.

Als eigener Punkt wird das Uhrenproblem (Zwillingsparadoxon) behandelt, da es als Beispiel sowohl zur Speziellen als auch zur Allgemeinen Relativitätstheorie zählt:

3. Das Uhrenproblem (Zwillingsparadoxon).

Die Zeitdilatation wurde in Kapitel Drei bereits formal hergeleitet. Deshalb möchte ich im Folgenden von den Herleitungen absehen und nur mehr die formalen Schlüsse anführen.

¹Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.647

1. GLEICHFÖRMIG BEWEGTE SYSTEME

Vom Standpunkt der ruhenden Uhr aus geht die bewegte Uhr langsamer. Bei Relativgeschwindigkeiten, die gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit nicht vernachlässigbar sind, ist der Zeitdilatationseffekt besonders deutlich. Daher werde ich Beispiele mit hohen Geschwindigkeiten anführen. Mir scheint jedoch ebenso interessant, zum Vergleich die Zeitdilatation für kleinere Geschwindigkeiten, wie etwa jene aus unserem Alltag, zu berechnen. Daraus wird auch ersichtlich, weshalb die physikalische Zeitdilatation nicht zu unserer Sinneserfahrung gehört.

Im Fall der gleichförmigen Relativbewegung wird die Zeitdilatation durch die Spezielle Relativitätstheorie erklärt. Die Anwesenheit von Masse wird vernachlässigt. Die bewegte Uhr zeigt eine um den Faktor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ kleinere Zeit t_b an als die Zeit der ruhenden Uhr t_r :

$$t_b = t_r \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Hier muß wieder betont werden, daß im Sinne des Relativitätsprinzips sowohl die eine als auch die andere Uhr als ruhend angenommen werden kann, da ihre Relativbewegung eine gleichförmige ist. Der Zeitdilatation ist daher symmetrisch, also die als bewegt angenommene Uhr wird immer ein langsames Verstreichen von Zeit anzeigen.

Werden in diesem Beispiel biologische Uhren angenommen, und der Mensch ist in diesem Sinne eine biologische Uhr, dann könnte sich die Lage folgendermaßen darstellen: In jedem der beiden Inertialsysteme befindet sich ein/e Beobachter/in. Beide Beobachter/innen sind in Besitz von besonders guten Teleskopen, die einen scharfen Blick auf den/die jeweils andere/n gestatten. Der/Die eine Beobachter/in wird durch das Teleskop feststellen, daß sich der/die andere Beobachterin ungewöhnlich langsam, wie in Zeitlupe bewegt und daß die Alterungsprozesse wie Wachsen der Haare, Faltenbildung, etc. auch viel langsamer als im eigenen Bezugssystem vor sich gehen. Jede/r nimmt also die/den andere/n als jünger wahr.

Außerdem wird der/die eine Beobachter/in feststellen, daß der/die andere Beobachter/in in Richtung ihrer Bewegung ungewöhnlich schlank ist und auch alle Gegenstände viel schmaler sind. Die Größe der Person normal zur Bewegungsrichtung und die Höhe der Wände und der Gegenstände sind dagegen gleich wie im eigenen Bezugssystem. Dies ist auf die relativistische Längenkontraktion in Bewegungsrichtung

zurückzuführen. Längenmaßstäbe sind in Bewegungsrichtung um den Faktor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ verkleinert.

$$l_b = l_r \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Normal zur Bewegungsrichtung sind die Maßstäbe hingegen gleich wie im ruhenden Bezugssystem.

Meiner Meinung nach ist der durch gleichförmige Relativbewegung hervorgerufene Effekt der Zeitdilatation an sich noch nicht als Zeitreise zu bezeichnen. Es gibt zwar unterschiedliche Zeitverläufe, aber die Uhren bzw. die Beobachter/innen sind und bleiben in ihren eigenen Inertialsystemen und verfügen somit nie über eine gemeinsame Gegenwart, ein gemeinsames Jetzt.

Als Zeitreise wäre zu bezeichnen, wenn sich die Uhren, nachdem sie sich zuvor in zwei verschiedenen Inertialsystemen befunden haben, wieder in einem Inertialsystem treffen, aber unterschiedliche Zeiten anzeigen (siehe *Zwillingsparadoxon* weiter unten).

Ein in der Realität zu findendes Beispiel für die durch gleichförmige Relativbewegung entstehende Zeitdilatation ist die Lebensdauer von Myonen.

Myonen

Myonen sind Teilchen, die beim Zerfall von instabilen π -Mesonen erzeugt werden. Myonen ähneln in ihren Eigenschaften den Elektronen, allerdings ist ihre Masse 207 mal größer. Da Myonen instabile Teilchen sind, zeigen sie Eigenschaften ähnlich dem radioaktiven Zerfall von Elementen. So gilt für Myonen ein exponentielles Zerfallsgesetz und es ist eine Halbwertszeit bestimmbar, nach der nur mehr die Hälfte der zu Beginn festgestellten Myonen "leben".

$$N(t) = N_0 \cdot 0.5^{t/T_0}$$

$N(t)$...Anzahl der Myonen, die nach der Zeit t noch vorhanden sind

N_0 ...Ursprüngliche Anzahl der Myonen

t ...verstrichene Zeit

T_0 ...Halbwertszeit; jene Zeit, nach der nur mehr die Hälfte der Myonen leben

Das "Leben" eines Myons endet mit dem Zerfall in ein Elektron und zwei Neutrinos. Das beim Zerfall ausgesandte Elektron wird mit Geigerzählern oder in Blasenkam-

mern registriert. Auf diese Weise kann der Zerfall der Myonen und ihre Lebenszeit experimentell überprüft werden.

Myonen werden als Folge der kosmischen Strahlung laufend im äußersten Bereich der Atmosphäre gebildet. Bereits in den Vierzigerjahren wußte man aus Laborexperimenten, daß die Halbwertszeit T_0 der ruhenden Myonen sehr kurz ist, etwa $1.52 \mu\text{s}$, zu kurz, um aus den Regionen der hohen Atmosphäre bis zur Erdoberfläche "lebend" zu gelangen. Praktisch alle Myonen müßten nach einer solchen Strecke, etwa 20 km, schon längst zerfallen sein. Myonen bewegen sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit, also 300000 km/s.

In $1.52 \mu\text{s}$ sollten sie also höchstens einen Weg von 456 m zurücklegen können. Trotzdem können Myonen an der Erdoberfläche registriert werden. Wie kann dies möglich sein?

a) Die Erde ruht, die Myonen sind bewegt:

Um dieser Frage genauestens nachzugehen, wurden im Kernforschungszentrum CERN Experimente mit Myonen durchgeführt. Die erzeugten Myonen wurden unter dem Einfluß eines Magnetfeldes in einem Speicherring bewegt, und zwar mit annähernd Lichtgeschwindigkeit: $v=0.99942c$

Nach den Voraussagen der Speziellen Relativitätstheorie sollte unter diesen Bedingungen die Halbwertszeit T_b der bewegten Myonen durch die Zeitdilatation auf einen höheren Wert ansteigen.

$$T_0 = 1.52 \mu\text{s}$$

$$T_b = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1.52 \mu\text{s}}{\sqrt{1 - \frac{(0.99942)^2}{1}}}$$

$$T_b = 44.6 \mu\text{s}$$

Der Zeitdilationsfaktor ergibt sich folgendermaßen:

$$\frac{T_b}{T_0} = \frac{44.6 \mu\text{s}}{1.52 \mu\text{s}} = 29.3$$

Dieser Befund wurde auch experimentell festgestellt. Während nach $10\mu\text{s}$ fast alle ruhenden Myonen bereits zerfallen sind, kreisen nach derselben Zeit noch etwa 85% der bewegten Myonen im Speicherring.

In **Abb.IV.1** ist der Zerfallskurve der Myonen dargestellt.

Hätten die in der hohen Atmosphäre erzeugten Myonen genau diese Geschwindigkeit von $0,99942 c$, würden sie für eine Strecke von 20 km die Zeit t benötigen:

$$t = \frac{20 \text{ km}}{0,99942 \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}} = 66,7 \mu\text{s}$$

Nach dieser Zeit kann nach der exponentiellen Zerfallsrate noch folgende Myonenanzahl registriert werden:

$$N(t) = N_0 \cdot 0,5^{\frac{66,7 \mu\text{s}}{44,6 \mu\text{s}}} = N_0 \cdot 0,35$$

Als Halbwertszeit wurde jener Wert der bewegten Myonen $T_b = 44,6\mu\text{s}$ verwendet, da die Erde ruht und das Myonensystem sich bewegt.

Das Ergebnis besagt, daß etwa 35% der ursprünglichen Myonen die Erde erreichen.

b) Die Myonen befinden sich in Ruhe, die Erde ist bewegt:

Nach der Speziellen Relativitätstheorie müßte das Myonenbeispiel sich auch reziprok darstellen lassen können, sodaß die Myonen als ruhend angenommen werden und die Erdoberfläche mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf sie zurast. Aus Sicht des Bezugssystems der Myonen wäre nicht nur feststellbar, daß die irdischen Zeitmaßstäbe gedehnt würden (ganz analog wie im umgekehrten Fall mit dem gleichen Zeitdilatationsfaktor). Auch die Längenmaßstäbe des Erdsystems in Bewegungsrichtung sind verkürzt, und somit auch die Höhe der Atmosphäre!

Bei 0,99942facher Lichtgeschwindigkeit würden sich die Maßstäbe nach der Lorentzkontraktion folgendermaßen kürzen:

$$l_r = 20 \text{ km}$$

$$l_b = l_r \sqrt{1 - v^2/c^2} = 20 \text{ km} \sqrt{1 - 0.99942^2/1}$$

$$l_b = 681 \text{ m}$$

Aus Sicht des Myons ist die Erdoberfläche also 681m entfernt. Da die Erde mit nahezu c auf das Myon zurast, entspricht diesem Weg die Zeit t :

$$t = \frac{681 \text{ m}}{0.99942 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2.27 \mu\text{s}$$

Nach dieser Zeit t treffen $N(t)$ Myonen auf die Erde auf. Dies läßt sich folgendermaßen berechnen:

$$N(t) = N_0 \cdot 0.5^{\frac{2.27 \mu\text{s}}{1.52 \mu\text{s}}} = N_0 \cdot 0.35$$

Als Halbwertszeit wurde die Ruhehalbwertszeit von $1.52 \mu\text{s}$ verwendet, weil die Myonen sich ja im Ruhesystem befinden und die Erde sich bewegt..

35% der Myonen N_0 erreichen also die Erdoberfläche. Dieser Wert stimmt mit dem unter der Annahme der Myonenbewegung errechneten Wert überein. Damit ist bewiesen, daß es völlig analog ist, ob die Rechnung aus der Sicht der Myonen oder aus der Sicht der Erde gelöst wird, das Ergebnis ist dasselbe und stimmt mit den Ergebnissen aus den Experimenten überein.

Interpretation als Zeitreise

Das Myonbeispiel ist meines Erachtens nicht wirklich als Zeitreise zu interpretieren. Dies begründe ich mit folgenden Überlegungen:

1. Aus Sicht der Erde verlängert sich die Lebensdauer (im Erdsystem!!) von Teilchen, wenn sie bewegt sind. Ebenso verkürzen sich die Längenmaßstäbe des bewegten Systems (wiederum im Erdsystem gemessen!!). Der/Die Beobachter/in aus dem Erdsystem schlüpft jedoch niemals in das Myonensystem, sondern bleibt immer im eigenen Ruhesystem. Die beobachteten Maßstabsveränderungen gelten für jemand anderen (in diesem Fall für die Myonen) aber niemals für den/die Beobachterin bzw. deren Inertialsystem selber. Der/Die Beobachter/in kann also z.B. nicht behaupten, eine Zeitreise in der Myonenzeit gemacht zu haben, weil er/sie *nie* in der Myonenzeit

war! Ebensovienig hat sie im eigenen Erdensystem eine Zeitreise gemacht, weil sie *immer* in der Erdenzeit war.

2. Aus der Sicht der Teilchen verlängert sich die Lebensdauer der Menschen auf der Erde, weil diese sich bewegen. Dies ist so zu verstehen, daß die Menschen im Sinne des biologischen Alterungsprozesses nicht wirklich älter werden (also mehr weiße Haare, mehr Falten), sondern daß zum Beispiel der biologische Alterungsprozess, der auf der Erde 68 Jahre in Anspruch nimmt, aus Sicht des Myons auf 2000 Jahre gedehnt wird. Die Prozesse auf der Erde erscheinen dem Myon wie in Zeitlupe. Dementsprechend stellt es auch eine Verkürzung der Längenmaßstäbe fest, sodaß die Straßen in Bewegungsrichtung z.B. weniger breit sind. Aber da die Menschen sich so langsam bewegen, brauchen sie zum Überqueren der Straße eine ganze Weile. Es muß betont werden, daß, wenn der Mensch im ruhenden System die andere Straßenseite erreicht, auch aus der Sicht des Myons der Mensch die andere Straßenseite erreicht hat. Im einen Fall bewegt er sich zwar schneller, dafür ist die Straße breiter. Im anderen Fall bewegt er sich langsamer, dafür ist die Straße schmaler.

Das Myon hingegen bleibt, wie der/die Beobachter/in des Erdsystems, immer in seinem Ruhesystem und wechselt niemals in das Erdsystem. Demzufolge kann auch das Myon nicht behaupten, eine Zeitreise in der irdischen Zeit gemacht zu haben, weil es nie in der irdischen Zeit war. Im eigenen System hat es ebenfalls keine Zeitreise getan.

Es liegt also keine Zeitreise vor, weil die beiden Beobachter/innen (Myon, Mensch) niemals ins andere System wechseln und somit für sich selbst und für ihr Inertialsystem (Erde, Myonenwelt) niemals eine ungewöhnliche Änderung der Längen- oder Zeitmaßstäbe feststellen.

Aus den oben genannten Gründen wird auch klar, wieso es keine Lebensverlängerung bzw. Zeitreise darstellen würde, wenn sich eine Person etwa in den Speicherring schießen läßt (tatsächlich wäre die erforderliche Energie, um die Masse eines Menschen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen, nahezu unendlich groß, außerdem würde eine solche Beschleunigung, nämlich innerhalb eines kurzen Moments von 0 auf fast 300000km/s, absolut tödlich sein). Es wird nicht wirklich das Leben verlängert sondern die Ruhelebensdauer von 68 Jahren auf 2000 Jahre gedehnt. Mit anderen Worten: Wenn die Person eine bestimmte Anzahl an grauen Haaren hat, ein bestimmtes Maß an Eindrücken durch eine bestimmte Anzahl von Urlaubsreisen erlebt hat, so-und-so-oft mit den Augen gezwinkert hat und das Herz so-und-so-oft geschlagen hat, dann stirbt die Person, im einen wie im anderen Fall. Außerdem bleibt

sie auf immer im Speicherring, beobachtet zwar die Maßstabsveränderungen der Außenwelt, die aber absolut keinen Einfluß auf ihre Maßstäbe haben.

Würde die Person dem Speicherring wieder entsteigen, würde sie aus ihrem Bezugssystem austreten und in jenes der irdischen Außenwelt eintreten. Ein Umsteigen in ein anderes Bezugssystem bedeutet immer Beschleunigung. Daher ist die physikalische Problemstellung eine andere als bisher. Dieser Fall würde dem Zwillingsparadoxon entsprechen, das weiter unten behandelt wird.

Obwohl die Beobachtung der Zeitdilatation allein noch keine Zeitreise darstellt, weil kein "Umspringen" zwischen den Inertialsystemen stattfindet, sind die Ergebnisse aus den obigen Überlegungen grundlegend für das Verständnis der Zeitreisen etwa nach Art des Zwillingsparadoxons.

2. ZEITDILATATION IN EINEM GRAVITATIONSFELD

Im Fall des Gravitationsfeldes wird die Zeitdilatation mit der Allgemeinen Relativitätstheorie erklärt. Angenommen die Uhr n befindet sich an einem Punkt mit niedrigerem Gravitationspotential U , also näher an einer Masse, als Uhr w , so zeigt sie die Zeit t_n an, die um den Faktor kleiner ist, als jene von der Uhr w angezeigte Zeit t_w . Die Uhr in der Nähe der Masse geht also langsamer.

$$t_n = t_w \left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right)$$

Ebenso verkürzen sich vom weiter weg liegenden System aus gesehen die Maßstäbe des näher bei der Masse liegenden Systems:

$$l_n = l_w \left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right)$$

Die gravitationsbedingte Zeitdilatation konnte in der Praxis durch das *Hafele-Keating-Experiment* bestätigt werden.

Das Hafele - Keating - Experiment

Bei diesem Experiment wurde von der Annahme ausgegangen, daß eine Uhr, die sich in einem Satelliten oder in einem Flugzeug um die Erde bewegt, schneller gehen müßte als eine Vergleichsuhr auf der Erdoberfläche, da die Vergleichsuhr sich näher der Erdmasse befindet.² Andererseits mußten die Geschwindigkeiten der beiden Uhren (Erddrotation, Flugzeugbewegung) in korrekter Weise berücksichtigt werden, um erfolgreich den Einfluß der Gravitation auf die Zeitmaßstäbe zu bestätigen.

Das Experiment wurde im Oktober 1971 von den Physikern John Hafele und Richard Keating ausgeführt. Sie waren mit vier Cäsiumatomuhren ausgerüstet und flogen mit einer Boing 747 der Fluglinie PanAm auf einem normalen Linienflug von Washington nach London und wieder zurück.

Im Folgenden werden die vorbereitenden Überlegungen zur richtigen Auswertung der gemessenen Ergebnisse dargestellt:

Aus der gravitationsbedingten Zeitdilatation ergibt sich die Zeit t_n für die erdnahe Uhr:

$$t_n = t_w \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

g ...Erdbeschleunigung

H ...Flughöhe (Abstand der beiden Uhren)

n ... n im Index steht für "nah" (zur Erdoberfläche)

w ... w im Index steht für "weit" (von der Erdoberfläche)

Da die Uhren in Bewegung sind, durch Erddrehung bzw. Bewegung des Flugzeugs, muß die Zeitdilatationen in bewegten Systemen ebenfalls berücksichtigt werden. Aus der Sicht der jeweils anderen Uhr ergeben sich daher die Zeiten für die bewegten Uhren t_{nb} (nah, bewegt) und t_{wb} (weit, bewegt) aus folgenden Formeln:

²Die Beschreibung des Experiments ist im Wesentliche entnommen aus: Sexl, Roman, Schmidt, Herbert K., *Raum, Zeit, Relativität*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1991, S.39f; und: Sexl, Roman U., Urbantke, Helmuth K., *Relativität, Gruppen Teilchen*, Wien: Springer-Verlag 1976, S.23f

$$t_{nb} = t_n \sqrt{1 - \frac{v_n^2}{c^2}} \approx t_n \left(1 - \frac{v_n^2}{2c^2}\right)$$

$$t_{wb} = t_w \sqrt{1 - \frac{v_w^2}{c^2}} \approx t_w \left(1 - \frac{v_w^2}{2c^2}\right)$$

Für die in der Flugzeuguhr angezeigte Zeit t_{wb} ergibt sich durch Einsetzen³:

$$t_{wb} \approx t_w \left(1 - \frac{v_w^2}{2c^2}\right) \approx \left(1 + \frac{gH}{c^2}\right) \cdot t_n \cdot \left(1 - \frac{v_w^2}{2c^2}\right) \approx \left(1 + \frac{gH}{c^2}\right) \cdot \frac{t_{nb}}{\left(1 - \frac{v_n^2}{2c^2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{v_w^2}{2c^2}\right)$$

$$t_{wb} \approx t_{nb} \left(1 + \frac{gH}{c^2} + \frac{v_n^2}{2c^2} - \frac{v_w^2}{2c^2}\right)$$

Der Zeitvergleich zwischen der Flugzeuguhr und der Erdenuhr läßt also sowohl die speziell relativistischen Zeitdilatationseffekte als auch jene durch die Gravitation hervorgerufenen erkennen.

Wird nun angenommen, daß sich die Flugzeuguhr gegenüber der ruhenden Erdenuhr bewegt, so ergibt sich, daß die Flugzeuguhr t_{wb} langsamer geht. Die Flugzeuguhr ist jedoch auch weiter von der Erde entfernt. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie gehen Uhren, die weiter von der Masse entfernt sind, schneller als Uhren näher bei der Masse. Aus dem Experiment zu erwarten (und zu befürchten) war also, daß sich der bewegungsbedingte und der gravitationsbedingte Zeitdilatationseffekt gerade aufheben und somit kein Beweis für spezielle und allgemein-relativistische Effekte erbracht werden könnte.

Hafele und Keating erkannten jedoch, daß man den Bewegungsablauf aus der Sicht eines/einer Beobachter/s/in sehen muß, der/die weder im Inertialsystem der Erdenuhr noch in jenem der Flugzeuguhr sitzt. Vielmehr muß sich das Inertialsystem des/der Beobachter/s/in mit der Erde mitbewegen, aber nicht mitrotieren! (Siehe **Abb.IV.2**) Für den/die Beobachter/in bewegt sich somit sowohl die Flugzeuguhr als auch die Erdenuhr (aufgrund der Erdrotation). Die Geschwindigkeit des Flugzeugs ist somit bei Ost- und bei Westflug verschieden:

³Es wird die Näherung $(1 - x)^{-1} \approx (1 + x)$ für $x \ll 1$ verwendet.

Die Beobachter/innen/position ist genau jene, die man einnimmt, wenn man die Skizze betrachtet. Aufgrund der Rotation der Erde solle man sich noch vorstellen, daß die zweidimensionale Erdscheibe sich dreht, man selber aber ruhig bleibt.

v_B ... Die Geschwindigkeit v_B ist die Geschwindigkeit der Flugzeuguhr bezogen auf den/die ruhende/n Beobachter/in.

v Die Geschwindigkeit v ist die Flugzeuggeschwindigkeit bezogen auf die Erdoberfläche (allgem. die "Reisegeschwindigkeit" des Flugzeugs).
($v \sim 800\text{km/h}$)

v_A ... v_A ist die Geschwindigkeit der Erdenuhr in Bezug auf den/die Beobachter/in.
($v_A \sim 1667\text{km/h} = \text{Geschwindigkeit der Erdrehung}$)

Es seien vorerst nur die speziell-relativistischen Effekte betrachtet:

a) *Ostflug:*

Auf dem Ostflug bewegt sich relativ zu dem/der Beobachter/in die Uhr B schneller als die Uhr A (die sich relativ ja auch bewegt aufgrund der Erddrehung). Somit geht Uhr B langsamer als Uhr A. Die Relativgeschwindigkeit des Flugzeugs beträgt für den/die ruhende/n Beobachter/in

$$v_A + v = v_B$$

b) *Westflug:*

Die Geschwindigkeit v ist aufgrund der entgegengesetzten Flugrichtung von v_A abzuziehen.

$$v_A - v = v_B$$

v_B ist wiederum die Geschwindigkeit der Flugzeuguhr relativ zu dem/der ruhenden Beobachter/in.

Die berechneten Effekte aus Ost- und Westflug sind in folgender Tabelle aufgelistet⁴:

⁴Werte entnommen aus: Sexl, R. u H., *Weißer Zwerge - Schwarze Löcher*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1979, S.24

Tab.IV.1: Berechnete Werte der Zeitdilatation beim Hafele-Keating-Experiment.

Effekt	Ostflug B (relativistischer Zeitunterschied in ns)	Westflug B' (relativistischer Zeitunterschied in ns)
Gravitation	144 ± 14	179 ± 18
Geschwindigkeit	-184 ± 18	96 ± 10
Summe	-40 ± 23	275 ± 21

Beim Westflug ist v_B sogar kleiner als v_A , sodaß nach der speziellen Zeitdilatation die Erdenuhr A langsamer geht als die Flugzeuguhr B. Hinzu kommt noch der Effekt der gravitationsbedingten Zeitdilatation, wonach A langsamer geht als B, sodaß sich die beiden Effekte addieren.

Beim Ostflug geht einerseits die Flugzeuguhr B aufgrund der speziellen Zeitdilatation langsamer, andererseits geht die Erdenuhr A aufgrund der gravitationsbedingten Zeitdilatation langsamer, sodaß sich die beiden Effekte nahezu aufheben.

Das von Hafele und Keating durchgeführte Experiment konnte die oben skizzierten Vorhersagen bestätigen. Damit war die gravitationsbedingte Zeitdilatation experimentell bewiesen worden. Außerdem war erstmals ein Beweis des Uhrenproblems ("Zwillingsparadoxons") mittels makroskopischer Uhren und herkömmlicher Geschwindigkeiten erbracht worden.

3. DAS UHRENPROBLEM (ZWILLINGSPARADOXON)

Mit dem sogenannten *Uhrenproblem*, besser bekannt als *Zwillingsparadoxon*, glaubte man zu Zeiten Einsteins, einen Widerspruch zur Speziellen Relativitätstheorie gefunden zu haben. Es geht darum, daß einer von zwei Zwillingen mit einer Rakete und hoher Geschwindigkeit die Erde verläßt, nach einigen Jahren zurückkommt und den Zwilling, der auf der Erde blieb, viel stärker gealtert wieder vorfindet. Nach der speziellen Relativitätstheorie müßte genausogut der Zwilling im Raumschiff annehmen können, daß er sich in Ruhe befindet, und die gesamte Erde wegfliet und daher der Erdzwilling aufgrund der Bewegung bei der Rückkehr der jüngere ist. Das Paradoxe dabei wäre, daß beim Wiedertreffen der Zwilling aus der Rakete sowohl älter als auch jünger sein müßte.

Mit der Speziellen Relativitätstheorie allein konnte das Problem nicht gelöst werden. Daher zog man die Theorie in Zweifel. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, daß jenes der beiden Inertialsysteme, das zur Rückkehr seine Flugbahn ändert, einer Beschleunigung unterliegt. Dadurch ist es gegenüber dem anderen System ausgezeichnet, die Symmetrie des Zeitdilatationseffekts ist gebrochen. Das Uhrenproblem kann allein durch die Spezielle Relativitätstheorie deshalb nicht gelöst werden, weil es nicht den Bedingungen genügt, unter denen diese Theorie ihre Gültigkeit hat, nämlich unbeschleunigte Bewegungen. So gesehen ist das Uhrenproblem als Beispiel für Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie einzuordnen. Zeitdilationen von der Art des Zwillingsparadoxons sind wirklich beobachtbar und meßbar. Daher wird das Zwillingsparadoxon in einem eigenen Absatz behandelt und die entsprechenden Beispiele angeführt. (Anm.: Ich nenne es weiterhin "Paradoxon", obwohl es, wie gezeigt wird, keines ist. Ich bediene mich dabei der Bekanntheit des Namens, unter dem dieses Beispiel in die Geschichte einging.)

Im Folgenden sei schrittweise und aus paralleler Sicht von den jeweiligen Bezugssystemen aus dieses Problem betrachtet.

Erdensystem = A

Raketensystem = B; $v_B = 240\,000\text{km/s}$

Beide Systeme sind mit Uhren A und B ausgestattet, die nach jeweil einer Sekunde (wohlgemerkt in der Zeit des eigenen Systems) Lichtsignale aussenden.

Die Zeitdilatation, also daß aus Sicht von B die Uhr in A langsamer geht, ergibt sich nicht allein aufgrund des relativistischen Effekt, es muß auch der Dopplereffekt berücksichtigt werden. Das System B fliegt den von A ausgesandten Lichtsignalen davon, bzw. kommt beim Rückflug auf sie zu, sodaß auch ohne relativistische Effekte

beim Abflug aus Sicht von B die Uhr A langsamer, und beim Heimflug schneller ginge.

Aus Sicht von A braucht das Lichtsignal, das von B ausgesendet wird, ebenfalls immer länger, weil sich B kontinuierlich entfernt. Nachdem B schon längst umgedreht hat, erhält A noch immer Signale, die beim Hinflug ausgesendet wurden.

Beim Hinflug müßten also die gegenseitig beobachteten relativistischen und Dopplereffekte symmetrisch sein. Es sei angenommen, daß sich die Systeme A und B über den Dopplereffekt "bewußt" sind und diesen in ihren Rechnungen berücksichtigen.⁵

Es sei angenommen, daß B im Jahre 2000 von der Erde wegfliegt, an einem 8 Lichtjahre entfernten Stern (aus Sicht von A) umdreht und im Erdenjahr 2020 wieder zurückkommt, im System A also 20 Jahre vergangen sind. Beide Systeme besitzen vor dem Start synchronisierte Uhren.

$$t_B = t_A \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$t_B = 20 \sqrt{1 - \frac{240000^2}{300000^2}} = 12$$

Nach der Speziellen Relativitätstheorie würde die Reise in B 12 Jahre dauern. Die Beschleunigungsphasen, die in B auftreten (Beschleunigung auf 240000 km/s, Abbremsung beim Stern, erneute Beschleunigung in die entgegengesetzte Richtung, wieder Abbremsung auf der Erde) seien vernachlässigt. Es sei angenommen, daß die Geschwindigkeit von B von der Erde bis zum Stern konstant 240000 km/s betrage und auf dem Rückflug auch konstant (-240000 km/s) sei. Der Wechsel von 240000 km/s auf -240000 km/s geschehe in einem unendlich kleinen Zeitraum.

⁵Vgl. Davies, Paul, *Die Unsterblichkeit der Zeit. Die moderne Physik zwischen Rationalismus und Gott*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1995, S.79f

Tab.IV.2: Das Zwillingsparadoxon aus der Sicht von A (Erdsystem) und B (Raketensystem).

<i>Vorgang aus der Sicht von A</i>	<i>Vorgang aus der Sicht von B</i>
<ul style="list-style-type: none"> • 2000: Abflug von B von der Erde 	<ul style="list-style-type: none"> • 2000: Abflug von B von der Erde
<ul style="list-style-type: none"> • 2018: A berechnet, daß B nach 10 Jahren auf dem Stern ankommt, also 2010. A wird die Ankunft jedoch erst im Jahre 2018 sehen, da das Licht vom Stern zur Erde 8 Jahre braucht. Aus Sicht von A sind 18 Jahre auf ihrer Uhr und 6 Jahre in B vergangen. Der kombinierte Zeitverlangsamungsfaktor beträgt $1/3$. (Dies wird symmetrisch festgestellt.) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2006: Die Uhr B zeigt bei der Ankunft auf dem Stern das Jahr 2006. $t_B = 10 \sqrt{1 - \frac{240000^2}{300000^2}} = 6$ B weiß, daß auf der Erde das Jahr 2010 gilt, sieht jedoch etwas anderes: Das Licht, das von der Erde das Raumschiff erreicht, ist jenes von vor 8 Jahren. Also sieht B, daß die Uhr A 2002 anzeigt. Aus Sicht von B sind also 6 Jahre auf ihrer Uhr und 2 Jahre auf der Uhr A vergangen. Der kombinierte Zeitverlangsamungsfaktor beträgt $1/3$.
<ul style="list-style-type: none"> • 2018: Abflug aus der Sicht von der Erde aus: A sieht, wie B vom Stern abfliegt. A weiß, daß B 2020 auf der Erde ankommt. Also bleiben 2 Jahre auf der Uhr A für den Rückflug. 	<ul style="list-style-type: none"> • 2006: Abflug vom Stern aus der Sicht von B. Der Dopplereffekt der Erdsignale wirkt nun gegen den relativistischen Zeitdilatationseffekt. Ersterer läßt die Signale beschleunigt erscheinen (B fliegt auf sie zu), zweiterer wirkt verlangsamend. B weiß, daß sie 2012 zurückkehrt. Auf der Uhr B bleiben folglich 6 Jahre für den Rückflug.

<ul style="list-style-type: none"> • Rückflugsdauer: Die Ereignisse, die in der Rakete während des Rückflugs innerhalb von 6 Jahren Raketzeit passieren, erscheinen aus der Sicht von A <i>beschleunigt</i>!! Für A geht also die Uhr B auf dem Rückflug 3 mal schneller als ihre eigene Uhr. Dieser Faktor ist wieder symmetrisch feststellbar. Der Dopplereffekt überwiegt den Zeitdilatationseffekt!! 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückflugsdauer: Aus Sicht von B zeigt die Erdenuhr zum Zeitpunkt des Abflugs 2002. B weiß, daß sie nach Erdenzeit im Jahr 2020 ankommt. Also bleiben auf der Erde 18 Jahre, die nach der Uhr B in 6 Jahren (Rückflugzeit) vergehen. Für B scheint also die Uhr in A 3 mal schneller zu gehen als ihre eigene.
<ul style="list-style-type: none"> • 2020: Ankunft von B und Treffen mit A. 	<ul style="list-style-type: none"> • 2012: Ankunft von B und Treffen mit A.

Die Erlebnisse von A und B passen also nahtlos zusammen.

Folgerungen:

Da der Stern gemessen im Erdsystem A 8 Lichtjahre entfernt ist, das System B jedoch nur 6 Jahre bis zum Stern benötigt, muß sich die Entfernung für die Rakete relativistisch ändern.

$$x_B = x_A \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$x_B = 8 \sqrt{1 - \frac{240000^2}{300000^2}} = 4,8$$

Für das System B ist also nur eine Entfernung von 4,8 Lichtjahren zurückzulegen. Der relativistische Faktor beträgt 0,6. Die Längenmaßstäbe schrumpfen in gleicher Weise wie die Zeit gedehnt wird.

$$\frac{4,8 \text{ Lj.}}{8 \text{ Lj.}} = \frac{6 \text{ J.}}{10 \text{ J.}} = 0,6$$

Der Grund für die asymmetrische Zeitdilatation liegt darin, daß die beiden Systeme nicht gleichwertig im Sinne der Relativitätstheorie sind. Das System B wird beim Abflug beschleunigt, beim Umkehren abgebremst, dann nochmals beschleunigt und

bei der Landung nochmals abgebremst. Auch wenn diese Beschleunigungsphasen unendlich kurz gehalten werden, ist spätestens nach dem Umkehren die Relativgeschwindigkeit zwischen A und B nicht mehr konstant sondern richtungsverändert. Für eine genaue Analyse müßte das Zwillingsparadoxon in den entsprechenden Teilen mit der Allgemeinen Relativitätstheorie behandelt werden.

Interpretation als Zeitreise

Aus Sicht des Bezugssystems B sind im Bezugssystem A in der Zeit der Trennung viel mehr Veränderungen vor sich gegangen. Selbst die Menschen in A haben einen Alterungsprozeß durchgemacht, der eigentlich einige Jahre mehr braucht, als die Trennung von A und B aus der Sicht von B gedauert hat. Das heißt, B trifft auf ein Ergebnis an Veränderungen in A, das B erst in 8 Jahren erreicht, und das ist eine Aussage über die Zukunft. B hat also aufgrunddessen, daß in System A die Zeit schneller verging, ein Bild davon, wie B in 8 Jahren aussehen wird. Im "normalen Zeitfluß" von B gehören diese Merkmale der Zukunft an. B interpretiert daher die Situation als Zeitreise in die Zukunft. Genau so gut könnte A behaupten, in die Vergangenheit gereist zu sein, da seine/ihre Beobachtungen (nämlich die Wahrnehmung des viel jüngeren Zwillings) im "normalen Zeitfluß" von A der Vergangenheit zugeordnet werden könnten. Es sei jedoch betont, daß sowohl A als auch B in ihrer Gegenwart sind und weder A noch B in ihre eigene oder die Zukunft bzw. Vergangenheit des anderen gereist sind. Auf die in diesem Zusammenhang nicht-vernachlässigbare Problematik des Zukunftsbegriffs wurde in Kapitel Eins bereits eingegangen.

Wird das Uhrenproblem oder Zwillingsparadoxon als Zeitreise betrachtet, so stößt man auf ein Problem, nämlich, daß eine eventuelle Rückreise sich als sehr schwierig darstellt. Zuerst muß dazu die Frage beantwortet werden, was im Zwillingsparadoxon der Rückreise entsprechen würde.

Als Rückreise würde gelten, wenn aufgrund einer weiteren Reise beide Zwillinge gleich alt wären bzw. beide Systeme A und B die gleichen Veränderungen zeigen würden. Wie wäre dies zu realisieren?

Genaugenommen gäbe es dazu nur eine Möglichkeit, nämlich daß jenes System, das zuerst in Ruhe geblieben ist, also A, nun beschleunigt wird, sich einige Zeit mit einer sehr hohen Geschwindigkeit bewegt, und dann wieder zurückkommt. Im Fall des Zwillingsparadoxons würde das heißen, daß der Erdenzwilling samt der Erde in eine Rakete gepackt wird und sich vom anderen Zwilling, der in seinem Raumschiff unbeschleunigt wartet, wegbeschleunigt. Es muß hierbei die Zeitdifferenz von 8 Jahren ausgeglichen werden. Das heißt noch nicht, daß die Erde samt Zwilling die gleiche Strecke zum gleichen Stern nehmen muß. Die erreichte Zeitdifferenz hängt ab von der

Geschwindigkeit des Raumschiffs und der Entfernung. Also würden sich verschiedenste Kombinationsmöglichkeiten, und somit verschiedenste "Reiserouten" ergeben. Es ist weiters zu beachten, daß das ältere System quasi den Zeitpunkt vorgibt, an dem sich die beiden Systeme frühestens gleichaltrig wieder treffen könnten. Das heißt, daß in unserem Beispiel die Erde, auf der beim ersten Treffen das Jahr 2020 geschrieben wird, das frühest mögliche Datum vorgibt, an dem sich A und B gleichaltrig wieder treffen. In diesem Fall wäre dies frühestens 2020 der Fall (Dazu müßte A, also die Erde, allerdings mit Lichtgeschwindigkeit von B wegfliegen).

A und B können sich unmöglich treffen, wenn beide das Jahr 2015 schreiben. Das ist zwar für das System B noch Zukunft, aber für das System A Vergangenheit. Die Reise aus dem Jahr 2020 ins Jahr 2015 ist für Teilchen mit reellen Massen unmöglich und von der Relativitätstheorie verboten! Die Teilchen müßten mit Überlichtgeschwindigkeit fliegen. (Theoretisch können Teilchen angenommen werden, die eine imaginäre Masse besitzen und mit mindestens Lichtgeschwindigkeit sich fortbewegen. Diese Teilchen werden *Tachyonen* genannt und weiter unten genauer behandelt.)

Für unseren Zwilling oder das Erdsystem A ist es jedoch absolut unmöglich, mit Überlichtgeschwindigkeit in die Vergangenheit zu reisen.

Raumzeit-Diagramme des Zwillingsparadoxons

Das Zwillingsparadoxon kann raumzeit-geometrisch auf zwei verschiedene Arten dargestellt werden, wobei in der einen Darstellung (Minkowski Geometrie) der eine Zwilling ein beschleunigtes System darstellt, in der anderen Darstellungsmöglichkeit (geschlossenes Universum) beide Zwillinge unbeschleunigt sind.

a) Minkowski Geometrie (Siehe **Abb.IV.3**)

Es erscheint ungewöhnlich, jedoch ergibt sich, daß die Weltlinie jenes Bezugssystems, in dem am meisten Zeit vergeht, die kürzeste ist, nämlich eine Gerade.

Dazu sei das Wegelement im ruhenden Fall (dies entspricht dem System des auf der Erde verbliebenen Zwillings) und im beschleunigten Fall (was einer Ortsveränderung entspricht) betrachtet:

Wegelement allgemein:

$$(ds)^2 = (dt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2$$

Im ruhenden Fall ist dx , dy und dz gleich Null. Daraus folgt: $(ds)^2 = (dt)^2$

Dies ist der raumzeitliche Abstand zwischen den beiden Ereignissen Abflug t_A vom Zwilling und Ankunft t_B vom Zwilling, gemessen im System des ruhenden Zwillings auf der Erde.

Nun sei die Zeit im beschleunigten Bezugssystem betrachtet:

$$dt' = dt \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$v \neq 0$$

$$t' = \int dt' = \int \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} dt < t_B - t_A$$

Betrachtet man das Ergebnis $t' < t_B - t_A$ in Zusammenhang mit dem Raumzeit-Diagramm, so ergibt sich, daß jenes System, das die größte Eigenzeit aufweist, die kürzeste Weltlinie hat. Jede gekrümmte Weltlinie hat also eine kürzere Eigenzeit. Dies ist ein Beispiel dafür, wie sich die Minkowski-Geometrie und die Euklidische Geometrie unterscheiden.

*b) Geschlossenes Universum (Siehe **Abb.IV.4**)*

Wie oben dargestellt wurde, gibt es in einer flachen, offenen Raumzeit (die Fläche ist also nicht zu einem Kreis, Zylinder u.ä. geschlossen) nur eine Möglichkeit, daß zwei Systeme sich in der Vergangenheit trennen und in der Zukunft verschieden gealtert wieder zusammenkönnen: eine der beiden Weltlinien ist gekrümmt. Es kann auch so ausgedrückt werden, daß die Raumzeit des einen Systems gekrümmt ist. In jedem Fall steht Krümmung für Beschleunigung.

Wird anstelle eines flachen offenen Universums ein geschlossenes Universum angenommen (dies soll heißen, daß unser dreidimensionales Universum die Hülle eines vierdimensionalen Hyperraums ist, so wie die zweidimensionale Apfelschale die Hülle des dreidimensionalen Apfels ist), so sind sehr wohl Weltlinien möglich, die nicht gekrümmt, aber trotzdem länger sind als andere und infolge dessen kürzere Eigenzeiten haben.

Eine geschlossene flache Raumzeit erlaubt also, daß sich zwei gerade, nicht parallele Weltlinien öfter als einmal schneiden. Jenes System, das den Weg der längeren Weltlinie verfolgt, hat die kleinere Eigenzeit, bleibt also jünger.

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, daß in Kapitel Fünf verschiedene Raumzeitmodelle betrachtet werden, die sogenannte geschlossene zeitartige Kurven (das sind Weltlinien bei Reisen in die Vergangenheit) ermöglichen, ohne daß das reisende System beschleunigt werden bzw. mit Überlichtgeschwindigkeit reisen müßte.

KAPITEL FÜNF

KOSMOLOGISCHE MODELLE FÜR ZEITREISEN

M. C. Escher, *Drei Kugeln I*, 1945

In Kapitel Drei wurde Einsteins Gravitationstheorie behandelt, die besagt, daß die Raumzeit durch Anwesenheit von Masse gekrümmt wird. Körper folgen auf ihrem Weg durch das Universum den Geodäten der gekrümmten Raumzeit. Diese nicht-geraden Bahnen werden in der Newtonschen Physik auf die Wirkung einer Gravitationskraft zurückgeführt.

Die Krümmung der Raumzeit ergibt sich aus dem Verhältnis der Masse und des Radius eines Körpers. Was geschieht, wenn die Masse eines Objekts endlich groß ist, sein Volumen aber Null, also eine unendlich große Dichte hat, sodaß es eine unendliche Krümmung in der Raumzeit erzeugt? Es würde quasi ein Loch in das Netz der Raumzeit reißen. Auch die Einsteinschen Feldgleichungen lassen diese Lösung zu. Dieses Loch in der Raumzeit könnte möglicherweise eine Verbindung zu anderen Raumzeiten (anderen Universen) darstellen. Dies ist interessant in Hinblick auf Zeitreisen. Aber gibt es solche Löcher? Und wie könnte es zu einer so starken Krümmung kommen? Wie würde sie sich in den Beobachtungen äußern? Dazu möchte ich vorerst kurz auf die Entwicklung von sehr massereichen Objekten, den Sternen eingehen.

1. STERNE

1.1. Sternentwicklung

Sterne sind im Wesentlichen heiße Gaskugeln, die durch ihre eigenen Gravitation zusammengehalten werden. Der Gravitation wiederum wirkt der innere Druck des Gases entgegen. Der Energievorrat eines Sterns besteht aus thermischer Energie, Gravitationsenergie und nuklearer Energie. Hauptenergiequelle ist die Kernfusion, und zwar hauptsächlich die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium. Diese Energievorräte sind jedoch nicht unerschöpflich, vor allem stehen ihnen Energieverluste in Form von sehr großer Abstrahlung gegenüber. Im Laufe der Zeit verändern sich also die chemische Zusammensetzung eines Sterns und damit auch seine Zustandsgrößen¹. Sinkt der Gasdruck im Inneren eines Sterns ab (z.B. aufgrund von Energieverlusten durch Abstrahlung), so kollabiert er unter seiner eigenen Gravitation. Die Kollapszeit ist bemerkenswerterweise nur von der mittleren Dichte des Sterns, nicht jedoch von

¹Vgl. Bergmann; Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.8, Sterne und Weltraum*, Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin/New York: de Gruyter 1997, S.111ff

seinem Radius abhängig. Ein Objekt, das nicht durch inneren Druck gegenüber dem Gravitationsdruck stabilisiert ist, muß rotieren, um keinen Gravitationskollaps zu erleiden. Das erklärt auch die Notwendigkeit der Rotation der Milchstraße. Würde unsere Milchstraße nicht rotieren, würde sie aufgrund ihrer mittleren Dichte in etwa 100 Millionen Jahren in sich zusammenfallen. Ein Objekt von der Dichte unserer Sonne würde etwa eine Stunde für den Gravitationskollaps brauchen².

Nach einem Gravitationskollaps können sich neue Gleichgewichtskonfigurationen einstellen. Dies hängt allerdings von der ursprünglichen Masse des Sterns ab.

Weißer Zwerg

Bei Sternen mit Massen zwischen 0,5 und 4 Sonnenmassen endet die thermonukleare Entwicklung mit dem Heliumbrennen, das zu einem Kohlenstoff-Sauerstoffkern des Sterns führt. Der Stern ist mittlerweile riesig aufgebläht, sodaß an der Sternoberfläche aufgrund der geringen Gravitation ständig Masse abströmt. Der Stern verliert somit seine gesamte wasserstoffreiche Hülle in Form eines *Planetarischen Nebels*. Das stabile Endstadium dieses C-O-Kerns ist ein *Weißer Zwerg*. Aufgrund des Massenverlusts ist die Gravitation verringert, der Druck des entarteten Elektronengases hingegen ist so hoch, sodaß der Stern nicht weiter kollabiert. Er brennt einfach aus. Kosmologische Forschungsergebnisse zeigen, daß alle Weißen Zwerge eine Masse besitzen, die kleiner als 1,4 Sonnenmassen ist. Das heißt, daß der Massenverlust durch den Planetarischen Nebel selbst das Vierfache der Sonnenmasse auf ein 1,4-Faches verringert. Die Dichte eines Weißen Zwerges ist jedoch so groß, daß ein Teelöffel voll Weißer-Zwerg-Materie 5,5 Tonnen und mehr wiegen würde³!

Was passiert, wenn nicht soviel Planetarischer Nebel abströmt, daß die Sternmasse unter die 1,4-fache Sonnenmasse kommt?

Bei rechnerischer Annäherung an die 1,4 Sonnenmassen steigt die Zentraldichte auf Unendlich und der Sternradius geht auf Null. Dies ist als weiterer *Gravitationskollaps* zu interpretieren. Der Druck des entarteten Elektronengases kann der Gravitation nicht mehr standhalten. Die Grenzmasse für den Gravitationskollaps beträgt also 1,4 Sonnenmassen und wird als die *Chandrasekharsche Grenzmasse* bezeichnet, die 1930 von dem indischen Physiker Subrahmanyan Chandrasekhar errechnet wurde⁴.

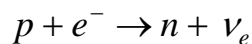
²Vgl. Sexl, R. u H., *Weißer Zwerge - Schwarze Löcher*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1979, S.70ff

³<http://www.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/NumRel/BlackHoleFormation.html>, ©1995, The Board of Trustees of the University of Illinois (Stand 27.09.1999)

⁴Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S.159ff

Neutronenstern

Sterne mit Anfangsmassen vom Achtfachen der Sonnenmasse haben nach dem Heliumbrennen weitere Brenn- und Kontraktionsphasen, die sich immer abwechseln, solange, bis sich ein Eisen-Nickel-Kern gebildet hat. Um den Kern liegen Schalen der jeweils immer leichteren Elemente. Zu dieser Zeit ist der Stern ein Überriese mit großer Abstrahlung. Da der Stern über der Chandrasekharschen Grenzmasse liegt, kommt es zum Gravitationskollaps. Dieser Kollaps muß jedoch nicht in der Singularität, also in einem Punkt mit unendlich großer Dichte, enden. Es kann noch immer ein stabiler Endzustand erreicht werden, wenn sich im Zentrum aufgrund der enormen Atomkerndichten die Atomkerne in freie Protonen und Neutronen auflösen. Dies bewirkt wiederum einen Energieverlust und beschleunigt den Kollaps, der nur Sekunden dauert. Dadurch wiederum werden die Energien der Elektronen so groß, daß sie in die freigewordenen Protonen eindringen und Neutronen und Neutrinos bilden⁵.



Nach dem Kollaps besteht der Stern fast nur mehr aus Neutronen. Da die elektrischen Abstoßungskräfte wegfallen, verringert sich das Volumen auf einen Durchmesser von 60 km und weniger bei einer Dichte von 10^{15} g/cm^3 , was bedeuten würde, daß ein Teelöffel voll Neutronensternmaterie 100 Millionen Tonnen wiegen würde! Ein Neutronenstern von der Masse unserer Sonne hätte einen Radius von 10 km. Ein erheblicher Teil seiner Energie wird durch die entstandenen Neutrinos abgeführt.

Supernova

Wenn der Kollaps an der Oberfläche des Neutronensterns abrupt gestoppt wird, entsteht ein elastischer Rückstoß, der eine Stoßwelle erzeugt. Diese Stoßwelle schleudert die wasserstoffreiche Hülle des Neutronensterns explosionsartig in den Weltraum hinaus. Dieser Massenverlust ermöglicht die Entstehung eines Neutronensterns. Dies wird als *Supernova* bezeichnet. Die abgestoßene Masse umgibt den Neutronenstern als Nebel. Da dieser Nebel vorwiegend aus Wasserstoff besteht und Sterne aus Kondensation von leichten Elementen wie Wasserstoff entstehen, gelten Supernovaexplosionen als Gebiete möglicher Sternentstehung. Ein Beispiel für ein solches Gebiet ist der *Crab-Nebel*.

⁵Vgl. Bergmann; Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.8, Sterne und Weltraum*, Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin/New York: de Gruyter 1997, S.116

Schwarzes Loch

Sinkt trotz des Abstoßens von Masse in Form einer Supernova die Masse des Neutronensterns nicht unter das Zwei- bis Dreifache der Sonnenmasse, so tritt relativistische Entartung ein, und der Neutronenstern kollabiert unter seiner Gravitation ohne Halt. Es entsteht eine *Singularität*.

Die Gravitationswirkung bleibt dabei erhalten und ist so stark, daß selbst Licht ab einer gewissen Entfernung zum Zentrum nicht mehr entweichen kann. Diese Entfernung beträgt bis zu 6 km und wird *Ereignishorizont* genannt. Jenes kosmische Gebilde, dessen Oberfläche vom Ereignishorizont begrenzt ist und in dessen Zentrum eine Singularität sitzt, wird als *Schwarzes Loch* bezeichnet.

Abb.V.1 zeigt einen Größenvergleich der besprochenen kosmischen Objekte. (Schwarze Löcher und in diesem Zusammenhang wichtige Begriffe werden im Folgenden genauer behandelt.)

1.2. Schwarzschild-Radius

1916, also kurz nachdem Einstein die neue Gravitationstheorie veröffentlicht hat, errechnete der deutsche Astronom Karl Schwarzschild die ersten Lösungen dieser Gleichungen. Diese Lösungen wurden *Schwarzschild-Metrik* genannt und ergaben in großer Entfernung zu einer Masse genau das von Newton vorhergesagte Schwerkraftverhalten, nämlich daß diese sich umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands vom Mittelpunkt der Masse verhält.

$$F \approx \frac{1}{r^2}$$

Die Schwarzschild-Metrik beschreibt die Krümmung der Raumzeit in einem *Hyperraum*, der Newtonsche Raum hingegen wird als *physikalischer Raum* bezeichnet⁶ und kann als "flach" interpretiert werden. Das zeigt sich unter anderem darin, daß die raumzeitlichen Maßstäbe konstant bleiben und auch nicht durch Massen verändert werden. Da nach Schwarzschild in entsprechender Nähe von Massen die Raumzeit schüsselförmig gekrümmt ist, in großer Entfernung jedoch abflacht, stimmen in großen Entfernungen die Vorhersagen Newtons und Einsteins überein. Im Inneren von ausgedehnten großen Massen weichen die Vorhersagen Einsteins jedoch erheblich von den Newtonschen Vorhersagen ab.

⁶Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.148

Wie verhalten sich Objekte, die ganz in die Nähe großer Massen kommen?

Aufgrund der dortigen starken Raumkrümmung müßten relativistische Effekte beobachtet werden, die fern jeglicher menschlicher Alltagserfahrung sind.

Um diesen Unterschieden auf die Spur zu kommen, seien zunächst einmal zwei charakteristische, vom jeweiligen Zentralkörper abhängige Werte erläutert, die für die weitere Überlegungen bezüglich Schwarzer Löcher wichtig sind.

Diese sind:

Die *Entweichgeschwindigkeit* (auch Fluchtgeschwindigkeit oder 2. kosmische Geschwindigkeit genannt.) und der *kritische Umfang* (bzw. *Schwarzschild-Radius*, bei einem Schwarzen Loch auch *Ereignishorizont* genannt)

Entweichgeschwindigkeit

Um dem Gravitationsfeld einer Masse zu entkommen, benötigt ein Objekt eine bestimmte radial nach außen gerichtete Geschwindigkeit, die sogenannte *Entweichgeschwindigkeit*.

Die Entweichgeschwindigkeit muß ein Körper, Teilchen u.ä. besitzen, um aus dem Schwerefeld des Sterns für immer zu entkommen. Die kinetische Energie, die sich aus der Entweichgeschwindigkeit v_{kos} ergibt, muß also mindestens so groß sein wie die potentielle Energie, die das Teilchen im Schwerefeld besitzt.

$$\frac{mv_{kos}^2}{2} = \frac{mMG}{r}$$

$$v_{kos} = \sqrt{\frac{2MG}{r}}$$

Die Entweichgeschwindigkeit von der Erde beträgt z.B. 11.9 km/s. Das heißt, eine Kanonenkugel, Rakete u.ä. muß von der Erdoberfläche mit mindestens dieser Geschwindigkeit senkrecht in die Höhe geschossen werden (Die Normalkomponente der Geschwindigkeit muß 11.9 km/s betragen!), um nie mehr durch die Erdanziehung zu einer Rückkehr gezwungen zu werden (Dies ist wohlgermerkt eine Formulierung aus der Newtonschen Physik). Für einen Körper von größerer Masse und/oder kleinerem Radius ist die Entweichgeschwindigkeit größer. Hätte die Erde bei gleicher Masse ein Viertel ihres Radius, so würde ihre Entweichgeschwindigkeit das Doppelte, nämlich 23.8 km/s betragen.

Kritischer Umfang (Schwarzschild-Radius)

Schwarzschild überlegte, was passieren würde, wenn bei massereichen Objekten die Entweichgeschwindigkeit sich immer mehr der Lichtgeschwindigkeit nähern würde. Die Folge wäre, daß selbst Licht ab einem gewissen Abstand vom Zentrum der Masse nicht mehr entweichen könnte und für immer im Schwerefeld der Masse gefangen wäre. Dieser charakteristische Abstand ist der *Schwarzschild-Radius* \mathfrak{R} .

$$v_{kos} \rightarrow c$$

$$c^2 = \frac{2GM}{r}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{2GM}{c^2}$$

Für alle Massen kann somit ein Schwarzschild-Radius berechnet werden, der nur von der Masse und nicht von der Dichte bzw. vom Volumen abhängt. Für unsere Erde ergibt sich demnach ein Schwarzschild-Radius von ca. 9 mm, für unsere Sonne ca. 3 km. Diese Radien liegen also bei solchen verhältnismäßig kleinen Dichten innerhalb des interstellaren Körpers.

Für alle Objekte gilt, daß innerhalb des Schwarzschild-Radius die Newtonsche Physik ihre Gültigkeit verliert, denn die Raumzeit ist durch die Masse schüsselförmig gekrümmt und die relativistischen Effekte nehmen überhand. (So entspricht z.B. der Umfang eines Kreises um die Zentralmasse nicht mehr $2r\pi$ sondern weniger. Außerdem treten enorme Bahnabweichungen und unendliche Rotverschiebungen elektromagnetischer Signale auf.). Die Raumzeitkrümmung im Inneren des Radius ist außerordentlich groß und geht im Mittelpunkt gegen Unendlich. Da die Schwarzschild-Radien von Planeten oder unserer Sonne so klein sind und im Inneren des Körpers liegen, bemerken wir nichts von diesen relativistischen Effekten.

Was aber ist mit jenen Himmelskörpern, deren Schwarzschild-Radius aufgrund der großen Dichte gerade mit ihrer Oberfläche zusammenfällt bzw. außerhalb ihres Volumens liegt? Würden wir einen solchen Himmelskörper beobachten, was würden wir sehen?

Rotverschiebung

Aufgrund der Gravitation bzw. der starken raumzeitlichen Krümmung würde kein Licht vom Stern entweichen können. Klassisch könnte man sagen, daß die kinetische Energie der Photonen nicht ausreicht. Wellenmechanisch kann dies interpretiert werden als eine unendliche Rotverschiebung der Lichtwelle.

Die **Abb.V.2** zeigt eine Gegenüberstellung von physikalischem Raum und Hyperraum. Die Rotverschiebung ist durch die Wellenlänge bzw. Frequenz der Lichtwelle schematisch dargestellt.

Die Rotverschiebung des Lichts, also das Verhältnis von Frequenzdifferenz zu ursprünglicher Frequenz, kann in Beziehung zum Schwarzschildradius und Radius des Objekts gesetzt werden:

(Von einer vollständigen Herleitung der Rotverschiebung sei an dieser Stelle abgesehen, da sie schon in Kapitel Drei durchgeführt wurde)

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta U}{c^2} = \frac{GM}{Rc^2}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{2GM}{c^2}$$

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{2\mathfrak{R}}{R}$$

Die Kenntnis der Größenordnung von \mathfrak{R}/R ist neben der Berechenbarkeit der Rotverschiebung auch für die Abschätzung anderer relativistischer Phänomene (wie Lichtablenkung, Periheldrehung, Längenkontraktion, Zeitdilatation) von entscheidender Bedeutung. Deshalb sind in der folgenden Tabelle die Massen, Radien, Schwarzschild-Radien und das Verhältnis \mathfrak{R}/R verschiedener Objekte angeführt⁷:

⁷Tab. entnommen aus: Sexl, R. u H., *Weißer Zwerge - Schwarze Löcher*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1979, S.11

Tab.V.1: Auflistung der Massen, Radien R , Schwarzschildradien \mathfrak{R} und der Verhältnisse \mathfrak{R}/R von verschieden schweren und verschieden großen Objekten.

Objekt	Masse (kg)	Radius (m)	\mathfrak{R} (m)	\mathfrak{R}/R
Atomkern	10^{-26}	10^{-15}	10^{-53}	10^{-38}
Atom	10^{-26}	10^{-10}	10^{-53}	10^{-43}
Mensch	10^2	1	10^{-25}	10^{-25}
Erde	$6 \cdot 10^{24}$	$6 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{-3}$	10^{-9}
Weißer Zwerg	$2 \cdot 10^{30}$	10^7	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-4}$
Neutronenstern	$2 \cdot 10^{30}$	10^4	$3 \cdot 10^3$	0.3
Sonne	$2 \cdot 10^{30}$	$7 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^3$	10^{-6}
Galaxis	10^{41}	10^{21}	10^{14}	10^{-7}

Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß bei allen angeführten Objekte der Schwarzschild-Radius noch innerhalb des Körpers liegt ($\mathfrak{R}/R < 1$), auch bei einer großen Masse wie jener eines Neutronensterns.

Für Schwarze Löcher würde das Verhältnis \mathfrak{R}/R unendlich betragen!

2. SCHWARZE LÖCHER

Newtonsche Schwarze Löcher

Die Existenz "Schwarzer Löcher" wurde das erste Mal von John Mitchell und Pierre Simon Laplace im späten 18. Jahrhundert vorausgesagt. Diese Überlegungen waren auf Newtons Gravitationsgesetz und seiner Lichtkorpuskeltheorie begründet. Bei diesen newtonschen Schwarzen Löchern handelte es sich um Sterne, deren Radius kleiner als der kritische Umfang war und aufgrund der enorm großen Gravitation daher die Lichtkorpuskeln immer wieder auf den Stern zurückfielen und nicht entweichen konnten.⁸ (**Abb.V.3**)

Nach Newtons Theorie ist dem Gravitationskollaps durch den Innendruck des Sterns eine Grenze gesetzt. Das Endresultat ist ein zwar sehr dichter, aber statischer Stern. Es

⁸Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S.286

entstünde nach Newtons Gravitationstheorie niemals eine Singularität. (Auf den Begriff *Singularität* wird weiter unten näher eingegangen.)

2.1. Einsteinsche Schwarze Löcher

Die Gesetze der Allgemeinen Relativitätstheorie besagen, daß jeder Stern, dessen Umfang kleiner als der kritische Umfang ist, kollabieren muß. Seine Gravitation ist so stark, daß kein innerer Druck sie auszugleichen vermag.

Weiters folgt aus den relativistischen Gesetzen, daß ein Photon, das innerhalb des kritischen Umfangs emittiert wird, immer weiter nach innen fällt und nicht, wie nach Newton, hinausstrebt und dann umkehrt.

In **Abb.V.4** ist der Kollaps eines Sterns dargestellt.

Anmerkungen zum Raumzeit-Diagramm in Abb.V.4:

In großer Entfernung vom Stern entspricht das Bezugssystem einem statischen, d.h. es unterliegt nicht dem Kollaps. Die dort gemessene Zeit ist jene von einem/einer statischen Beobachter/in. In der Nähe des Sterns kollabiert das Bezugssystem zusammen mit der Sternoberfläche und zeigt jene Zeit an, die ein/e im kollabierenden System sitzende/r Beobachter/in erfahren würde. (Diagramme dieser Art wurden von David Finkelstein erfunden.)

Photon A verläßt die Oberfläche des Sterns in dem Augenblick, in dem dieser zu kollabieren beginnt. Es erreicht mit der Zeit immer größere Abstände zum Stern, verläßt diesen also auf immer.

Photon B und C werden emittiert, kurz bevor der kollabierende Stern den kritischen Umfang erreicht. Es benötigt eine im Vergleich zu A viel längere Zeit, um die gleiche Entfernung wie A vom Stern zu erreichen.

Photon D wird genau bei Erreichen des kritischen Umfangs emittiert und bleibt für immer dort.

Photon E wird erst innerhalb des kritischen Umfangs emittiert und kontinuierlich in Richtung Singularität gezogen. Dieses Photon würde dem Photon im Newtonschen Beispiel entsprechen. Hier ist ersichtlich, daß es sich eigentlich nie vom Stern entfernt, sondern ihm ständig näher kommt.

Im Folgenden werden wichtige Begriffe, die in Zusammenhang mit Schwarzen Löchern auftreten, besprochen:

Singularität

Der Begriff *Singularität* kommt aus der Mathematik. In der Mathematik wird die Lösung einer Differentialgleichung dann als *singulär* bezeichnet, wenn sie nicht durch

Wahl eines speziellen Parameters aus der allgemeinen Lösung hervorgeht⁹. Die *Singularität* stellt also einen Punkt dar, der in der allgemeine Gleichung einer Fläche oder eines Raumes oder einer Raumzeit nicht beschreibbar ist, sondern in Bezug auf die anderen beschreibbaren Punkte etwas Einzigartiges darstellt. Das Zentrum eines Schwarzen Lochs ist eine solche Einzigartigkeit in der Raumzeit und wird deshalb *Singularität* genannt.

Was unterscheidet das Zentrum eines Schwarzen Lochs von anderen Punkten in der Raumzeit?

- Aufgrund dessen, daß kein innerer Druck der Gravitation widerstehen konnte, zieht sich die Masse auf einen unendlich kleinen Raum zusammen. Sie ist also in einem ausdehnungslosen Punkt komprimiert.
- Die Dichte der Singularität ist infolgedessen unendlich groß.
- Aufgrund der unendlichen großen Dichte ist die Gravitation ebenfalls unendlich groß. Die Krümmung der Raumzeit ist unendlich, was bildlich ausgedrückt bedeutet, daß ein Loch in der Raumzeit entstanden ist.
- Weil in einer Singularität unendlich kleine Abstände auftreten, verlieren die klassisch-physikalischen Gesetze ihre Gültigkeit. Es muß die Quantenphysik zu Rate gezogen und im Idealfall eine Verbindung zwischen Quantenphysik und Relativistischer Physik gefunden werden ("Grand Unified Theory").
- Physikalische Vorgänge in der Singularität sind nicht beschreibbar.
- Ebenfalls ist unbekannt, ob bzw. was "hinter" der Singularität liegt.

Bildlich könnte man sagen: Ein Schwarzes Loch verursacht eine derartige Krümmung, also ein Loch in der Raumzeit, daß alles, was in das Loch hineinfällt, aus der Raumzeit "hinausfällt", für immer verschwunden ist, und zwar unbekannt wohin. Die Dinge, die hineinfallen, gehören fortan also nicht mehr zur Raumzeit.

Der Name "Schwarzes Loch" wurde übrigens von John Archibald Wheeler in den Sechzigerjahren ins Leben gerufen. Vorher wurden diese kosmischen Gebilde "Schwarzschild-Singularitäten" genannt. Singularität deshalb, weil man dachte, daß nach Überschreiten des Schwarzschild-Radius die Gravitation unendlich groß würde und die physikalischen Gesetze versagen. Tatsächlich ist dies zwar in der Singularität im Zentrum des Schwarzen Lochs der Fall, nicht jedoch nach Überschreiten des Schwarzschild-Radius. Es können sehr wohl Aussagen darüber gemacht werden, was z.B. ein/e Beobachter/in in einem Bezugssystem erfährt, das sich über den Schwarzschild-Radius bewegt und auf das Schwarze Loch zufällt. Wenn diese Person jedoch in die Singularität gefallen ist, sind keine Aussagen mehr möglich.

⁹Bartsch, Hans-Jochen, *Mathematische Formeln*, Leipzig: Fachbuchverlag, 1989, S.440

Ereignishorizont

In gewisser Weise schließt der Schwarzschild-Radius das innerhalb liegende Raumzeitgebiet vom außerhalb liegenden ab. Er ist nämlich die Grenze für den Informationsaustausch zwischen einem hineinfallenden und einem draußen bleibenden Bezugssystem. Jene Informationen, die nach Überschreiten des Schwarzschild-Radius vom hineinfallenden System ausgesendet werden, erreichen nie mehr eine/n außerhalb des Schwarzschild-Radius befindliche/n Empfänger/in. Deshalb wird der Schwarzschild-Radius auch *Ereignishorizont* genannt. Jenes Ereignis, das im hineinfallenden Bezugssystem passiert, wenn es sich genau am Schwarzschild-Radius befindet, ist das letzte für außenstehende Beobachter/innen wahrnehmbare Ereignis.

Imaginäre Zeit

Die "imaginäre Zeit" wurde von Steven Hawking eingeführt, und zwar als Ergebnis der Überlegungen zur Urknall-Singularität, die Ähnlichkeiten mit der Singularität eines Schwarzen Lochs hat. (Auf den Urknall, das ganz frühe und das zukünftige Universum wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da dies vom zentralen Thema "Zeitreisen" zu sehr wegführen würde.)

Ausgegangen wird bei dieser Überlegung davon, daß der Urknall nicht als erstes Ereignis zu sehen ist, ab dem Raum und Zeit begannen, weil ein Ereignis bereits eine Zeitkoordinate besitzt und es immer eine kleinere Zeit gibt, die sich noch mehr der Nicht-Zeit Null nähert. Um dieser Schwierigkeit zu entgehen, griff Hawking auf die Quantenmechanik zurück, in der keine scharfen Zustände angebar sind und somit auch Zeit "verschmiert" vorliegt. Das kleinste Zeitintervall in der Quantenmechanik beträgt 10^{-43} Sekunden. Dieses Zeitintervall wird auch als *Planck-Zeit* bezeichnet. Durch die Annahme einer imaginären Zeit kann mathematisch dem Problem einer Singularität ausgewichen werden.¹⁰

Die Rolle der imaginären Zeit in der Relativitätstheorie geht eigentlich zurück auf die Arbeit von Hermann Minkowski und der Berechnung raumzeitlicher Abstände. Das Quadrat der Entfernung in der Raumzeit wird berechnet aus der Summe der Quadrate der Raumkoordinaten *minus* dem Quadrat der mit der Lichtgeschwindigkeit multiplizierten Zeit. Ist das resultierende Ergebnis negativ, weil c^2t^2 größer ist als $(x^2+y^2+z^2)$, so ist die Wurzel daraus eine imaginäre Zahl. Physikalisch bedeutet eine imaginäre Entfernung, daß zwei Ereignisse zeitlich weiter getrennt sind als räumlich. Als Beispiel sei die raumzeitliche Entfernung des Grazer Uhrturms um 12.00h und des Grazer Uhrturms um 12.05h errechnet:

¹⁰Vgl. Davies, Paul, *Die Unsterblichkeit der Zeit. Die moderne Physik zwischen Rationalismus und Gott*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1995, S.278f

$$A^2 = (x_2 - x_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$$

$$A^2 = 0 - (3 \cdot 10^5 \text{ km/s})^2 (300 \text{ s})^2$$

$$A = \sqrt{(-81)} \cdot 10^7 \text{ km} = i \cdot 9 \cdot 10^7 \text{ km}$$

Die beiden Ereignisse haben eine imaginäre raumzeitliche Entfernung von 90 000 000 km. Der Abstand der Ereignisse ist zeitartig, das heißt, daß sie in kausalem Zusammenhang zueinander stehen können.

Das Auftreten imaginärer Zahlen in der Relativitätstheorie signalisiert also zeitliche Intervalle, während es bei Fehlen von imaginären Zahlen um rein räumliche Abstände geht.

Nach Überschreiten des Ereignishorizonts findet gewissermaßen eine "Raumzeit-Inversion" statt.¹¹ Dies soll heißen, daß zeitliche und räumliche Koordinaten "verschmiert" auftreten. Was bedeutet das für eine/n Beobachter/in, der/die sich innerhalb des Horizonts befindet? Diese Person kann z.B. nicht mehr räumlich an einem Punkt stehenbleiben, so wie wir Außenstehende nicht zeitlich stehen bleiben können. Der Raum "fließt" unaufhaltsam in eine Richtung dahin. In der reellen Zeit hingegen kann sich die Person aber räumlich bewegen wie sie will. Sie kann an jeden beliebigen Zeitpunkt "reisen". Daß diese Person trotzdem nicht der Singularität zu entkommen vermag, liegt daran, daß sie zwar die Zeitlinie des Schwarzen Lochs nach Belieben durchreisen kann, nicht aber den räumlichen Fluß aufhalten kann, der direkt in die Singularität führt.

¹¹Vgl. Halpern, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt 1977, S.213

2.2. Physikalische Eigenschaften Schwarzer Löcher

Von jenem Stern, der zu einem Schwarzen Loch kollabiert ist, bleibt sehr wenig Information zurück. Sobald der Stern beim Kollaps hinter dem Ereignishorizont verschwindet, stößt das Schwarze Loch nahezu alle Information über ihn in Form von Strahlung ab. Dies versteht man unter dem von John Wheeler geprägten Satz: "Ein Schwarzes Loch hat keine Haare."¹²

Gravitationswellen

Ausbuchtungen beispielsweise, die die Gestalt des Sterns von einer perfekten Kugelsymmetrie abweichen lassen, führen im Verlauf des Kollaps zu Verzerrungen der Raumzeit. Diese wiederum verzerren den Ereignishorizont. Sobald die Ausbeulung des Sterns hinter dem Ereignishorizont verschwunden ist, wird die durch sie erzeugte Ausbeulung des Ereignishorizonts rückgängig gemacht, und zwar durch Abstrahlung von *Gravitationswellen*. Diese sind "Kräuselungen" in der Raumzeit, die entweder im Schwarzen Loch verschwinden oder ins Universum entweichen. Zurück bleibt ein vollkommen sphärisches Schwarzes Loch. (Als Vergleich und zur Veranschaulichung kann man sich Licht als Kräuselungen des elektromagnetischen Feldes vorstellen. Dementsprechend sind Gravitationswellen Kräuselungen des Gravitationsfeldes.)

Magnetfelder

Magnetfelder kollabierender magnetischer Sterne werden in ähnlicher Weise "abgeschüttelt" wie Ausbuchtungen. Bevor der Ereignishorizont den kollabierenden Stern vollständig verhüllt, ist das Magnetfeld an den Stern gebunden und durch elektrische Ströme im Inneren des Sterns stabilisiert. Wird jedoch der Stern vom Horizont verschluckt, ist das außerhalb des Horizonts liegende Feld von den nunmehr innerhalb liegenden Strömen abgeschnitten. Infolgedessen wird das Feld als elektromagnetische Strahlung abgestoßen. Ein Teil der Strahlung wird vom Schwarzen Loch aufgenommen, der Rest verteilt sich im Weltraum. Zurück bleibt ein nicht-magnetisches Schwarzes Loch.

Was kann man nun über den vormaligen Stern bzw über das Schwarze Loch aussagen, außer lauter Negativdefinitionen ("Ein Schwarzes Loch ist n i c h t")?

¹²Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.310ff

Nun, nicht alle Information ist abstrahlbar! Die Erhaltungssätze der Physik besagen, daß es Größen gibt, die niemals in Strahlung umgewandelt werden können. Zu diesen Erhaltungsgrößen zählen: die Masse, der Drehimpuls und die Ladung¹³.

Masse, Gravitation

Es ist sinnlos, nach der "Größe" eines Schwarzen Lochs zu fragen, da die ganze Masse in einem Punkt konzentriert ist, daher ist die Größe Null. Von einer Größe kann nur in Zusammenhang mit dem Schwarzschild-Radius (Ereignishorizont) gesprochen werden, und dieser hängt wiederum von der Masse ab.

Die Masse eines Schwarzen Lochs kann indirekt aus der Umlaufzeit T benachbarter Sterne errechnet werden. Im Wesentlichen wird dabei die Zentrifugalbeschleunigung der Gravitationsbeschleunigung gleichgesetzt.

$$r\omega^2 = \frac{MG}{r^2}$$

$$M = \frac{\omega^2 r^3}{G}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{T^2 G}$$

Durch das enorme Gravitationsfeld werden sehr große Gezeitenkräfte erzeugt, die Sterne auseinanderreißen können. Die Sternbruchstücke und andere Gaswolken werden angezogen und bilden um das Loch herum eine sogenannte *Akkretionsscheibe*. Diese muß sich allerdings mit einer sehr hohen Umlaufgeschwindigkeit um das Loch bewegen, um nicht in das Loch zu stürzen.¹⁴

Wie würde nun ein/e Beobachterin diese Akkretionsscheibe sehen?

Durch das enorme Gravitationsfeld wird das Licht stark abgelenkt. (**Abb.V.5**)

¹³Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.323

¹⁴Quien, N., Wehrse, R., Kindl, Ch., *Licht auf Abwegen*. in: *Spektrum der Wissenschaft. Digest: Astrophysik*, Jänner 1999, S.96f

(Anm.: Das Licht bewegt sich auf Geodäten der gekrümmten Raumzeit. Ablenkung ist also ein Ausdruck der Newtonschen Physik, sei aber an dieser Stelle verwendet, weil die Veranschaulichung anhand einer zweidimensionalen Skizze erfolgt und in diesem Sinne sehr wohl von einer Ablenkung der geraden Bahn gesprochen werden kann.)

Die rotierende Akkretionsscheibe gibt Photonen im Ultraviolett- und Röntgenbereich ab. Somit liefert die Akkretion Hinweise auf das Vorhanden-Sein eines Schwarzen Lochs und läßt auf dessen Masse rückschließen.¹⁵

Ein Schwarzes Loch, das keine Ladung und keinen Drehimpuls besitzt, wäre also allein durch seine Masse und seine damit verbundene Gravitation charakterisiert. Es stellt gewissermaßen jenes ideale Schwarze Loch dar, für das Karl Schwarzschild die Lösung der Einsteingleichungen gefunden hat. Daher wird es auch als *Schwarzes Loch der Schwarzschild-Art*¹⁶ bezeichnet.

Ladung

Die Ladung eines Sterns bzw. eines Schwarzen Loches schafft ein elektrisches Feld, dessen Feldlinien radial nach außen gerichtet sind. (**Abb.V.6**)

Fällt in ein vormals neutrales Schwarzes Loch (der Schwarzschild-Art) eine Ladung, so ist dieses Loch von nun an geladen, positiv oder negativ. Ist es positiv geladen, stößt es fortan Protonen ab und zieht Elektronen an, ist es negativ geladen, verhält es sich umgekehrt.

Gunnar Nordström und Hans Reissner fanden um 1918 eine Lösung für geladene Schwarze Löcher, die aus dem Kollaps eines geladenen, vollkommen sphärischen, idealisierten Stern entstanden. Diese Lösung besagt, daß geladene Schwarze Löcher durch die Entstehung eines kleinen geschlossenen Universums eine Möglichkeit bieten würden, in ein anderes Universum zu gelangen.¹⁷ (Ob sich aus der Entwicklung solcher kleiner geschlossener Universen Zeitreisemöglichkeiten ergeben, wird weiter unten behandelt.)

¹⁵Vgl. Bergmann; Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.8, Sterne und Weltraum*, Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin/New York: de Gruyter 1997, S.285f

¹⁶Halpern, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Hamburg: Rowohlt 1977, S.215

¹⁷Vg. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knauer 1994, S.541

Rotation

Die Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen für rotierende Schwarze Löcher wurden in den Siebzigerjahren vom australischen Physiker Roy Kerr gefunden. Deshalb werden diese auch *Schwarze Löcher nach Kerr-Art* genannt. Eine der interessantesten Eigenschaften rotierender Schwarzer Löcher ist der wirbelsturmartige Strudel, den sie in dem ihn umgebenden Raum erzeugen. Der Raum wird durch die Rotation des Lochs buchstäblich angesogen. Am Horizont "kleben" Raum und Loch so aneinander, daß sich Raum und Horizont mit der selben Geschwindigkeit drehen. In weiterer Entfernung nimmt die Drehgeschwindigkeit des Raums ab.

Die Rotation eines Schwarzen Lochs hat vor allem Einfluß auf die Flugbahn hineinfallender Teilchen. Je näher die Teilchen dem Schwarzen Loch kommen, desto stärker werden sie vom Raumzeitwirbel um das Schwarze Loch erfaßt. Dabei spielt es keine Rolle, von welcher Seite ein Teilchen sich dem Schwarzen Loch nähert (**Abb.V.7**). Der/Die außenstehende statische Beobachter/in sieht das Teilchen, wie es sich dem Horizont immer mehr annähert. Dann scheint es auf dem rotierenden Horizont zu verharren. Aus Sicht des Teilchens hingegen vergeht in seinem Bezugssystem im Vergleich zu dem Bezugssystem des/der äußeren Beobachter/s/in die Zeit wegen der gravitationsbedingten Zeitdilatation viel langsamer. Das heißt, nachdem für den/die äußere/n Beobachter/in schon eine unendlich lange Zeitdauer verstrichen ist, ist für das Teilchen erst kurze Zeit vergangen. In diesem endlich kurzen Zeitintervall hat das Teilchen den Ereignishorizont erreicht. Ab jetzt fällt es weiter in das Schwarze Loch hinein.

Ringsingularität

In Hinblick auf Zeitreisen sind rotierende Schwarze Löcher deshalb interessant, weil sie zwei Ereignishorizonte besitzen. Kerr stellte fest, daß ein rotierender zusammenstürzender Stern nicht in einem Punkt endet, sondern ähnlich des durch die Rotation verformten Erdkörpers abflacht und schließlich zu einem Ring zusammengepreßt wird. Bei seitlicher Annäherung an den Ring wäre die raumzeitliche Krümmung immer noch unendlich und würde somit alles Auftreffende zerstören. Würde man jedoch eine Raumsonde axial in den Ring schießen, so würde sie zwar einer sehr großen Raumzeitkrümmung ausgesetzt sein, die jedoch nicht unpassierbar wie eine Punktsingularität wäre. Die Kerr-Löcher bilden passierbare *Ringsingularitäten*. Diese in Bezug auf Reisen in andere Raumzeit-Regionen sehr interessante Erkenntnis wird im Abschnitt über Wurmlöcher noch näher behandelt.

Roger Penrose stellte fest, daß rotierende Schwarze Löcher in dem sie umgebenden Strudel des Raums Rotationsenergie speichern. Er überlegte, daß diese Rotationsenergie

gie, da sie außerhalb des Horizonts liegt, nutzbar gemacht werden könnte. Man vermutet, daß Quasare ihre Energie auf diese Weise von kollabierten Sternen beziehen. Neben der Rotation führen Schwarze Löcher auch eine Pulsation aus. Diese Pulsation entspricht gewissermaßen der Eigenfrequenz des Loches, so wie die Töne einer Glocke ihre Eigenschwingungen sind.¹⁸ Interessant ist, daß die Pulsationsfrequenz unabhängig von der Rotationsfrequenz des Schwarzen Lochs zu sein scheint - die pulsierende Bewegung ist stabil. Die Pulsation entzieht dem Loch Rotationsenergie und strahlt Gravitationswellen ab.

Schwarze Löcher verdampfen

Steven Hawking stellte fest, daß, wenn zwei Schwarze Löcher sich zu einem vereinigen, die Fläche des neu entstandenen Horizonts größer ist als die Summe der Flächen der Ausgangshorizonte¹⁹. Dies schloß er daraus, daß jene Photonen, die genau am Horizont emittiert werden, für immer auf dem Horizont das Loch umkreisen. Ihre Wege am Ereignishorizont bewegen sich also stets parallel zueinander oder voneinander fort. Sie können nicht zusammenlaufen, weil sie sonst zusammenprallen würden. Auf diese Weise von ihrer Bahn abgekommen, würden sie sofort vom Loch verschluckt werden, was aber nicht passiert. Sie bleiben am Ereignishorizont. Nimmt man nun die Bahnen der Photonen als Maß für die Oberfläche des Ereignishorizonts, so folgt daraus, daß bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher der neue Ereignishorizont eine mindestens gleich große, wenn nicht sogar größere Oberfläche aufweist als die Summe der beiden Ausgangsoberflächen. Dies ist insofern verblüffend, als ja die Oberfläche einer aus zwei kleineren Kugeln zusammengesetzten großen Kugel immer kleiner ist als die Summe der beiden kleinen Kugeloberflächen. Hawking fiel die Ähnlichkeit zwischen der Vergrößerung der Horizontoberflächen und der Entropiezunahme nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik auf. Auf diese Weise nämlich konnte der 2. Hauptsatz auch unter Berücksichtigung Schwarzer Löcher seine Gültigkeit im Kosmos behalten. Wäre die Entropie des Schwarzen Lochs in keiner Weise abschätzbar, so wäre es möglich, die Entropie des Kosmos zu verringern, indem man einfach ein hohes Maß an Entropie (z.B. einen Behälter mit Gas) in das Schwarze Loch wirft. Die Entropie des Kosmos wäre somit verringert und dies würde gegen den 2. Hauptsatz verstoßen.

Sieht man jedoch die Fläche des Horizonts als Maß für die Entropie, so vergrößert sich diese, wenn Entropie, in welcher Form auch immer, in das Loch hineinfällt. Setzt sich

¹⁸Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S. 36f

¹⁹Vgl. Hawking, Steven W., *Eine kurze Geschichte der Zeit. Die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg: Rowohlt 1988, S.129f

die Summe der Entropie aus der Oberfläche des Ereignishorizonts und der Entropien außerhalb des Horizonts zusammen, so verringert sie sich niemals und der 2. Hauptsatz behält seine Gültigkeit.

Alles, was Entropie hat, strahlt. Diese Strahlung ist notwendig, um die Hauptsätze der Thermodynamik nicht zu verletzen. Würde der Körper nicht strahlen, würde sich die Energie in ihm anreichern, was letztlich einer höheren Ordnung gleichkäme. Durch die Strahlung wird die Energie ungeordnet verteilt. An diesem Punkt stellt sich das Problem, daß, wie zuvor ausdrücklich betont, nichts aus dem Schwarzen Loch entkommen kann, nicht einmal Licht, also keine elektromagnetischen Wellen.

Wie soll ein Schwarzes Loch strahlen?

An diesem Punkt der Überlegungen angelangt, schloß Hawking zum ersten Mal, seit Schwarze Löcher erforscht wurden, eine Brücke zur Quantenmechanik²⁰. Die Teilchen der Strahlung stammen nicht aus dem Inneren des Schwarzen Loches, sondern aus dem unmittelbar außerhalb liegenden Raum. Dieser Raum ist nicht völlig leer sondern von Feldern ausgefüllt so z.B. dem Gravitationsfeld und dem elektromagnetischen Feld. Mit dem Feld und seiner Veränderungsrate verhält es sich wie mit dem Ort und der Geschwindigkeit eines Teilchens: Nach der Heisenbergschen Unschärferelation kann ich beide Größen nur bis auf ein bestimmtes Intervall genau feststellen. Ein Feld im Raum kann also deshalb nicht genau Null sein, weil dann entweder der Wert des Feldes oder die Veränderungsrate exakt Null sein müßte, was aufgrund der Unschärfe nicht möglich ist. Daraus folgt, daß eine bestimmte Ungewißheit im Wert des Feldes bleibt. Diese Ungewißheit wird als *Vakuumsfluktuation* bezeichnet und äußert sich im Auftreten von *virtuellen Teilchen* (virtuelle Photonen oder virtuelle Gravitonen), die irgendwann wie "aus dem Nichts" erscheinen. Diese Teilchen entstehen aufgrund von Wahrscheinlichkeiten. Im Folgenden möchte ich zur Begriffsklärung *virtuelle Teilchen*, *Antiteilchen*, *imaginäre Teilchen* und *exotische Materie* kurz charakterisieren, um Verwechslungen vorzubeugen.

Virtuelle Teilchen

Die Wellenfluktuation ist eine zufällige Fluktuation der Energie des Feldes, einmal positiv, einmal negativ - die Durchschnittsenergie bleibt Null. So wie andere Wellen unterliegen auch die Vakuumsfluktuationen dem Welle-Teilchen-Dualismus.²¹ Der

²⁰Vgl. Hawking, Steven W., *Eine kurze Geschichte der Zeit. die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg: Rowohlt 1988, S.136f

²¹Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.499f

Teilchenaspekt kommt in der Vorstellung *virtueller Teilchen* zum Tragen, also Teilchen, die nicht direkt beobachtbar sind. Sie können aus Vakuumfluktuationen entstehen. Das sind Fluktuationen um den absoluten Nullpunkt der Energie. Aus Sicht der Quantenmechanik kann ein möglichst genauer Energiewert, also eine möglichst kleine Abweichung ΔE , nur durch eine sehr lange Messung, also ein möglichst großes Δt bestimmt werden. Anders ausgedrückt: Je genauer ich die Energie bestimmen will, desto länger muß ich messen. Die Meßgenauigkeit ist durch das Plancksche Wirkungsquantum h begrenzt. Dies besagt die Unschärferelation:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Jenes Energiefeld, das das Vakuum ausfüllt, hat, wenn ein langes zeitliches Intervall betrachtet wird, die Energie Null. Werden jedoch kurze zeitliche Intervalle betrachtet, so kann die Energie um ihren Nullpunkt bestimmte Abweichungen ΔE aufweisen. Es scheint, als ob Energie aus dem "Nichts" käme und eigentlich gar nicht da sein dürfte. Deshalb wird in Zusammenhang mit diesem Vorgang von *Virtualität* (im Gegensatz zu *Realität*) gesprochen. Aufgrund der Äquivalenz von Energie und Masse entsprechen diesen Energien *virtuelle Teilchen*, also Teilchen, die bei langfristiger Betrachtung des Feldes nicht existieren.

Teilchen - Antiteilchen

Teilchen und ihre Antiteilchen sind dadurch charakterisiert, daß sich ihre Quantenzahlen genau auf Null ergänzen. Ein Beispiel wäre ein Elektron-Positron-Paar. Ein Elektron und ein Positron unterscheiden sich z.B. durch ihre Ladungsquantenzahl: Das Elektron ist negativ geladen, das Positron positiv. Aufgrund des Gesetzes von der Erhaltung der Ladung können niemals einzelne Elektronen oder Positronen aus neutraler elektromagnetischer Strahlung gebildet werden, sondern immer nur Elektron-Positron-Paare.²² Allgemein formuliert können also aufgrund der Erhaltungssätze immer nur Teilchen-Antiteilchen-Paare aus Energie gebildet werden. Dies gilt sowohl für reelle, als auch für virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare. Ein virtuelles Teilchen ist also nicht dasselbe wie ein Antiteilchen! Ein virtuelles Teilchen kann ein *virtuelles Teilchen* oder ein *virtuelles Antiteilchen* sein (z.B. virtuelle Elektronen, virtuelle Positronen; beide sind virtuelle Teilchen)

²²Vgl. Weidner, R. T., Sells, R. L., *Elementare moderne Physik*, Wiesbaden: Vieweg 1982, S.126

Imaginäre Teilchen

Imaginäre Teilchen sind weder kurz-, noch langfristig beobachtbar sondern eigentlich als mathematische Lösungen interpretierbar. Diese Teilchen verfügen über imaginäre Masse und imaginäre Energien. Ein Beispiel für imaginäre Teilchen wären Tachyonen (siehe dazu Kapitel Sechs).

Exotische Materie

Ein Hauptcharakteristikum von "exotischer Materie" ist, daß sie über eine negative Masse verfügt. Exotische Materie entsteht theoretisch aus Vakuumfluktuationen, wie auch virtuelle Teilchen.

(Exotische Materie wird im Abschnitt über Wurmlöcher ausführlich behandelt. Hier erwähne ich sie nur der Vollständigkeit halber, um einen Überblick zu geben.)

Für die Hawkingsche Theorie, daß Schwarze Löcher strahlen, sei die Bildung eines virtuellen Teilchenpaares in der Nähe des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs schrittweise betrachtet (Siehe dazu **Abb.V.8**):

1. Aufgrund einer Vakuumsfluktuation in den positiven Energiebereich ($\Delta E > 0$) wird ein virtuelles Teilchenpaar gebildet.
2. Dieses Paar besteht aus einem virtuellen Teilchen (z.B. ein virtuelles Elektron) und einem virtuellen Antiteilchen (z.B. ein virtuelles Positron). Die Lebenszeit dieses Teilchenpaares ist aufgrund der Fluktuationszeit Δt sehr kurz, sodaß Teilchen und Antiteilchen sich normalerweise bald nach ihrer Entstehung gegenseitig vernichten, wobei genau jene Energie abgegeben wird, die sich aus der Vakuumsfluktuation zuvor ergab.
3. Wird ein virtuelles Teilchen-Antiteilchen-Paar in der Nähe des Ereignishorizonts gebildet, so ist es theoretisch möglich, daß entweder das Teilchen, oder das Antiteilchen in das Loch fällt, während sein Partner entkommen kann. Die Folge ist, daß das Teilchenpaar sich nicht vernichtet.
4. Trifft das entkommene virtuelle Teilchen außerhalb des Lochs auf das ihm entsprechende Antiteilchen (reell oder virtuell), so vernichten sich die beiden in einem Energieblitz.
5. Wird das entkommene Teilchen jedoch nicht vernichtet, sieht es für eine/n außenstehende/n Beobachter/in so aus, als ob das Teilchen, beispielsweise als Strahlung,

aus dem Schwarzen Loch kommt, daß das Schwarze Loch also eine Emission aufweist.

6. Was passiert mit den Teilchen, die in das Loch fallen? Aufgrund der hohen Gravitation können sie im Loch negative Energie annehmen. Die Energie eines Teilchens steigt nämlich, je weiter es von der Zentralmasse entfernt ist (dies gilt allgemein in Gravitationsfeldern), weil Energie erforderlich ist, um der Anziehung des Körpers stand zu halten²³. Entsprechend sinkt die Energie bei Annäherung an die Zentralmasse. Teilchen mit negativer Energie, die in das Schwarze Loch strömen, bewirken, daß die Masse des Schwarzen Lochs verringert wird. Dadurch verringert sich die Oberfläche des Ereignishorizonts, also die Entropie, was jedoch durch die abgegebene Strahlung ausgeglichen wird. Somit ist der 2. Hauptsatz erhalten²⁴.

Weiters konnte Hawking zeigen, daß die Strahlung des Schwarzen Lochs proportional zu seiner Oberflächengravitation ist, also daß ein Schwarzes Loch umso weniger strahlt, je größer es ist.

Nun stellt sich die Frage, ob Schwarze Löcher durch die Abstrahlung nicht letztendlich verdampfen würden? Schwarze Löcher verdampfen in der Tat. Je größer eine Schwarzes Loch ist, desto weniger strahlt es und desto länger braucht es zum Verdampfen.

Das Innere eines Schwarzen Lochs

Das Innere eines Schwarzen Lochs ist gewissermaßen etwas Mystisches. Und die verschiedenen Überlegungen zu jenem Inneren tragen den Charakter von Spekulationen - überprüfbar sind sie (noch) nicht. Es kommen verschiedene Möglichkeiten in Frage:

- 1) Im Inneren befindet sich eine aufgrund enormer Gezeitenkräfte alles zermalmende Singularität. (Schwarzschild-Loch)
- 2) Das Innere könnte ein Tor zu einem anderen Universum, einer anderen Raumzeit bilden. (Einstein-Rosen-Brücke, Kerr-Tunnel, Wurmlöcher)
- 3) Das Innere ist das Ende von Raum und Zeit und die Geburt von sogenanntem "Quantenschaum". Der Name *Quantenschaum* geht auf Wheeler zurück. Da in der Singularität alle erdenklichen Krümmungen und Formen des Raums erlaubt sind, spricht man von einem probabilistischen Schaum. Dieser Raum wird von der Quantengravitation beherrscht, in der es keinen Zeitbegriff wie dem der relativistischen Physik gibt. Daher spricht man auch davon, das es in der Singularität so etwas wie Zeit

²³Vgl. Hawking, Steven W., *Eine kurze Geschichte der Zeit. die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg: Rowohlt 1988, S.137

²⁴Vgl. Hawking, Steven W., *Eine kurze Geschichte der Zeit. die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg: Rowohlt 1988, S.138f

nicht gibt. Die Aufgabe der Quantengravitation ist es, die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Krümmungen und Formen in der Singularität zu bestimmen. Außerdem liegt es an der Quantengravitation, die Wahrscheinlichkeiten dafür zu bestimmen, ob und welche neuen Universen, die wieder klassischen Gesetzen gehorchen, aus der Singularität hervorgehen.

2.3. Zeitreisen mittels Schwarzer Löcher

Die Zeitreisemöglichkeiten, die sich durch ein Schwarzes Loch ergeben, sind einerseits gegeben durch die Effekte aus der *gravitationsbedingten Zeitdilatation* und der entsprechenden Längenkontraktion. Andererseits ergeben sich Zeitreisemöglichkeiten im Sinne von *interstellaren Reisen*, die mit einem "Hinausfallen" aus unserem Universum in ein anderes raumzeitliches Gebiet des eigenen oder eines fremden Universums verbunden sind.

Zeitdilatation

Die gravitationsbedingte Zeitdilatation wurde schon in Kapitel Vier behandelt. Diese Zeitdilatationseffekte (z.B. bei der Annäherung an ein Schwarzes Loch) unterscheiden sich, solange noch Informationsaustausch zwischen dem sich nähernden und dem statischen äußeren Bezugssystem besteht, nur quantitativ von jenen Zeitdilatationseffekten, die zwischen einem Bezugssystem auf einem Berg und einem anderen im Tal auftreten. Nach Überschreiten des Ereignishorizonts erhält der/die äußere Beobachter/in keine Signale mehr von dem/der hineinfallenden Beobachter/in. Aus Sicht des/der äußeren Beobachter/s/in vergeht die Zeit im fallenden Bezugssystem unendlich langsam. Das letzte Bild, das letzte Signal ist wie "eingefroren" am Horizont des Schwarzen Lochs und verblaßt allmählich, bis es ganz verschwunden ist. Man könnte sagen, aus Sicht des äußeren Systems nehmen die Geschehnisse im fallenden System immer mehr ab, wie in Zeitlupe, bis letztendlich nichts mehr passiert und ein "Standbild" übrig bleibt.

Der hieraus als Zeitreise interpretierbare Effekt ist jener, daß aus Sicht des statischen äußeren Bezugssystems im auf das Loch zufallenden Bezugssystem die Zeit immer langsamer vergeht und schließlich zum Stillstand kommt. Die Zeitdauer zwischen zwei Signalen steigt also, bis sie schließlich unendlich lang ist. Die Person im fallenden System bleibt sozusagen jünger als die Person außerhalb. Dies wird vom äußeren Bezugssystem als *Blick in die Vergangenheit* interpretiert.

Im Gegensatz dazu vergeht aus der Sicht der fallenden Person die Zeit im äußeren Bezugssystem immer schneller, die Zeitdauer zwischen den vom äußeren System gesendeten Signalen nimmt immer mehr ab. Man könnte sagen: Aus Sicht des fallen-

den Bezugssystemen passieren im äußeren System immer mehr Geschehnisse, immer mehr Signale, wie in einem Zeitraffer. Schließlich ist aus Sicht des fallenden Systems unendlich viel Zeit (nicht Zeitdauer!!) im Außensystem vergangen, während im eigenen System eine endliche Zeit vergangen ist. Dies kann vom fallenden System aus als *Blick in die Zukunft* des anderen Systems interpretiert werden.

Zu den obengenannten Schlüssen bezüglich der Zeit (Blick in die Vergangenheit bzw. Zukunft) kommen die beiden Beobachter/innen aus dem Grund, weil sie das Voranschreiten der Zeit im anderen System jeweils an ihrem eigenen messen. Als Maß für das Voranschreiten werden Veränderungen herangezogen (z.B. Alterungsprozesse). Aber es muß betont werden, daß der/die Beobachter/in in seinem/ihrer eigenen Bezugssystem kein wie auch immer ungewöhnliches Verstreichen von Zeit wahrnimmt. Auch dann nicht, wenn die Person von sehr weit (also aus einem flachen Raumzeitgebiet) sich der Singularität nähert und dabei den Ereignishorizont überschreitet. Obwohl die Zeitmaßstäbe sich in ihrem Bezugssystem dabei unaufhörlich ändern (aus Sicht des äußeren statischen Bezugssystems und somit aus Sicht der Leser/innen), nimmt die Person nichts Ungewöhnliches wahr. Dies ist für die/den Außenstehende/n dadurch begreiflich, daß ja auch die Gehirnprozesse, die für Wahrnehmung verantwortlich sind, den sich verändernden Zeitmaßstäben unterliegen. Hier seien die zeitlichen Taktgeber des Gehirns erwähnt, die in Kapitel Zwei ausführlich behandelt wurden. Für den/die außenstehende/n Beobachter/in ist also der Blick in die Vergangenheit quasi vorbei, wenn die beobachtete Person den Ereignishorizont überschritten hat. Dies stellt quasi ein Ende der Zeitreise für den/die außenstehende/n Beobachter/in dar.

Für die ins Schwarze Loch fallende Person geht die Reise weiter und es ergeben sich jedoch jetzt erst neue Zeitreisemöglichkeiten. Ist die Weiterreise Richtung Singularität unabwendbar, endet sie tödlich. Die ins Loch fallende Person bemerkt, daß die durch die enorme Gravitation hervorgerufenen Gezeitenwirkung eine Dehnung ihres Körpers in radialer Richtung (zum Zentrum des Lochs hin), und ein Zusammendrücken in tangentialer Richtung hervorruft. Nach Überschreiten des Horizonts wird diese Gezeitenwirkung plötzlich so stark, daß die Person auseinandergerissen werden würde. Zudem wird die Person feststellen, daß in ihrem eigenen Raumschiff (angenommen, sie befinde sich in einem Raumschiff) die Uhr an jenem Raumschiffende, das näher dem Lochzentrum ist, langsamer geht als jene am anderen Ende. Die Person steuert unabwendbar auf die Singularität zu, und obwohl zwischen Ereignishorizont und einer Singularität mit der Masse von 10 Millionen Sonnen ein Abstand von 25 Millionen

Kilometer liegen würde²⁵, würde die Person durch die Gezeitenkräfte lange vor Erreichen der Singularität sterben.

Gibt es irgendeine Möglichkeit, das Universum durch ein Schwarzes Loch zu verlassen und dabei nicht auf die tödliche Singularität zu treffen?

Kleine geschlossene Universen

Wie schon oben erwähnt könnte sich aus der Reissner-Nordström-Lösung für geladenen Schwarze Löcher eine Verbindung zu einem anderen Universum ergeben und somit eine Möglichkeit für interstellare Reisen gegeben sein.

In **Abb.V.9** wird die Entwicklung eines *kleinen geschlossenen Universums* skizziert.

In irgendeiner Weise scheint das starke elektrische Feld des hochkompakten Sterns dafür verantwortlich zu sein, daß rein theoretisch der Stern in ein anderes Universum hineinexplodiert. Allerdings ist die oben beschriebene Entwicklung sehr unwahrscheinlich. In bezug auf Zeitreisen ist anzumerken, daß die Entwicklung von kleinen geschlossenen Universen zwar interstellare Reisen erlaubt, daß es jedoch kein Zurück gibt.

Tunnel in der Raumzeit; Wurmlöcher

Andere Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen, die von Schwarzschild-Löchern ausgehen, können als *Tunnel in der Raumzeit* interpretiert werden. Diese Tunnel, in einigen Fällen auch *Wurmlöcher* genannt, stellen nicht nur theoretische Möglichkeiten für interstellare Reisen dar, sondern sind bis dato auch die einzigen Möglichkeiten, die Reisen in die Vergangenheit aus relativistischer Sicht erlauben.

²⁵Vgl. Halpern, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt 1977

3. RAUMZEIT-TUNNEL; "WURMLÖCHER"

Bereits ein Jahr, nachdem Einstein die Feldgleichungen formuliert hatte, erkannte der Wiener Physiker Ludwig Flamm, daß die Schwarzschild-Lösung der Feldgleichungen ein Wurmloch repräsentierte. Weitere diesbezügliche Forschung, wie z.B. von Albert Einstein und Nathan Rosen im Jahr 1930, brachten verschiedene Lösungen, die als "Tunnel" in ein anderes Universum interpretiert werden können. Die von Einstein und Rosen gefundene Lösung wird "Einstein-Rosen-Brücke" genannt²⁶.

In der geometrischen Interpretation verbinden sich hierbei *zwei* Löcher aus zwei verschiedenen Universen. Das eine Schwarze Loch wird zwar Richtung Singularität hin immer enger, öffnet sich aber plötzlich wieder zu einem anderen Universum hin²⁷. Eine andere Interpretation besagt, daß sich die Brücke auch zu einem entfernten Teil des eigenen Universum hin öffnen könnte. Diese Tunnel durch die Raumzeit werden heute *Wurmlöcher* genannt. (**Abb.V.10**)

Topologie

Die Topologie ist ein Teilgebiet der Mathematik, das sich damit beschäftigt, wie Objekte qualitativ miteinander oder mit sich selbst verbunden sind.²⁸

Der Weg durch Wurmlöcher ist *topologisch* verschieden vom herkömmlichen Weg durch die Raumzeit. Dies läßt sich veranschaulichen durch ein Beispiel mit einem Apfel. Angenommen, es existierten zweidimensionale Lebewesen in ihrem zweidimensionalen Universum, nämlich der Apfeloberfläche. Würden diese Wesen von einem Ort A zu einem Ort B gelangen wollen, würden sie auf der Oberfläche verschiedene Möglichkeiten (nämlich unendlich viele) haben, zum Ort B zu gelangen. (Es könnte beispielsweise von A nach B ein Gummiband gespannt werden. Durch Verschieben dieses Gummibandes könnten auf der Apfeloberfläche alle Wege nachgestellt werden.)

Wird nun durch ein höherdimensionales Lebewesen (z.B. ein Wurm) durch den Apfel ein Loch von A nach B gefressen, so stellt auch dieses Loch einen Weg zwischen A und B dar, nur unterscheidet sich dieser Weg von den anderen. Würde ich ein Gummiband durch das Loch von A nach B führen, so könnte ich die anderen Wege auf der Oberfläche nicht nachstellen, so sehr ich das Gummiband auch biegen und zerren würde. Dieser Weg durch das Loch ist *topologisch verschieden* von den anderen Wegen. Für die zweidimensionalen Wesen auf der Apfeloberfläche würde der Wurm,

²⁶Holman, Richard F., <http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics34.html> (Stand: 22.9.1999)

²⁷<http://zebu.uoregon.edu/~imamura/122/mar13/travel.html> (Stand: 23.9.1999)

²⁸Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.646

wenn er bei A zu fressen anfängt, im Nichts verschwinden und bei B aus dem Nichts auftauchen. Für uns als dreidimensionale Wesen hat der Apfel sehr wohl ein Inneres, auch wenn wir nicht hineinsehen können. Aber es ist uns prinzipiell vorstellbar, auch solche topologischen Wege durch einen Körper zu legen.

Wie würde sich uns aber ein mehr als dreidimensionaler Wurm darstellen, der ein Loch in die Raumzeit frißt, das von der Topologie her vollkommen verschieden von jenen Wegen ist, die wir wählen könnten (diese wären z.B. Wege, die das Licht bei der Ausbreitung nimmt)? Auch dieser Wurm würde in ein Nichts eintauchen, das wir aufgrund unserer raumzeitlichen Wahrnehmung nicht erkennen könnten, und aus einem Nichts wieder auftauchen. Zwischen diesem Eintauchpunkt und dem Auftauchpunkt würde ein *Wurmloch* liegen.

In **Abb.V.11** und **Abb.V.12** wird dargestellt, wie wir ein Wurmloch wahrnehmen würden.

Die Wurmlöcher würden, vorausgesetzt es gäbe sie und sie wären auch "bereisbar", die Möglichkeit eröffnen, nicht auf dem herkömmlichen Weg durch die Raumzeit zu reisen, sondern Gebiete der Raumzeit regelrecht zu überspringen. Da Wurmlöcher auch Raumzeitgebiete aus der Vergangenheit mit gegenwärtigen Raumzeitgebieten verbinden könnten, wären dadurch Tunnel, und möglicherweise auch Reisen, in die Vergangenheit vorstellbar.

Seit den Dreißiger Jahren wurden verschiedene, mehr oder weniger bereisbare, Wurmloch-Lösungen gefunden. Die in bezug auf Zeitreisen interessanteste Lösung wurde 1988 von Michael S. Morris und Kip S. Thorne in den *Physical Review Letters* veröffentlicht²⁹. Erstmals wurde in Zusammenhang mit Wurmlöchern in einer wissenschaftlichen Publikation von der Möglichkeit ihrer Nutzung als *Zeitmaschine* gesprochen. Die verschiedenen Lösungen, die als Wurmlöcher interpretiert werden können, sind grob in zwei Gruppen einteilbar: In *Lorentz-Wurmlöcher* und *Euklidische Wurmlöcher*.

- *Lorentz-Wurmlöcher* sind Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen und daher der Allgemeinen Relativitätstheorie zuzurechnen.
- *Euklidische Wurmlöcher* beruhen auf virtuellen, quantenmechanischen Prozessen und sind deshalb der Quantenfeldtheorie zuzurechnen.

Würden wir mit dem oben erwähnten Wurm von A nach B um die Wette laufen oder fliegen, so würden wir feststellen, daß er durch sein Loch die schnellste Verbindung

²⁹Morris, M. S., Thorne, K. S., Yurtsever, U., *Wormholes, Time Machines and the Weak Energy Condition*, *Physical Review Letters* 61, 1988, S.1446

zwischen A und B gefunden hat. In **Abb.V.13** ist ein Wurmloch als "Abkürzung" zwischen Erde und Wega skizziert.

Im Folgenden werden einige Lösungen für Tunnel in der Raumzeit bzw. Wurmlöcher kurz dargestellt und in Hinblick auf ihre Nutzung als interstellare bzw. Zeit-Reisemittel betrachtet.

3.1. Schwarzschild-Wurmloch

Ein Hauptcharakteristikum von Schwarzschild-Löchern ist, daß sie nicht rotieren. Das Schwarzschild-Wurmloch ist eine Erweiterung jener von Karl Schwarzschild 1916 gefundenen Lösung der Einsteinschen Feldgleichung, die später als *Schwarzes Loch nach Schwarzschild-Typ* bezeichnet wurde.

Eine mögliche Lösung für Schwarzschild-Wurmlöcher beinhaltet folgende zwei Charakteristika:

1. Wie schon aus dem Vorhergehenden bekannt, ist das Loch eine unendliche Krümmung in der Raumzeit, die von einem sogenannten Ereignishorizont (Schwarzschild-Radius) umgeben ist. Nach Übertreten dieses Horizonts wird man in das Schwarze Loch gesogen, und es gibt keine Möglichkeit mehr, zu entkommen.
2. Jede/r, die/der in den Schwarzschild-Radius fiele, würde ein *Spiegeluniversum* auf der "anderen Seite" der Raumzeit bemerken³⁰ Dieses Spiegeluniversum ist sichtbar, jedoch nicht erreichbar.

Dies soll anhand einer fiktiven Beobachtungen einer Raumsonde, die in den Schwarzschild-Radius fällt, veranschaulicht werden:

Eine besonders stabile Raumsonde, die den Ereignishorizont überschreitet, würde unweigerlich auf die Singularität zurasen, was ihre Zerstörung bedeuten würde. Auf dem Weg vom Eintritt in das Schwarze Loch bis zu ihrem schicksalhaften Ende könnte sie aber noch ihre Umgebung betrachten. Dazu würde ein Teil der Region im Inneren des Schwarzen Lochs gehören, aber auch ein Teil des Universums, aus dem sie kam. Die Informationen aus ihrem Universum fallen ja ebenfalls in das Loch, und überholen mitunter die Sonde. So könnte sie immer noch die Welt draußen sehen. Da die Zeit der Sonde unendlich viel langsamer vergeht als die Zeit im Universum draußen, würde die Sonde die Ereignisse im Universum bis zum Ende des Universums wie im Zeitraffer beobachten können.

³⁰Vgl. Kaku, Michio, *Im Hyperraum. Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen*, Hamburg: Rowohlt 1994, S.272

(Anm.: Aus diesem Grund spricht man auch davon, daß eine Person, die in ein Schwarzes Loch fiele, die gesamte "Zukunft" des Universums in Bruchteilen von Sekunden sehen würde. Dies klingt ein wenig nach Voraussetzung, was jedoch nicht zutrifft. Das, was die Person sieht, ist aus dem Grund als Zukunft zu bezeichnen, weil die Person (und auch die Leser/innen von Science Fiction) noch immer Bezug auf ihre "Heimat-Zeitmaßstäbe" nimmt (ähnlich wie im Zwillingsparadoxon), und das wären vermutlich jene der Erde. Das, was sie sieht, passiert *wirklich*, nur im Vergleich zum jetzigen Bezugssystem der Person unendlich viel schneller.)

Das Licht aus dem eigenen Universum der Sonde, dessen Quelle hinter der Sonde ist, würde aufgrund der Verzerrung des Raumes von vorne kommen, da die Sonde nun schon auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wäre. Dieses Licht wäre wie ein Halo um das Schwarze Loch. In der Mitte des Lochs wäre ein heller Lichtpunkt zu erkennen. Dieser Lichtpunkt würde immer größer werden, so lange, bis zwischen Halo aus dem eigenen Universum und Licht aus dem Universum auf der anderen Seite nur mehr ein dünner schwarzer Ring bestünde. Die Sonde könnte also in eine andere Raumzeitregion sehen, die sich ins Unendliche erstreckt.

Dieses andere Universum ist ein Spiegelbild des Universums, aus dem die Sonde kommt. Sogar die Zeitrichtung wäre im Spiegeluniversum umgekehrt. Die mathematische Formulierung der Verbindung zwischen den beiden Universen wird als *Einstein-Rosen-Brücke* bezeichnet. Das kosmische Objekt am anderen Ende der Brücke wird, da alle raumzeitlichen Ereignisse spiegelbildlich verlaufen, auch als *Weißes Loch* bezeichnet. Würde man einen Film über das Universum, in dem sich das Weiße Loch befindet, rückwärts laufen lassen, so würden die Vorgänge sich so darstellen, wie wir sie in unserem Universum beobachten.

Die Sonde kann jedoch nicht in das Spiegeluniversum eintreten, sie erreicht maximal die Singularität, die genau in der Mitte des Tunnels liegt. Würde jedoch eine Fortbewegung mit Überlichtgeschwindigkeit möglich sein, so wäre eine Durchquerung des Tunnels denkbar. Die Gefangenheit im Schwarzen Loch nach Übertreten des Schwarzschild-Radius gründet ja auf der Annahme, daß die Lichtgeschwindigkeit die höchstmögliche Entweichgeschwindigkeit ist. Würde man höhere Entweichgeschwindigkeiten zulassen, wäre eine Durchquerung über die Singularität hinaus möglich.

(Hier stellt sich die Frage, ob sich irgendetwas mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen kann? Rein theoretisch können Teilchen angenommen werden, die schneller als das Licht sind: sogenannte *Tachyonen*. Auf Tachyonen wird in Kapitel Sechs in Zusammenhang mit Quantenoptik näher eingegangen.)

Das oben beschriebene Beispiel der Sonde, die in ein Schwarzschild-Wurmloch fällt, zeigt nur eine Möglichkeit, in welches Universum sich das Wurmloch öffnen könnte, nämlich in ein Spiegeluniversum. Im Folgenden werden jene Möglichkeiten darge-

stellt, wie sich Schwarzschild-Wurmlöcher auf der anderen Seite öffnen könnten. Davon ist abhängig, ob eine Reise durch ein Wurmloch möglich ist oder nicht.

Möglichkeiten für Reisen durch Schwarzschild-Wurmlöchern

a) Würde sich am anderen Ende des Tunnels ebenfalls ein Schwarzes Loch befinden, so wäre das reisende Objekt zwischen zwei Ereignishorizonten gefangen und könnte nur mit Überlichtgeschwindigkeit entkommen. Diese ist jedoch für massereiche Objekte (z.B. reelle Teilchen und letztlich auch Menschen) unmöglich.

b) Angenommen, es befände sich auf der anderen Seite ein Weißes Loch mit einem entsprechenden Anti-Ereignishorizont (aus dem alles herauskommt und nichts hineinfällt). Auch dieser Tunnel wäre nicht durchreisbar, weil Anti-Horizonte sehr instabil sind. Ein Paket von Lichtwellen mit geringer Energie, das auf den Antihorizont zufällt, verschiebt sich immer mehr in den blauen Bereich und wird somit immer energiereicher. Dieses hochenergetische Wellenpaket würde den Antihorizont binnen Sekunden nach seiner Bildung in einen Horizont umwandeln, der das andere Universum gegenüber dem Tunnel wieder verschließen würde.

c) Ein Schwarzschild-Wurmloch ist dynamisch und nicht statisch. Mit Fortschreiten der Zeit expandiert die Öffnung des Wurmlochs von Null bis zu einer maximalen Größe und kontrahiert wieder zu Null.

Abb.V.14 zeigt die Entwicklung eines dynamischen Wurmlochs.

Das Wurmloch gewährt also während seiner Öffnungsphase einen kurzen Blick in ein anderes Universum, so als ob sich die Blende eines Objektivs kurz öffnen würde. Auf der anderen Seite wäre ein Austreten möglich, da die Singularität zu diesem Zeitpunkt der Urknallsingularität ähnelt und Masse "hinauswirft". Dies ist die einzige kurze Zeitspanne, während der eine Durchquerung möglich wäre. Da jedoch nicht einmal Licht schnell genug ist, um vor der Abschnürphase die ganze Einstein-Rosen-Brücke zu durchqueren, bildet sich wieder eine Singularität, diesmal eine "alles verschluckende", sodaß alles in ihr vernichtet wird. Somit ist dieses Wurmloch für Objekte mit realen Ruhemassen unpassierbar.

d) Die enormen Gezeitenkräfte, die in einem Schwarzschild-Loch wirken, sprechen gegen eine mögliche Reise durch den Tunnel. Noch lange bevor eine Sonde die

Singularität erreichen würde, würde sie von den Gezeitenkräften zerstört worden sein.³¹

Fazit: Eine Zeitreise mittels Schwarzschild-Wurmloch ist nicht möglich!

3.2. Kerr-Tunnel

Roy Kerr fand die Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen für rotierende Schwarze Löcher (*Schwarze Löcher vom Kerr-Typ*). Eine Schlußfolgerung aus dieser Lösung ist, daß rotierende Schwarze Löcher keine Punkt-Singularität wie Schwarzschild-Löcher aufweisen, sondern eine ringförmige Singularität. Im Zentrum der Ringsingularität gibt es ein zwar enormes, aber endliches Gravitationsfeld, sodaß eine Durchquerung des Tunnels prinzipiell möglich wäre. Die Kerr Lösung ist somit als Tor in ein anderes Universum zu interpretieren.

Reisen mittels Kerr-Tunnel

- Ein Kerr-Tunnel ist sehr instabil. Würde ein Lichtwellenpaket in ein Kerr-Loch fallen, würde es immer energiereicher, immer stärker blauverschoben, je näher es dem Horizont käme. Die hohe Energie würde starke Veränderungen des Gravitationsfeldes herbeiführen, die den Tunnel zusammenbrechen ließen. Übrig bliebe eine Singularität, der nicht zu entkommen ist.
- Wäre es möglich, einen Kerr-Tunnel mit Ringsingularität zu stabilisieren, so wäre aus klassisch-physikalischer Sicht eine Durchquerung des Tunnels möglich. Das Loch müßte nur genügend Masse aufweisen und sehr schnell rotieren. Aus Sicht der Quantenfeldtheorie würden jedoch solche Ringsingularitäten eine intensive Strahlung an hochenergetischen Teilchen erzeugen. Diese Strahlung würde jegliche Durchquerung des Tunnels unmöglich machen.³²

Fazit: Auch ein Kerr-Tunnel ist nicht für interstellare Reisen bzw. Zeitreisen geeignet.

3.3. Passierbare Wurmlöcher

³¹Vgl. Morris, M. S., Thorne, K. S., *Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity*, Am. J. Phys. 56 (5), May 1988

³²Vgl. Morris, M. S., Thorne, K. S., *Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity*, Am. J. Phys. 56 (5), May 1988

Um durchreisbare Wurm Löcher zu finden, gingen die Physiker Michael Morris, Kip Thorne und Ulvi Yurtsever die Berechnung von der anderen Seite her an: Sie fragten nach den Eigenschaften, die ein Wurmloch haben müßte um durchreisbar zu sein, führten die dementsprechenden Rechnungen durch und prüften das Ergebnis, ob es den Einsteinschen Feldgleichungen widersprechen würde oder mit ihnen vereinbar wäre. Den eigentlichen Anstoß für diese Forschungsarbeit lieferte Carl Sagan, ein Freund von Thorne, der für seinen Roman *Contact* eine der Physik nicht widersprechende Möglichkeit für interstellare Abkürzungen suchte.

Notwendige Eigenschaften passierbarer Wurmlöcher³³

1) Passierbare Wurmlöcher sollten sowohl sphärisch als auch statisch, also zeitunabhängig, sein:

Sphärisch aufgrund von mathematischer Vereinfachung. Statisch, um zu gewährleisten, daß das Wurmloch nicht durch Abschnürung zusammenbricht, bevor man es passiert hat.

2) Die Lösung für das Wurmloch muß den Einsteinschen Feldgleichungen genügen. Dabei wird die Richtigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesetzt.

3) Die Wurmloch-Lösung muß einen Tunnel beschreiben, der zwei flache Raumzeitregionen miteinander verbindet.

4) Es sollte keinen Horizont geben, da ein Horizont eine Reise be- bzw. verhindern würde.

5) Die auf die/den Reisende/n wirkenden Gezeitenkräfte der Gravitation müssen möglichst klein sein, sodaß sie erträglich sind (im Idealfall also etwa der Erdbeschleunigung entsprechen).

6) Es muß möglich sein, das Wurmloch in einer halbwegs kurzen Zeit zu durchqueren (z.B. weniger als ein Jahr). Diese Zeit sollte sich nicht nur für die/den Reisende/n ergeben, sondern auch für etwaige Beobachter/innen, die außerhalb des Wurmlochs z.B. auf die/den Reisende/n warten.

³³Vgl. Morris, M. S., Thorne, K. S., *Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity*, Am. J. Phys. 56 (5), May 1988

7) Materie und Felder, durch die das Wurmloch in der Raumzeit entsteht, müssen so sein, daß sie den Tunnel offenhalten und die Abschnürung durch seine eigene Gravitation verhindern.

8) Das Wurmloch sollte durch etwaige passierende Objekte nicht instabil werden.

Die Punkte 1) bis 4) sind allgemeine Kriterien für Wurmlöcher, die Punkte 5) bis 8) sollten speziell in Hinsicht auf interstellare Reisen von Menschen erfüllt werden. In ihnen werden Parameter des menschlichen Körpers berücksichtigt.

Die größte Schwierigkeit besteht darin, eine Möglichkeit zu finden, daß das Wurmloch offen bleibt und sich nicht abschnürt. Das Wurmloch muß also von einem Material durchsetzt sein, das durch seine Gravitation die Wände auseinanderdrückt. Dieses Material unterscheidet sich von jeder bekannten Materie und wird daher "exotische Materie" genannt.

Exotische Materie

Aus den Einsteinschen Feldgleichungen ergibt sich, daß durch die Materie eines Wurmlochs ein ins Wurmloch eintretender Lichtstrahl defokussiert werden müsse, ebenso wie durch sie die Wände des Wurmlochs auseinandergehalten werden und nicht zusammenlaufen. (**Abb.V.15**)

Die Berechnungen von Morris, Thorne und Yurtsever ergaben, daß die Materie entlang des Wurmlochs einer ungeheuren mechanischen Spannung ausgesetzt wäre, um das Loch offenzuhalten. Je kleiner die Passage, desto größer müßte die Spannung sein. Die Spannung, die erforderlich ist, muß mindestens 10^{17} mal größer sein, als die Dichte der Materie! Soweit bekannt, gibt es jedoch im Universum keine Materie, deren Spannung soviel größer ist als ihre Dichte ist.

Beispiel: Ein Stahlstab besitzt eine durchschnittliche Dichte von ca. 30 g/cm^3 . Seine Zugfestigkeit liegt bei ca. 10000 kg/cm^2 . Würde man Stahl als Wurmlochmaterie auswählen, müßte es eine Zugfestigkeit von mindestens 10^{15} kg/cm^2 , also $1000\ 000\ 000\ 000\ 000 \text{ kg/cm}^2$ aushalten!

Der Faktor 10^{17} entspricht übrigens dem Quadrat des Wertes der Lichtgeschwindigkeit (in m/s gemessen): $(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 \approx 10^{17} \text{ m}^2/\text{s}^2$

Da Masse und Energie äquivalent sind ($E=mc^2$), können in äquivalenter Weise die Überlegungen mit Betrachtung der Energie fortgesetzt werden. Analog kann also gesagt werden, daß Gravitationskraft von Energiedichte ($=\text{Energie}/\text{m}^3$) erzeugt wird.

$$(\text{Energie}/m^3) = (\text{Masse} \cdot c^2)/m^3 \sim (\text{Masse} \cdot m^2/s^2)/m^3 = \text{Masse}/ms^2 = \text{Kraft}/m^2 = \text{Druck}$$

Alle uns bekannten Energiedichten sind positiv und führen zu einer positiven Gravitation: Ein Lichtstrahl wird in einem solchen Gravitationsfeld fokussiert. Dies sieht man am Beispiel der Gravitationslinsenwirkung von Galaxien oder Schwarzen Löchern.

Soll ein Lichtstrahl defokussiert werden bzw. sollen bestimmte raumzeitliche Strukturen auseinandergedrückt anstatt zusammengeführt werden, so muß eine *negative Energiedichte* vorhanden sein. Genauer gesagt: Über den Weg des Lichtstrahls durch das Wurmloch gemittelt muß die Energiedichte negativ sein. Das heißt, daß die Energie der Wurmlochregion kleiner sein muß als jene eines normalen Vakuums.³⁴

Negative Energiedichte ist kein absoluter Begriff. Eine Energiedichte kann in einem Bezugssystem negativ, in einem anderen positiv sein. Fast alle bekannten Formen der Materie haben jedoch in jedem beliebigen Bezugssystem eine im Durchschnitt positive Energiedichte. Daher wurde vermutet, daß die Existenz einer solchen Materie physikalisch unmöglich und verboten wäre.³⁵

Negative Energiedichte entspricht einer negativen Masse, was jedoch nicht mit Antimaterie verwechselt werden darf! Im Folgenden sei anhand eines Beispiels beschrieben, daß negative Masse etwas physikalisch sehr Ungewöhnliches darstellt:

Es sei ein Fußballspiel betrachtet: Zwei Schiedsrichter messen die Zeit, die der Ball braucht, um vom einen Spieler zum anderen zu gelangen. Der eine Schiedsrichter befindet sich am Spielfeldrand, der andere in einem vorbeirasenden Hochgeschwindigkeitszug. Beide Schiedsrichter werden aufgrund der speziellen Zeitdilatation zu verschiedenen Ergebnissen der Zeitdauer kommen. Beide Ergebnisse sind richtig. Das gleiche gilt für die Masse des Fußballs. Wie bei der Zeit werden beide Schiedsrichter aufgrund der Relativität auf verschiedene Impulse, und somit auf verschiedene Massen kommen. Jener Schiedsrichter im Hochgeschwindigkeitszug wird für den Ball eine weit größere Masse messen. Wieder sind beide Messungen trotz unterschiedlicher Ergebnisse richtig. Beide werden jedoch übereinstimmend feststellen, daß die Masse des Balls *positiv* ist. Unter keinen bekannten relativistischen Umständen könnte einer von beiden feststellen, daß die Masse des Fußballs negativ wird, also z.B. *minus 5 kg* beträgt. Dies scheint physikalisch unmöglich zu sein.³⁶

³⁴Visser, Matt, *What exactly is a "wormhole"?*, Scientific American, Ask the Experts, <http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics34.html> (Stand: 22.9.1999)

³⁵Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.559

³⁶Vgl. Halpern, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt 1977, S.135f

Aufgrund der für die Physik ungewöhnlichen Eigenschaften dieser gesuchten Materie wird diese als *exotische Materie* bezeichnet. Das Auftreten exotischer Materie ist physikalisch gewissermaßen "tabu", denn sie würde gegen die sogenannte *schwache Energiebedingung* verstoßen. Die schwache Energiebedingung besagt, daß es keine negativen Energien geben darf.

Wo ließe sich exotische Materie finden?

Ein möglicher Ansatz für die Suche nach exotischer Materie liegt im Bereich der Quantenmechanik. In der Quantenmechanik treten immer wieder Ereignisse und Ergebnisse auf, die in der klassischen Mechanik nicht möglich wären. Grundlegend hierfür ist die Heisenbergsche Unschärferelation, wonach eine physikalische Größe immer von bestimmten Unschärfen (Fluktuationen) einer anderen Größe beeinträchtigt wird.

Casimir-Effekt

Um auf die quantentheoretische Möglichkeit zur Gewinnung negativer Energiedichte einzugehen, beginnen wir vorerst damit, das Vakuum im Raum aus der Sicht der Quantenmechanik zu betrachten: Nach der Quantenfeldtheorie ist das Vakuum alles andere als leer. Vielmehr ist es mit Fluktuationen elektromagnetischer Wellen verschiedenster Wellenlänge gefüllt, die niemals ganz eliminiert werden können. Sobald versucht wird, ein leeres Vakuum von elektromagnetischen Feldern freizuhalten, gibt es noch immer unvorhersehbare elektromagnetische Wellen, die aus dem Wechselspiel mit jenen an das Vakuum angrenzenden Feldern entstehen. Die Felder an einem Ort borgen sich Energie von Feldern an einem anderen Ort und hinterlassen dort ein Energiedefizit, sodaß die Energie vorübergehend negativ ist. Dann wird die Energie wieder zurückgegeben. Im Schnitt beträgt die Gesamtenergie Null.³⁷

Vakuumfluktuationen kann man nicht dadurch ausschalten, daß man ihnen Energie entzieht, weil sie eigentlich keine Energie besitzen. Es sind Fluktuationen um den Nullpunkt der Energie. Der Grund liegt in der Unschärferelation. Eine Energie gleich Null wäre ein scharfer Wert und würde in Konsequenz bedeuten, daß sich ein Teilchen in absoluter Ruhe, also an einem scharfen Ort, befindet. Dies ist quantenmechanisch absolut unmöglich!

Der leere Raum besitzt also durch Fluktuationen einen gewissen Betrag an Energie, die zwar nicht faßbar (Summe Null), jedoch immer da ist.

³⁷Vgl. Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994, S.494 und S.561f

In **Abb.V.16** wird ein Experiment zu Vakuumsfluktuationen skizziert

Das Experiment ist aufgebaut aus zwei Metallplatten (In der Literatur finden sich Beispiele, in denen dieses Experiment anstelle von Metallplatten mit zwei Spiegeln durchgeführt wird), die parallel zueinander in einem Vakuum postiert sind. Je nach Abstand der beiden Metallplatten werden manche Wellenlängen der elektromagnetischen Vakuumsfluktuationen als ganzzahlige Vielfache in den Abstand hineinpassen und hin-und herreflektiert werden, andere nicht. Je weiter die beiden Platten einander angenähert werden, desto weniger lange Wellen werden hineinpassen (Hier wird wieder von einer endlichen Wellenlängenanzahl ausgegangen. Siehe dazu Anm. oben.). Das Resultat ist, daß aufgrund des Mangels an langen Wellen die Energie zwischen den Spiegeln geringer ist als außerhalb im Vakuum, wo Wellen aller Wellenlängen vorkommen. Folglich ist auch die Energiedichte geringer, und es herrscht weniger Spannung, die die Spiegel auseinanderhält. Die Spiegel werden sich daher anziehen.

Dieser Effekt, daß zwei Platten im Vakuum sich gegenseitig anziehen, wurde 1948 vom holländischen Physiker Hendrik Casimir vorausgesagt und wird nach ihm als *Casimir-Effekt* bezeichnet.

Der Casimir-Effekt kann so interpretiert werden, daß zwischen den Spiegeln negative Energie vorhanden ist, außerhalb der Spiegel die Energie positiv ist.

Somit kann der Casimir-Effekt als Beweis dafür gelten, daß negative Energien (und somit negative Massen) zumindest in mikroskopisch kleinem Ausmaß erzeugbar sind.

Kip Thorne wies darauf hin, daß exotische Materie gegen kein bekanntes physikalisches Gesetz zu verstoßen scheint, und fügte vorsichtig hinzu, daß eines Tages durchaus ein Beweis gegen die Existenz exotischer Materie gefunden werden könnte. Voller Zuversicht erklärte er jedoch: "Aus einem einzigen Wurmloch kann eine beliebig entwickelte Zivilisation eine Maschine für Reisen rückwärts in die Zeit konstruieren."³⁸

Wurmlöcher müßten also verschiedensten Bedingungen genügen, um passierbar zu sein. Vor allem die Existenz der exotischen Materie in großen Mengen ist eine Voraussetzung, die Auftreten bzw. Konstruktion von Wurmlöchern sehr unwahrscheinlich macht.

³⁸Zitiert in: Kaku, Michio, *Im Hyperraum. Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen*, Hamburg: Rowohlt 1994, S.301

Konsequenzen einer Reise in die Vergangenheit

Sollte es passierbare Wurm Löcher irgendwann einmal geben, würden dann Zeitreisen in andere Regionen der Raumzeit, wie z.B. die Vergangenheit, möglich sein?

Stephen Hawking meint: Nein. Reisen in die Vergangenheit würden verschiedenste paradoxe Situationen produzieren. So z.B. daß jemand zurückreist und seine/ihre Mutter (oder Großvater) umbringt. Gibt es diese/n Täter/in in der Gegenwart oder nicht? Dieses Beispiel ist als *Großvater-* oder auch *Muttermord-Paradoxon* bekannt. Aber eine paradoxe Situation ist noch keine Begründung für die Unmöglichkeit von Zeitreisen. Hawking meint, daß Quanteneffekte entweder die Bildung von Zeitschleifen verhindern, oder potentielle Zeitreisende zerstört würden (Nach Hawking nehmen die Schwankungen von Quantenfeldern in der Nähe von Zeitschleifen unbegrenzt zu.). Dies wird als *Chronology protection conjecture* bezeichnet.³⁹

Diese Theorie Hawkings ist jedoch ohne jeden Beweis und die Suche nach den geschlossenen zeitartigen Weltlinien mittels Wurmlöchern geht weiter.

Am Institut für Theoretische Physik in Wien beschäftigen sich Peter C. Aichelburg und Friedrich Schein mit diesem Thema. Sie konstruierten ein Wurmloch, das zwei Regionen des selben Universums miteinander verbindet und zeitartig geschlossene Linien, die durch das Wurmloch gehen, ermöglicht.⁴⁰ Die zwei Öffnungen des Wurmlochs entsprechen zwei getrennten Massen, zwischen denen Gravitation wirken würde. Dies würde die Statik des Wurmlochs beeinträchtigen. Aichelburg und Schein schlagen vor, daß dieses Sich-aufeinander-Zubewegen dadurch eliminierbar wäre, indem die Wurmlochöffnungen in der Raumzeit quasi "verankert" wären, z.B. durch Strings.⁴¹ Von einer Vertiefung in diese Theorie sei hier abgesehen, da dies über den Rahmen dieser Arbeit hinginge.

³⁹Vgl. Hawking, Steven, *Chronology protection conjecture*, Physical Review Letters 46, 1992

⁴⁰Vgl. Aichelburg, P. C., Schein, F., *Wormholes and timetravel*, Acta Physica Polonica, Vol. 29, 1998

⁴¹Vgl. Schein, F., Aichelburg, P. C., Israel, W., *String-supported wormhole spacetimes containing closed timelike curves*, Physical Review Letters 54, 1996

4. GESCHLOSSENE ZEITARTIGE KURVEN

Eine Reise in die Vergangenheit würde in einer Raumzeit-geometrischen Darstellung eine geschlossene zeitartige Kurve bedeuten. Der/Die Reisende würde also ein zweites Mal an ein und denselben raumzeitlichen Punkt gelangen. Diese geschlossenen Weltlinien werden auch *Zeitschleifen* genannt. Zeitschleifen stellen gewissermaßen Schwachpunkte der Relativitätstheorie dar, da sie das Kausalitätsprinzip verletzen.

In der euklidischen Raumzeit-Geometrie sind geschlossene zeitartige Kurven nicht möglich. Das Objekt müßte sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen, was von der Relativitätstheorie verboten ist.

4.1. Gödels rotierendes Universum

In den Vierziger Jahren stieß der Wiener Mathematiker Kurt Gödel auf eine Lösung der Einstein-Gleichungen, die bestimmte Formen von Zeitreisen erlaubten. (Kurt Gödel wurde ursprünglich bekannt, als er bewies, daß die Widerspruchsfreiheit der Arithmetik sich nicht beweisen läßt. Somit sind jene Axiome, auf die sich die Mathematik gründet, selbst nicht begründbar. Daraus ergeben sich, nach Gödel, gewisse Paradoxa.)

Gödels Lösung der Einstein-Gleichungen geht von der Annahme aus, daß das gesamte Universum rotiert. Aufgrund dieser Rotation "kippen" die raumzeitlichen Lichtkegel, und zwar umso stärker, je weiter weg von der Rotationsachse sie sich befinden. Im Bereich der Rotationsachse stehen die Zeitachsen der Lichtkegel und die Rotationsachse des Universums parallel zueinander. In genügend weiter Entfernung liegen die Zeitachsen der Lichtkegel normal zur Rotationsachse bzw. tangential zum rotierenden Universum. Die Zeitachse des Lichtkegels zeigt in Fortbewegungsrichtung. Das bedeutet, daß sich das Objekt auf einer zeitartigen Linie in seine Zukunft bewegt, also die Zeitrichtung immer positiv ist. Trotzdem wird das Objekt, wenn es eine Kreisbahn senkrecht zur Rotationsachse beschreibt, an raumzeitliche Punkte gelangen, an denen es schon einmal war. Es kann also eine zeitartige Linie geschlossen werden, obwohl das Objekt sich immer in seine Zukunft und nicht mit Überlichtgeschwindigkeit bewegt.

Gödels rotierendes Universum ist in **Abb.V.17** dargestellt.

Gödels Universum müßte eine beträchtliche Rotationsgeschwindigkeit aufweisen, um der Gravitation entgegenzuwirken (1 Umdrehung in 70 Milliarden Jahren⁴²). Bei

⁴²Vgl. Halpern, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt 1977, S.208

einem Universum mit dieser Rotationsgeschwindigkeit hätte die Kreisbahn, die zurückzulegen wäre, um in die eigene Vergangenheit oder Zukunft zu gelangen, eine Länge von 100 Milliarden Lichtjahren. Dies ist eine Million mal so breit wie die Milchstraße! Um die für Zeitreisen zurückzulegenden Entfernungen zu reduzieren, müßte das Universum viel schneller rotieren. Rotationen in solcher Stärke würden beobachtbare Effekte hervorrufen (z.B. Anisotropien der Hintergrundstrahlung). Da keinerlei Effekte dieser Art beobachtet werden, muß man davon ausgehen, daß unser Universum nicht rotiert. Somit bleibt die Gödelsche Lösung eine rein theoretische.

4.2. Tiplers Zylinder

Um geschlossene zeitartige Kurven zu ermöglichen, hat Frank Tipler den Bau eines massereichen, unendlich langen, schnell-rotierenden Zylinders vorgeschlagen. Dieser Zylinder rotiert derart, daß seine Oberfläche sich mit mehr als halber Lichtgeschwindigkeit bewegt und somit die Zentrifugalkräfte der Gravitation entgegenwirken. Da Masse die Raumzeit krümmt, müßte ein solches Objekt die Region in seiner Umgebung krümmen. Raum und Zeit wären nahe der Oberfläche extrem "verdreht", sodaß die Lichtkegel kippen würden. Tiplers Zylinder ist, da er die Lichtkegel künstlich zum kippen bringt, als "Zeitmaschine" aufzufassen.

In **Abb.V.18** ist Tiplers Zylinder skizziert.

In weiter Entfernung vom Zylinder stehen die Zeitachsen der Lichtkegel parallel zur Zylinderachse. Auf der Zylinderoberfläche hingegen liegen die Zeitachsen der Lichtkegel tangential zur Kreisbahn um den Zylinder. Dazwischen nehmen sie eine Stellung zwischen 0° und 90° ein.

Um in die Vergangenheit zu reisen, müßte sich also ein/e Kosmonaut/in mit einem Raumschiff zum rotierenden Zylinder fliegen, der irgendwo im Weltraum gebaut wurde, diesen ein paarmal in Rotationsrichtung umrunden, und wieder zur Erde zurückfliegen.

Es ist nicht schwer einzusehen, daß der Tiplersche Zylinder nicht konstruierbar ist. Allein die Tatsache, daß der Zylinder unendlich lang sein müßte, ließe das Projekt scheitern.

4.3. Kosmische Strings

Kosmische Strings sind hypothetische Überreste riesiger Defekte in den vereinheitlichten Feldern, die einst das Universum bildeten. Diese Strings entstanden, als die Felder in Kräfte und Teilchen zerfielen. Wenn es heute kosmische Strings geben sollte, wären sie unglaublich massereich (10^{14} Tonnen/cm), sodaß sie den Raum um sich herum krümmen würden.

1991 hat der Physiker J. Richard Gott einen Artikel in den *Physical Review Letters* veröffentlicht⁴³, in welchem er in detaillierten Berechnungen eine Reise in die Vergangenheit mittels kosmischer Strings nachweist. Er beschreibt zwei gerade, in entgegengesetzte Richtungen bewegte kosmische Strings, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit einander nähern. Ein/e Beobachter/in könnte, indem er/sie das Stringpaar in einer riesigen Kreisbahn umrundete, in seine/ihre eigene Vergangenheit reisen. Gott beschreibt den Effekt der Strings als "zeitlichen Bumerang-Effekt", der Objekte in die Zeit zurückschleudert.⁴⁴

J. R. Gotts Hypothese ist insofern realistischer als Tiplers, da kosmische Strings tatsächlich in der Natur vorkommen könnten.

⁴³Gott, J. Richard III, *Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solution*, *Physical Review Letters* 66, 1991, S.1126

⁴⁴Vgl. Halpern, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt 1977, S.210f

5. PARALELLE UNIVERSEN

Die Theorie der Parallelen Universen geht von einem quantenmechanischen Ansatz aus, daß nämlich das Universum als Wellenfunktion darstellbar sei.

Jener Zweig der Kosmologie, der auf solchen quantenmechanischen Grundlagen beruht, wird *Quantenkosmologie* genannt. Zu den Begründern dieser neuen Disziplin gehört unter anderen Stephen Hawking. Sie sind der Überzeugung, daß sich grundlegende Fragen der Kosmologie nur mit der Quantentheorie beantworten lassen. Dabei verfolgt Hawking die Quantenkosmologie bis zur letzten Konsequenz, die wäre, daß es eine unendliche Zahl von Paralleluniversen gibt.

Der Ausgangspunkt der Quantentheorie im Allgemeinen ist eine Wellenfunktion, die alle möglichen Zustände eines Teilchens beschreibt. Entsprechend lassen sich Wellenfunktionen auch für größere Objekte, z.B. Menschen entwickeln. Ich kann mich also als eine Schrödingersche Wellenfunktion auffassen, die sich weit ins Universum hinauserstreckt. Die Werte meiner Wellenfunktion wären am Mars jedoch verschwindend klein und auf dem Sessel, auf dem ich gerade sitze, um vieles größer. Daraus folgt, daß ich mit einer viel größeren Wahrscheinlichkeit hier auf diesem Sessel anzufinden bin als am Mars.

Auf ähnliche Art und Weise beginnt Hawking mit einer Wellenfunktion, die die Menge aller möglichen Universen, also eine unendliche Anzahl von Paralleluniversen, beschreibt. Diese Wellenfunktion breitet sich über alle Universen und ist in der Nähe unseres eigenen Universums sehr groß. Unser Universum hat also die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeiten für andere Universen sind zwar viel geringer, aber eben nicht Null. Würde der Nachweis gelingen, daß die Wellenfunktion des Universums für unser gegenwärtiges Universum groß und für andere Universen verschwindend klein ist, dann würde folgen, daß unser jetziges Universum gewissermaßen einzigartig und stabil ist. Bis dato ist dieser Nachweis noch nicht gelungen. In **Abb.V.19** wird die Wellenfunktion des Universums dargestellt.

"Universum" bedeutet demnach also nicht mehr "alles, was existiert", sondern "alles, was existieren kann".⁴⁵

Hawking geht davon aus, daß die möglichen Universen "zusammenstoßen" können. Dabei werden Wurmlöcher gebildet, die die Universen miteinander verbinden (**Abb.V.20**).

⁴⁵Vgl. Kaku, Michio, *Im Hyperraum. Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen*, Hamburg: Rowohlt 1994, S.304f

Vorstellbar sind die vielen Paralleluniversen als Seifenblasen, die jedoch nicht drei, sondern zehn Dimensionen besitzen. Raum und Zeit sind auf jeder Blase anders, zwischen den Blasen existieren sie nicht. Jedes Universum hat seine eigene abgeschlossene Zeit. Außerdem gehorcht jedes Universum anderen physikalischen Gesetzen.

Bemerkung am Rande:

Mit Hawkings Theorie der unendlichen Möglichkeiten für ein Universum und der, zwar nicht bewiesenen, jedoch vermuteten Tatsache, daß für unser Universum die Wahrscheinlichkeit besonders hoch, für die andern hingegen verschwindend klein sei, wurde das *anthropische Prinzip* wiederbelebt. Dieses Prinzip besagt, daß die Natur aus den unendlich vielen Möglichkeiten für die Erschaffung eines Universums eben dieses Universum mit seinen physikalischen Gesetzen auswählte, damit die Menschen erschaffen werden konnten.⁴⁶ In der Tat ist es sehr unwahrscheinlich, daß in einem anderen Universum mit gänzlich anderen physikalischen Gesetzen Leben entstehen könnte, das mit dem Leben der uns bekannten Form vergleichbar wäre. Um in die Natur keine zu große Teleologie in Richtung Menschenentwicklung hineinzuzinterpretieren, könnte das Faktum, daß es in unserem Universum Leben gibt, auch auf ein *schwaches anthropisches Prinzip* zurückzuführen sein, nämlich: Neben unserer Welt gibt es viele tote Universen, aber das unsere ist das einzige, das mit Leben verträglich ist.⁴⁷

5.1. Viele Welten

Der Physiker Hugh Everett stellte 1957 die Hypothese auf, daß sich das Universum im Laufe seiner Entwicklung ständig in diverse Entwicklungsmöglichkeiten aufspalte. Der Physiker Bryce DeWitt, auch ein Vertreter der Viele-Welten-Theorie beschreibt seinen Eindruck von dieser Theorie folgendermaßen: "Jeder Quantenübergang auf jedem Stern, in jeder Galaxie, in jedem fernen Winkel des Universums spaltet unsere lokale Welt auf der Erde in unzählige Kopien ihrer selbst auf. Ich erinnere mich noch lebhaft an den Schock, den ich empfand, als ich zum erstenmal von diesem Viele-Welten-Konzept hörte."⁴⁸

⁴⁶Wolf, Fred Allen, *Parallele Universen. Auf der Suche nach anderen Welten*, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1993, S.290

⁴⁷Vgl. Kaku, Michio, *Im Hyperraum. Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen*, Hamburg: Rowohlt 1994, S.313

⁴⁸Zitiert in: Kaku, Michio, *Im Hyperraum. Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen*, Hamburg: Rowohlt 1994, S.316

Die Viele-Welten-Theorie postuliert, daß alle möglichen Quantenwelten existieren. In einigen dieser Welten gibt es die Menschen als Lebensform, in anderen fanden subatomare Ereignisse statt, die diese Entwicklung verhinderten.

So seltsam diese Theorie auch scheinen mag, mathematisch entspricht sie den herkömmlichen Interpretationen der Quantentheorie.

Everetts Theorie fand bislang bei Physiker/inne/n nicht viel Anklang. Michio Kaku führt dies darauf zurück, daß "die Vorstellung von einer unendlichen Zahl gleichwertiger Universen, die sich alle in jedem Augenblick aufteilen, ... für Physiker, die die Einfachheit lieben, einen philosophischen Alptraum (bedeutet)"⁴⁹

Everetts Theorie beruht auf einzelnen Teilchen und läßt keine Kommunikation zwischen den verschiedenen Universen zu. Hawkings Theorie hingegen beruht auf einer unendlichen Anzahl in sich selbst abgeschlossener Universen, die durch unendlich viele Wurm Löcher miteinander verbunden sind. Diese Wurm Löcher sind jedoch außerordentlich klein (etwa von Planckscher Länge). Außerdem sind Quantenübergänge zwischen zwei Universen höchst selten. Man müßte wahrscheinlich mehr als die Lebenszeit eines ganzen Universum darauf warten, daß man in der Früh in einem anderen Universum aufwachte. Dieses Ereignis würde etwa einem Quantenübergang zwischen zwei Paralleluniversen entsprechen. Trotzdem: Selbst dieses Ereignis würde den physikalischen Gesetzen nicht widersprechen.

5.2. Zeitreisen in parallele Welten

In Hinblick auf Zeitreisen in die Vergangenheit und die damit verbundenen möglichen paradoxen Situationen (wie z.B. Großvaterparadoxon) bietet die Theorie der Vielen Welten allerdings eine Möglichkeit, solche Paradoxa zu vermeiden.

Mit der Quantenphysik der Zeitreise hat sich besonders der Physiker David Deutsch beschäftigt. Er betrachtet die sich aus Zeitreisen ergebenden Paradoxa sowohl von philosophisch-wissenschaftstheoretischen als auch physikalischen Standpunkten aus. So vertritt er die Meinung, daß eine Theorie umso "wahrer" ist, je weniger paradoxe Situationen durch sie ermöglicht werden, auch wenn sie dem "Hausverstand" widerspricht. Als Beispiel erwähnt Deutsch, daß, wenn Physik immer nach dem Hausverstand gegangen wäre, die Gravitationstheorie Einsteins niemals die Theorie Newtons abgelöst hätte. Daß Einstein trotzdem der Vorzug gegeben wurde, liegt, laut Deutsch,

⁴⁹Zitat aus: Kaku, Michio, *Im Hyperraum. Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen*, Hamburg: Rowohlt 1994, S.317

nicht daran, daß die Planetenbahnen genauer berechenbar wurden, sondern, daß andere Phänomene, die zuvor nicht erklärt werden konnten, plötzlich erklärbar waren.⁵⁰

Philosophische Problematik von Zeitreisen

Das Paradoxon, das sich aus einer Reise in die Vergangenheit ergeben könnte, sei im folgenden Beispiel veranschaulicht:

Eine Person reist mittels einer der im vorangegangenen Teil erwähnten Möglichkeiten in die Vergangenheit und trifft ihre Mutter noch vor der eigenen Geburt. Sie hat die Möglichkeit, ihre eigene Geburt zu verhindern. Die paradoxe Situation ergibt sich daraus, daß, wenn die Person ihre Geburt verhinderte, sie selber in der Zukunft bzw. Gegenwart nicht existierte, und somit auch nicht zurückreisen könnte, um ihre Geburt zu verhindern. Gäbe es andererseits irgendwelche physikalischen Mechanismen, die die Person daran hinderten, ihre eigene Geburt zu verhindern (sozusagen Kausalitäts-Schutzmechanismen), so würde sich das philosophische Problem ergeben, daß eine Person nicht nach ihrem Willen handeln kann. Damit würde das Prinzip der Willensfreiheit verletzt werden.

David Deutsch und Michael Lockwood analysierten diese paradoxe Situation, um festzustellen, welche Prinzipien genau verletzt werden.⁵¹

1) Willensfreiheit

Nach der klassischen Physik hat jede Person nur *e i n e* Geschichte. Das bedeutet, daß die Zeitreisende nach der Ankunft in ihrer Vergangenheit genau das tun muß, was ihr die Geschichte vorschreibt. Deutsch und Lockwood meinen, daß dies noch kein Argument gegen Zeitschleifen sei, da die klassische Physik auch ohne Zeitschleifen stets deterministisch ist. Es gibt genug physikalische Situationen im Alltag, die ebenfalls dem freien Willen widersprechen, nur haben wir uns damit abgefunden. (z.B. Mein Wille wäre es, zu fliegen. Ich kann es jedoch aus klassisch-physikalischen Gründen nicht (Evolution, Arme können keinen Auftrieb schaffen wie Flügel, etc.)). Nach der klassischen Physik ist alles, was zu irgendeinem Zeitpunkt passiert, vollständig davon bestimmt, was sich zu früheren Zeitpunkten ereignete. Aufgründdessen ist zu schließen, daß Zeitreisen den freien Willen nicht mehr bedrohen, als die klassische Physik überhaupt.

⁵⁰Deutsch, David, *La trama della realtà*, Torino: Einaudi 1997, S.4

⁵¹Deutsch, David, Lockwood, Michael, *Die Quantenphysik der Zeitreise*, Spektrum der Wissenschaft, Nov. 1994

2) *Autonomieprinzip*

Gemäß diesem Prinzip kann in der unmittelbaren Umgebung (also lokal) jede beliebige materielle Anordnung geschaffen werden, die den lokal gültigen physikalischen Gesetzen entspricht. Wir müssen uns dabei nicht um den Einfluß des Universums kümmern. Ein Beispiel: Wenn ich Reis kochen will, muß ich nicht befürchten, daß mir das wegen der aktuellen Stellung der Planeten nicht gelingt (abgesehen von astrologischen Vorhersagen wie "Ihnen wird in der kommenden Woche nichts gelingen."). Jedes lokale physikalische System ist also autonom. Das Autonomieprinzip ist essentiell für experimentelle Naturwissenschaften. Würde es nicht gelten, müßten bei einem Versuchsaufbau alle nur möglichen Einflüsse des gesamten Universums berücksichtigt werden.

Solange keine Zeitschleifen auftreten, gehorchen sowohl klassische Physik als auch Quantenphysik dem Autonomieprinzip. In Gegenwart von Zeitschleifen verliert die klassische Physik jedoch die lokale Autonomie.

3) *Konsistenzprinzip*

Das Konsistenzprinzip wurde von John L. Friedman formuliert und besagt, daß nur diejenigen Materiekonfigurationen eintreten können, die global in sich widerspruchsfrei sind. Die Außenwelt kann also mein Vorhaben, Reis zu kochen, physikalisch einschränken, obwohl das Reis-Kochen in meiner Küche vollkommen den auf der Erde geltenden physikalischen Gesetzen entspräche.

Normalerweise ist von physikalischen Einschränkungen dieser Art nichts zu bemerken, weil Autonomie- und Konsistenzprinzip in der alltäglichen Physik nie in Konflikt geraten. Treten jedoch im Rahmen der klassischen Physik Zeitschleifen auf, so ergibt sich plötzlich ein Konflikt zwischen Autonomieprinzip (die Person kann in der Vergangenheit gemäß den lokal gültigen physikalischen Gesetzen tun was sie will) und Konsistenzprinzip (die Person ist gezwungen, so zu handeln, damit ihre eigene Geschichte nicht verletzt wird). Nach der klassischen Physik darf das Konsistenzprinzip auf keinen Fall verletzt werden. Das würde bedeuten, daß in unserem Beispiel die Person durch irgendetwas (einen inneren Zwang, eine übernatürlich scheinende Kraft, eine Panne, etc.) daran gehindert würde, ihre eigenen Geburt zu verhindern.

Quantenmechanische Zeitschleifen

Die paradoxen Situationen, die sich aus einer Zeitreise in die Vergangenheit ergeben würden, könnten mit der Quantentheorie vermieden werden. Näherungen sind dabei unvermeidlich, da es noch keine vollständige quantenmechanische Beschreibung der Gravitation gibt. (Deutsch und Lockwood meinen, daß Hawkings Chronology protection conjecture ein Beispiel für die Mängel solcher Näherungen ist, da in ihr die Gravitationseffekte von Quantenfeldern nicht berücksichtigt wurden.)

Im Gegensatz zu Hawkings Berechnungen machen die Berechnungen von Deutsch und Lockwood Zeitreisen nicht unmöglich, sondern erleichtern sie gewissermaßen, und möglicherweise sind quantenmechanische Zeitschleifen sogar zwingend erforderlich.⁵²

Viele Modelle für die Quantengravitation sprechen dafür, daß die Raumzeit nur im großen Maßstab "glatt" ist. Die submikroskopischen Strukturen der Raumzeit hingegen sind eher "schaumartig", mit vielen kleinen Wurmlöchern und Zeitschleifen. Diese Zeitschleifen reichen etwa 10^{-42} Sekunden in die Vergangenheit. Ein subatomares Teilchen kann somit unentwegt und überallhin Zeitreisen ausführen.

Für die Quantenmechanik als geeignete Theorie zur Erklärung von Zeitreisen spricht, daß sie die Paradoxien der Zeitreise aufzulösen vermag. Dabei wird wieder deutlich, wie radikal die Quantentheorie mit dem klassischen Weltbild bricht. Als Beispiel sei der Zerfall eines Neutrons betrachtet:

Auf den Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino muß man bis zu zwanzig Minuten warten. Der Zerfall kann aber auch früher stattfinden bzw. nach beliebig langer Zeit.

Nach der klassischen Physik ist diese Zufälligkeit nicht erklärbar. Nach der Viele-Welten-Theorie der Quantenmechanik von Hugh Everett ist diese Zufälligkeit damit erklärbar, daß alle möglichen Ereignisse wirklich stattfinden - allerdings in verschiedenen Universen. Die Summe aller Universen bildet das Multiversum, das die gesamte physikalische Wirklichkeit darstellt.

In jedem Universum des Multiversums gibt es ein Exemplar des Neutrons. Für jeden Zeitpunkt, zu dem das Neutron zerfallen könnte, gibt es ein Universum, in dem es auch tatsächlich zerfällt. Nachdem wir den Neutronenzerfall beobachten, gibt es auch jeweils ein Exemplar von uns in jedem dieser Universen. Die Wahrscheinlichkeiten in der Quantentheorie entsprechen dem Verhältnis der Anzahl jener Universen, in denen das Ereignis stattfindet zur Anzahl aller Universen. Nach dieser Sichtweise ist die Quantenmechanik keineswegs nur eine probabilistische Theorie, sondern sehr wohl deterministisch: Sie gibt genau den Bruchteil der Universen an, in denen ein bestimmtes Resultat auftritt.

Auflösung des Paradoxons

Nach der Viele-Welten-Theorie tritt das oben erwähnte Paradoxon der zeitreisenden Person gar nicht auf!

⁵²Vgl. Deutsch, David, Lockwood, Michael, *Die Quantenphysik der Zeitreise*, Spektrum der Wissenschaft, Nov. 1994, S.54

Wenn die klassische Raumzeit geschlossene zeitartige Kurven enthält, dann müssen die vielen Universen quantenmechanisch irgendwie miteinander zu einer verwickelten Raumzeit verknüpft sein. Diese Verbindungen zwingen die zeitreisende Person, bei ihre Reise in die Vergangenheit in einem Universum anzukommen, das bis zum Augenblick ihrer Ankunft völlig identisch ist mit ihrem Universum, das sie verlassen hat. Ab diesem Zeitpunkt entwickelt sich das Universum, in dem die Person ankam, je nachdem, wie sie handelt. Entweder sie verhindert ihre eigene Geburt, dann wird sie nie geboren. Oder sie verhindert ihre Geburt nicht und wird geboren.

Die Person kommt jedoch mit Sicherheit nicht in jenem Universum an, das sie verlassen hat. In diesem Universum wird die Person ohne Zweifel geboren, und ihre Mutter trifft nie jene Person, die später ihr Kind ist. (Denn würde sich ein Treffen ergeben, dann würde das nächste Paradoxon daraus entstehen, daß die Mutter sich im einen Fall an eine Begegnung erinnert, jedoch im ursprünglichen Universum, aus dem die Person abreiste, ihre Mutter sich an keine solche Begegnung erinnert. Auch das würde dem Autonomieprinzip widersprechen.)

Der Handlungsspielraum der Person ist durch die Zeitreise also nicht eingeschränkt. Die Viele-Welten-Theorie der Quantenmechanik ist, selbst wenn es Zeitschleifen gibt, mit dem Autonomieprinzip vereinbar.

Abschließend muß festgestellt werden, daß aus Sicht der Quantenmechanik Zeitschleifen nichts Ungewöhnliches sind und mit allen geforderten Prinzipien vereinbar sind. Selbst das vielzitierte Argument Stephen Hawkings, daß, wenn es Reisen in die Vergangenheit gäbe, wir von Touristenscharen aus der Zukunft bereits heimgesucht worden wären⁵³, gilt nicht. Eine Zeitschleife reicht nämlich nur bis zu dem Moment zurück, in dem sie entstanden ist. Würde also im Jahre 2070 eine Zeitschleife konstruiert werden, könnten ihre späteren Benutzer/innen frühestens bis ins Jahr 2070 zurückreisen.

⁵³Hawking, Steven W., *Eine kurze Geschichte der Zeit. die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg: Rowohlt 1988

KAPITEL SECHS

ZEITREISEN MIT ÜBERLICHTGESCHWINDIGKEIT

In der Quantenoptik zeigen sich verschiedene Effekte, die als "Schneller-als-Licht-Phänomene" gelten. Diese Effekte können grob in drei Arten eingeteilt werden:¹

- 1) *Tachyonen*
- 2) *Der Tunneleffekt*
- 3) *Teleportation* (im Zusammenhang mit dem *Einstein-Podolsky-Rosen-Phänomen*)

1. TACHYONEN

Rein theoretisch können Teilchen angenommen werden, die sich schneller als Licht bewegen, sogenannte *Tachyonen*. Die Relativitätstheorie schließt diese Teilchen nicht aus, allerdings verbietet sie ihnen das Überschreiten der Lichtgeschwindigkeit in entgegengesetzte Richtung. Das bedeutet, daß Tachyonen nie langsamer als Lichtgeschwindigkeit sind und über keine reelle, sondern eine imaginäre Ruhemasse verfügen. Außerdem könnte eine Information mittels Tachyonen Botschaften aus der Zukunft in die Gegenwart bzw. Vergangenheit bringen. Daraus ergibt sich das Paradoxon, daß Nachrichten ankommen, bevor sie abgeschickt wurden. Da die Existenz von Tachyonen potentiell zu paradoxen Situationen führen könnte, sind sie in der konventionellen Physik nicht sehr beliebt.

Es sei im Folgenden die Energie und der Impuls eines Tachyons betrachtet²:
Für eine Teilchen mit der Masse m_0 und der Geschwindigkeit v gilt allgemein:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Ist die Geschwindigkeit des Teilchens größer als die Lichtgeschwindigkeit ($v > c$), werden die Nenner der beiden Brüche imaginär, da $(1 - v^2/c^2)$ negativ wird. Energie E und Impuls p müssen positiv bleiben, denn sie können beobachtet und gemessen

¹Chiao, Raymond Y., *What is known about tachyons ...*, Ask the Experts, Scientific American, <http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics29.html> (Stand: 22.9.1999)

²Vgl. Nahin, Paul J., *Time Machines. Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, New York: AIP 1993, S.329f

werden, falls Wechselwirkungen mit Tachyonen auftreten sollten. E und p bleiben positiv, wenn die Masse m_0 imaginär ist. m_0 kann geschrieben werden als:

$$m_0 = i\mu$$

μ ist die berechenbare, jedoch nicht observable Masse des Tachyons.

Für E und p ergibt sich durch Einsetzen:

$$E = \frac{i\mu c^2}{i\sqrt{|1-(v/c)^2|}} = \frac{\mu c^2}{\sqrt{(v/c)^2-1}}$$

$$p = \frac{\mu v}{\sqrt{(v/c)^2-1}}$$

Sieht man sich den Ausdruck für die Energie an, so stellt man eine interessante Konsequenz fest: Wenn das Tachyon Energie verliert, wird es schneller!

(Wird E kleiner, so muß auf der rechten Seite der Nenner größer werden. Da c konstant ist, steigt v !) Eine Tachyon, das keine Energie mehr hat, hat eine unendliche Geschwindigkeit.

Eine weitere Kuriosität ergibt sich, wenn man den Ausdruck für den Impuls betrachtet:

$$p = \frac{\mu v}{\sqrt{(v/c)^2-1}} \cong \frac{\mu v}{\sqrt{(v/c)^2}} = \mu c$$

Das unendlich schnelle Teilchen mit null Energie würde einen endlichen Impuls μc besitzen.

Tachyonen konnten noch nie experimentell festgestellt werden. Es gibt jedoch theoretische Vorhersagen, daß es Tachyonen-ähnliche Teilchen (auch überlichtschnelle "Quasiteilchen" genannt) gäbe.³

Zeitreise mittels Tachyonen

Könnten mittels Tachyonen Informationen übertragen werden, so könnte man, wie schon anfangs erwähnt, Informationen in die Vergangenheit schicken bzw. Informationen aus der Zukunft erhalten. Aber nicht nur Vergangenheit und Zukunft wären mit

³Chiao, Raymond Y., *What is known about tachyons ...*, Scientific American, Ask the Experts,

<http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics29.html> (Stand: 22.9.1999)

Tachyonen erreichbar, auch der ganze raumartige Bereich, der außerhalb des Vergangenheits- bzw. Zukunftslichtkegels liegt, könnte erreicht werden. Da diese Informationen die Vergangenheit verändern könnten, sind paradoxe Situationen ähnlich wie bei jeder anderen Reise in die Vergangenheit die Folge.

2. DER TUNNELEFFEKT

Angenommen, ein Teilchen befände sich in einem Potentialtopf:

Nach der klassischen Physik können nur jene Teilchen den Potentialwall überwinden, deren Bewegungsenergie mindestens so groß ist wie die potentielle Energie, die durch die Höhe der Topfwände dargestellt ist. Dies folgt letztendlich aus dem Energieerhaltungssatz. Aus diesem Ansatz wäre zu schließen, daß, wenn ein Teilchen eine kleinere Bewegungsenergie besäße als der Potentialtopf hoch ist, das Teilchen diesen nicht überwinden kann. Die Tatsache, daß trotzdem Teilchen auf der anderen Seite der Potentialwand anzutreffen sind, erweckt den Anschein, daß diese Teilchen auf ihrem eigenen Energieniveau durch einen Tunnel dem Potentialtopf entkommen sind. Für das Überwinden reicht ja ihre Energie nicht aus. So kam der Tunneleffekt zu seinem Namen.

Nach der Quantentheorie ist das Teilchen durch eine Wellenfunktion beschreibbar, die innerhalb des Potentialtopfs maximal ist und dann exponentiell abnimmt. Die Amplitude der Funktion ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, daß das Teilchen anzutreffen ist. Sie ist außerhalb des Topfes viel kleiner, jedoch nicht Null. Das bedeutet, daß mit geringer Wahrscheinlichkeit das Teilchen auch außerhalb des Topfes anzutreffen ist.⁴ In **Abb.VI.1** ist er Tunneleffekt skizziert.

Es ist also (mit kleinen Wahrscheinlichkeiten) möglich, hie und da ein Teilchen außerhalb des Topfes anzutreffen. Bleibt die Frage zu klären, woher es die erforderliche Energie nimmt?

Da es sich bei diesem Problem um Teilchen und um deren Energien handelt, sei zunächst einmal betrachtet, wie genau denn überhaupt die Energie des Teilchens im Topf bestimmt werden kann?

⁴Vgl. Weidner, R. T., Sells, R. L., *Elementare moderne Physik*, Wiesbaden: Vieweg 1982, S.185f

Nach der Heisenbergschen Unschärferelation muß ich, je genauer ich die Energie eines Teilchens bestimmen will, umso länger messen. Je kürzer die Messung ist, desto unschärfer wird der Wert für die Energie. Das bedeutet, daß bei Messung einer kurzen Zeit das Teilchen verschiedenste Energiewerte besitzen kann. Das Teilchen ist anscheinend in der Lage, seine Energie für eine kurze Dauer zu "ändern". Diese "geborgte" Energie kann aus Vakuumfluktuationen genommen werden. (Siehe dazu Kap.5, Exotische Materie) Nach der mehr oder weniger kurzen Zeit gibt das Teilchen die überschüssige Energie wieder ab. Wenn die Energie, die sich das Teilchen in jener Zeit borgen kann, die es zum Überwinden des Potentialwalles benötigt, ausreicht, um die Energiedifferenz zum Potentialwall auszugleichen, kann das Teilchen dem Potentialtopf entkommen.

Nun stellt sich die Frage, ob die Barriere die Teilchen nicht abbremst? Aus Experimenten mit Teilchen, die von vornherein genug Energie besitzen, um die Barriere zu überwinden, geht nämlich hervor, daß sie durch die Barriere abgebremst werden. Erstaunlicherweise ist dieser Effekt bei den Tunnelteilchen nicht zu bemerken. Sie scheinen sogar schneller zu werden.⁵

Tatsächlich erleidet das Teilchen im Tunnel Energieverluste. Betrachtet man den Vorgang aus der Sicht der Wellenmechanik, so ergibt sich, daß, wenn ein Wellenpaket eine Barriere durchtunnelt, das Wellenpaket hinter dem Potentialwall nicht mehr das selbe ist wie jenes vor dem Potentialwall. Das, was an Energie nicht durch den Tunnel gelangen kann, wird am Potentialwall reflektiert. Jenes Wellenpaket, daß der Energie entspricht, die durch den Wall tunnelt, wird im Potentialwall leicht gestaucht, und sein Maximum verschiebt sich etwas nach vorne. Dies erweckt den Anschein, daß das Wellenpaket den Potentialwall überlichtschnell durchtunnelt hat.

Es stellt sich also die Frage, ob man beim Tunneleffekt darauf achtet,

- a) wann der erste Teil des Wellenpakets auf der anderen Seite der Barriere auftaucht, oder
- b) wann das Wellenbergmaximum, seine Spitze, auf der anderen Seite auftaucht.

Siehe dazu **Abb.VI.2**.

Nach a) wäre der Tunneleffekt kein Überlichtphänomen, nach b) schon. Die Ansicht a) wird zum Beispiel von Raymond Chiao vertreten, der einer der Führenden in der Überlichtgeschwindigkeits-Forschung ist. Er bestreitet, daß sich echte Informationen

⁵Vgl. Davies, Paul, *Die Unsterblichkeit der Zeit. Die moderne Physik zwischen Rationalismus und Gott*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1995, S.243f

schneller als mit Lichtgeschwindigkeit verschicken lassen.⁶ In einem Experiment stellten A. M. Steinberg, P. G. Kwiat und R. Chiao fest, daß die Spitze des Photonenwellenpakets auf der anderen Seite mit $1,47 \pm 0,21$ Femtosekunden früher auftritt, als wenn es mit Lichtgeschwindigkeit die Barriere durchtunneln würde.⁷ Die beobachtete superluminale Geschwindigkeit (circa das 1,7fache der Lichtgeschwindigkeit) ist jedoch keine Signalgeschwindigkeit im klassischen Sinn, sondern ergibt sich daraus, daß im Tunnel das Wellenpaket verschoben wird und sich somit die Phasengeschwindigkeit ändert. Phasengeschwindigkeiten können, im Gegensatz zu Signalgeschwindigkeiten, sehr wohl schneller als Lichtgeschwindigkeit sein. Da jedoch nur Signale oder Informationen auch Wirkungen haben können, nicht jedoch bestimmte Phasen einer Welle, wird durch die superluminalen Phasengeschwindigkeiten das Kausalitätsprinzip nicht verletzt.

Günter Nimtz ist anderer Ansicht. Für ihn ist der Tunneleffekt sehr wohl ein Überlichtgeschwindigkeits-Phänomen.⁸ Er meint, daß kein Meßgerät in der Lage sei, zwischen Spitze oder Zentrum eines Photons zu unterscheiden und daher immer nur ein ganzes oder gar kein Photon messen könne. Nach Nimtz Auffassung ist für die Signalübertragung die Halbwertsbreite, also die Breite des Wellenberges auf halber Höhe, interessant. Genau in dieser Halbwertsbreite stecke die Information. Diese Halbwertsbreite bleibt laut Nimitz beim Durchtunneln unverändert. Daraus folgert Nimtz, daß sich die Information mit Überlichtgeschwindigkeit ausgebreitet hätte.

Wenn es tatsächlich gelänge, Signale mit Überlichtgeschwindigkeit zu versenden, würde nicht nur das von der Relativitätstheorie sorgsam gewährte Kausalitätsprinzip ins Schwanken geraten, die Relativitätstheorie selbst würde ihre Gültigkeit verlieren.⁹

Nach Ansicht vieler Physiker/innen stellt sich die Frage nach der Geschwindigkeit des Teilchens beim Tunneleffekt eigentlich gar nicht. Wegen der Heisenbergschen Unschärferelation könne man gar nicht genau den Ort des Photons im Tunnel bestimmen. Aufgründdessen habe es überhaupt keinen Sinn, eine Geschwindigkeit zu messen.¹⁰

⁶Chiao, Raymond, zitiert in: Müller, Bernd, *Schneller als das Licht*, bild der wissenschaft 8/1997

⁷Steinberg, A. M., Kwiat, P. G., Chiao, R. Y., *Measurement of the Single-Photon Tunneling Time*, Physical Review Letters 71, 1993

⁸Nimtz, Günter, zitiert in: Müller, Bernd, *Schneller als das Licht*, bild der wissenschaft 8/1997

⁹Müller, Rainer, *Zurück in die Zukunft*, bild der wissenschaft 8/1997

¹⁰Müller, Bernd, *Schneller als das Licht*, bild der wissenschaft 8/1997

3. TELEPORTATION

Der Name *Teleportation* kommt aus der Science Fiction (Verfolger/innen der Serie "Raumschiff Enterprise" bzw. der "Star Trek"-Filme kennen Teleportation unter dem Namen *Beamen*.) und bezeichnet einen Vorgang, bei dem eine Person oder ein Objekt an einem Ort aufgelöst wird, um an einem anderen Ort als perfekte Replikation ihrer selbst wieder aufzutauchen.

Unter Teleportation wird also eine Art "*entkörperter*" Transport verstanden.¹¹ Nun könnte man meinen, daß zu Teleportation auch alltäglich verwendete Techniken zählen, wie z.B.:

Telefon: transportiert die elektromagnetische Umsetzung von Schallwellen

Fax: transportiert die elektromagnetische Umsetzung optischer Information

Internet: transportiert optische und akustische Information; etc.

Diese Techniken sind Kopierungs-Prozesse und werden als *herkömmliche Faksimile-Transmissionen* bezeichnet: Sie nehmen die originale akustische oder optische Information auf, kopieren sie (in elektromagnetische Wellen) und schicken sie mit höchstens Lichtgeschwindigkeit durch den Raum. Wichtig zu beachten ist, daß das Original unverändert erhalten bleibt!

Der Mensch als digitale Information

Um einen Menschen exakt zu kopieren sei jene Menge an Information betrachtet, die übertragen werden müßte:

Das dreidimensionale Bild eines menschlichen Körpers mit einer Auflösung bis zu einem Millimeter in jede Richtung erfordert 10 Gigabytes Speicherplatz. Das sind etwa zehn CD ROMs. Würde man in den atomaren Bereich der Genauigkeit des Abbilds eines Menschen gehen, so würden selbst die besten optischen Fasern über 100 Millionen Jahre brauchen, um diese Information zu übertragen. Würde diese Information auf CD ROMs gespeichert, würden diese CD ROMs einen Würfel mit einer Seitenlänge von 1000 Kilometern ausfüllen!

Dieses mit Zahlen geschmückte Beispiel soll veranschaulichen, daß die in der Science Fiction gezeigte Teleportation von Menschen vom Standpunkt der heutigen, und wohl auch der zukünftigen, Technik aus unmöglich ist.

¹¹ Braunstein, Samuel L., *A fun talk on teleportation*,

<http://www.research.ibm.com/quantuminfo/teleportation/braunstein.html> (Stand: 8.10.1999)

Unschärferelation

Als Argument gegen Teleportation wird vor allem das Heisenbergsche Unschärfeprinzip angeführt. Nach diesem Prinzip ist es unmöglich, eine derart genaue Messung durchzuführen (z.B. der genauen Positionen und Energien der Atome im Körper), daß eine exakte Replikation des zu teleportierenden Objekts möglich wäre. Anders ausgedrückt: Je genauer ein Objekt gemessen wird, desto stärker wird die zu messende Größe durch den Meßprozeß gestört.

Aus diesen Gründen wurde bis vor kurzem Teleportation wissenschaftlich nicht ernst genommen. In den letzten Jahren konnte jedoch von einer Gruppe von Wissenschaftern festgestellt werden, daß ein verblüffendes quantentheoretisches Phänomen, der *Einstein-Podolsky-Rosen-Effekt*, dazu verwendet werden kann, die Information eines quantenmechanischen Zustands exakt zu übermitteln, ohne das Unschärfeprinzip zu gefährden.

Einstein-Podolsky-Rosen Effekt

Diese Phänomen zeigt Folgendes: Wenn zwei physikalische Teilchen irgendwann einmal in einem gemeinsamen Zustand wechselgewirkt haben und dann getrennt werden, so beeinflußt das Verhalten des einen Teilchen bei seiner Messung das Verhalten des beliebig weit entfernten anderen Teilchens. Experimentell konnte gezeigt werden, daß zwei Photonen sich korrelierend verhalten, wenn sie auf weit voneinander entfernte Interferometer treffen.

Zur Veranschaulichung seien zwei ("Quanten-")Würfel betrachtet. Es gibt sechs verschiedene Möglichkeiten, welche Punktezahl der Würfel zeigen kann. Nun werden zwei solche Würfel, die einmal quantenmechanisch in einem gemeinsamen Zustand waren, an verschiedenen Stellen des Universums in die Luft geworfen. So lange sie sich rotierend in der Luft befinden, zeigen sie alle sechs Punktezahlen mit gleicher Wahrscheinlichkeit. Zu diesem Zeitpunkt macht es noch keinen Sinn, zu sagen: "Der Würfel A zeigt diese oder jene Zahl.", da er noch auf gar keine Zahl fixiert ist. Wenn nun einer der beiden Würfel so gefangen wird, daß er auf einer Seite zu liegen kommt, kann ausgesagt werden, der Würfel zeige eine bestimmte Punktezahl. Dieses "Auffangen" würde dem Meßprozeß an einem Quantensystem entsprechen. Bis zum Meßprozeß hat sich das System noch auf gar keine Größe festgelegt. Durch den Meßprozeß wird aber eine der vielen Möglichkeiten sozusagen "eingefroren". Das Verblüffende ergibt sich daraus, daß, wenn der zweite Würfel gemessen wird, er genau die gleiche Augenzahl anzeigt wie der erste Würfel! So, als ob er "wissen" würde, wie der erste Würfel gefallen ist. Da die Würfel jedoch weit voneinander getrennt sind, ist es noch immer geheimnisvoll, wie der zweite Würfel bzw. das zweite Quantensystem wissen

kann, wie die Messung am ersten Quantensystem ausgegangen ist.¹² Es scheint, daß die Information zwischen den beiden Quantensystemen über ihren gegenseitigen Zustand intrinsisch ausgetauscht wird, also mit Überlichtgeschwindigkeit.

Tatsächlich kann über die Geschwindigkeit dieses Informationsaustauschs keine Aussage gemacht werden. Es kann lediglich ausgesagt werden, daß, sobald die beiden Messungen verglichen werden können, die beiden Würfel bzw. Quantensysteme immer die korrelierenden Werte zeigen. Um die Messungen zu vergleichen, muß ich mich jedoch Informationen bedienen, die maximal mit Lichtgeschwindigkeit vermittelt werden können. Schneller können die beiden Messungen nicht verglichen werden. Über den Einstein-Podolsky-Rosen Effekt kann daher gesagt werden, daß er mit *mindestens* Lichtgeschwindigkeit vor sich geht. Es ist jedoch aufgrund der relativistischen Grenzen, denen ein Meßprozeß unterliegt, nicht feststellbar, ob der Effekt sich mit *Überlichtgeschwindigkeit* ereignet. Das gleiche gilt auch im Fall der Quantenteleportation. Die Feststellung, daß teleportiert wurde, erfordert einen Informationsaustausch, der mit höchstens Lichtgeschwindigkeit vor sich gehen kann.

Herkömmliches Faksimile - Quantenteleportation

Basierend auf den oben angeführten Fakten soll nun dargestellt werden, worin sich Teleportation und herkömmliche Faksimile-Vermittlung voneinander unterscheiden:

a) Herkömmliches Faksimile (Abb.VI.2)

Ausgegangen wird von einem Original und einem Rohmaterial, auf welches die Information kopiert wird. Das Original wird in einem "Scanning" abgetastet, und die daraus gewonnenen Daten werden auf das Rohmaterial übertragen. Das Ergebnis ist eine Kopie vom Original. Das Original bleibt weiterhin unversehrt.

b) Quanten-Teleportation (Abb.VI.3)

Bei der Quanten-Teleportation wird nur ein Teil der Information eines Objekts (A), das teleportiert werden soll, gescannt. Der nicht-gescannte Teil von A wird mittels des Einstein-Podolsky-Rosen Effekts auf ein Objekt C übertragen, das niemals mit dem Objekt A in Kontakt war. In weiterer Folge wird auf C die herausgescannte Information übertragen, und es ist möglich, C in exakt jenen Zustand zu versetzen, in dem A ursprünglich war. Das Original A ist nicht mehr in seinem ursprünglichen Zustand. Der Zustand wurde also nicht nur repliziert sondern teleportiert.

¹²Vgl. Zeilinger, Anton, *Jenseits jeder Gewißheit. Das Rätsel der Quantenwelt*, <http://www.info.uibk.ac.at/c/c704/qo/de/jenseits/index.html> (Stand: 26.9.1999)

Die gescannte Information wird von A durch ein Vermittlerobjekt B auf C übertragen. Das Objekt B wechselwirkt hierbei zuerst mit C und dann mit A. Dies mag verwunderlich erscheinen, da aus klassischer Sicht z.B. der Postbote sehr wohl zuerst das Postamt und dann den/die Adressat/en/in kontaktiert. Im Fall der Quanten-Teleportation ist dieser Weg umgekehrt, da hier der Einstein-Podolsky-Rosen Effekt ausgenützt wird. Schrittweise betrachtet könnte diese unkonventionelle Informationsübertragung folgendermaßen gesehen werden:

- 1) B und C sind zwei Objekte, die in einem Zustand miteinander wechselwirken und daher "verschränkt" sind.
- 2) B und C werden getrennt.
- 3) Durch einen Meß (oder Scan-)prozeß wird dem Objekt A eine Teil der Information, die seinen Zustand charakterisiert, entnommen.
- 4) B trifft auf die zurückbleibende, nicht-entnommene Information von A und übernimmt sie.
- 5) Aufgrund des Einstein-Podolsky-Rosen-Effekts befindet sich C im gleichen Zustand wie B, nachdem es die nicht-gescannte Information von A übernommen hat. Somit ist auch C in Besitz der nicht-gescannten Information von A.
- 6) Auf C, das bereits die nicht-gescannte Information besitzt, wird abschließend noch die gescannte Information übertragen. Somit ist C in Besitz der vollständigen Information von A. Der Zustand A ist teleportiert worden.¹³

Mit dieser Methode kann also nicht-scannbare (nicht-meßbare) Information, wie sie aufgrund der inhärenten Unschärfe von Quantensystemen besteht, übertragen werden. Das zu teleportierende Objekt muß nicht vollkommen bekannt sein.

1997 konnte die Quanten-Teleportation zum ersten Mal in einem Experiment an der Universität Innsbruck unter der Leitung von Anton Zeilinger bestätigt werden. Ähnlich dem oben Besprochenen gibt es eine Senderin (genannt "ALICE") und einen Empfänger ("BOB"). Alice will Bob einen bestimmten Quantenzustand Ψ eines Teilchens übermitteln. Den ersten Schritt setzt Bob. Er präpariert zunächst ein verschränktes Teilchenpaar aus einer Einstein-Podolsky-Rosen-Quelle (EPR-Quelle), behält ein Teilchen selbst und schickt das andere zu Alice. Alice bringt nun ihr Teilchen und das Teilchen mit dem unbekanntem Quantenzustand Ψ zusammen und verschränkt die beiden durch einen Meßvorgang, der vier Ergebnisse zeigen kann: Rotation um die x, y oder z-Achse oder keine Rotation. Die Folge der Verschränkung ist, daß die Wellenfunktionen der beiden Teilchen zueinander orthogonal sind. Alice

¹³Vgl. IBM® Research (Verf. Unbek.), *Quantum Teleportation*,
<http://www.research.ibm.com/quantuminfo/teleportation/> (Stand: 8.10.1999)

weiß also nichts über den Zustand Ψ des Originalteilchens, aber sie weiß, daß das Originalteilchen und das Teilchen aus der EPR-Quelle nun orthogonale Zustände zueinander einnehmen. Dann vermittelt Alice an Bob das Ergebnis (z.B. durch einen Radio-Transmitter oder ein Telefon). Ist nun Bobs EPR-Teilchen orthogonal zu Alices EPR-Teilchen, dann folgt, daß Bobs EPR-Teilchen im selben Zustand ist wie das Originalteilchen. Bob kann daraufhin eine der vier möglichen Operationen an seinem Teilchen ausführen und erhält eine identische Replikation vom Originalteilchen.^{14,15}

Mit der Quantenteleportation ist nicht nur physikalisches, sondern auch wirtschaftliches Interesse verbunden, da sie eine neue und schnellere Art der Informationsübertragung verspricht.

Auf die Frage, ob auch einmal Menschen wie in Star Trek teleportiert werden können, meint Anton Zeilinger, daß dies bei Objekten wie Atomen oder Molekülen durchaus möglich wäre, da man sie verschränken kann. "Aber bei ganz großen (Objekten) geht es nie, verschränkte Zustände sind empfindlich. Einen teleportierten Zeilinger ... wird es nicht geben."¹⁶

¹⁴Vgl. Universität Innsbruck (Verf. unbek.), *Quantum Teleportation*,

http://www.uibk.ac.at/c/c704/qo/photon_teleport/tpidea.html (Stand: 26.9.1999)

¹⁵Vgl. Deutsch, David, Ekert, Artur, *Quantum Communication moves into the unknown*,

<http://www.qubit.org/intros/comm/comm.html> (Stand: 8.10.1999)

¹⁶Zeilinger, Anton, zitiert in: Langenbach, Jürgen, *Physikwunder: Teleportation*, Artikel in: Der Standard, 11.12.1997

KAPITEL SIEBEN

ZEITREISEN IM UNTERRICHT

"Ein individuelles Chronozykel besteht aus einem Rohr mit Sattel und einem Auspufftrichter, daher kann man es, zumal bei ungenügender Beleuchtung, durchaus für einen Besen halten."

Ijon Tichy in *Sterntagebücher, Zwanzigste Reise*,

Stanislaw Lem

Gründe für "Zeitreisen" als Unterrichtsthema

- Ein Grund, warum Zeitreisen im Unterricht behandelt werden sollten, ist jener, daß die Kinder und Jugendlichen großes Interesse an Zeitreisefilmen bzw. Science Fiction-Filmen und -Literatur haben. Beispielsweise ist "Raumschiff Enterprise" die Kultserie schlechthin.

Meiner Ansicht nach ist es Aufgabe des Unterrichts im Allgemeinen und des Physikunterrichts im Speziellen, die täglichen Erfahrungen und Wahrnehmungen der Jugendlichen zu thematisieren und sie, wenn möglich, physikalisch zu erklären. Einerseits werden dadurch Themen behandelt, die die Schüler/innen interessieren, weil sie in ihrem Leben täglich mit diesen Themen konfrontiert sind bzw. die Konfrontation aktiv suchen (wie z.B. ins Kino gehen und sich einen Science Fiction Film ansehen).

Andererseits werden die alltäglich passiv konsumierten Eindrücke bewußter verarbeitet, wenn sie thematisiert werden.

Kurz gesagt: Ich möchte, daß die Schüler/innen über die Science Fiction, die sie sehen und lesen, kritisch nachdenken können. Das können sie nur, wenn sie auch die "Science", also die Wissenschaft, zur Science Fiction kennen. Da gerade Jugendliche die Hauptzielgruppe für Science Fiction ist, sollen sie selber kompetent sein, um den Inhalt eines Films oder eines Buchs kritisch zu betrachten, positiv wie negativ, und die Kritik mit Argumenten zu begründen.

- Aufgrund dessen, daß durch die Relativitätstheorie Zeitreisen auch physikalisch denkbar wurden und die meisten Zeitreisen in der Science Fiction auf relativistischen Grundlagen basieren, sehe ich das Thema "Zeitreisen" als gute Möglichkeit, die Relativitätstheorie im Unterricht zu behandeln.

- Da Zeit, kulturelle, psychische und physikalische, in unserer Kultur ein zentraler Begriff ist, täglich verwendet wird und trotzdem schwer faßbar erscheint, sollte der Zeitbegriff im Unterricht interdisziplinär thematisiert werden. Speziell im Physikunterricht sollte die zentrale Stellung des Zeitbegriffs und die diesbezüglichen Unterschiede in den verschiedenen physikalischen Theorien behandelt werden. Aufgrund des oben schon erwähnten Interesses der Jugendlichen an Zeitreisen in Film und Literatur kann das Thema "Zeitreisen" dazu dienen, in interdisziplinärer und unterhaltsamer Weise das Thema "Zeit" zu bearbeiten.

- Zeitreisevorstellungen sind meist Spiegelbilder der Wünsche, Zukunftsängste, Fluchtgedanken, allgemein der Befindlichkeit jener Generation, in der sie entstanden sind. Daher würden "Zeitreisen" eine Möglichkeit darstellen, das psychische, soziale und kulturelle Befinden der jungen Generation zu thematisieren.

1. UMFRAGE ZUM THEMA "ZEITREISE"

Was für eine Person eine Zeitreise ist, ist genaugenommen Ansichtssache, da es keine allgemeingültige Definition von *Zeitreise* gibt. Da *Zeit* ein zentraler Begriff unserer Kultur und unseres Alltags ist, bin ich der Meinung, daß im Unterricht allgemeinbildender Schulen eine ausführliche interdisziplinäre Behandlung des Themas *Zeit* stattfinden sollte. Aufgrund des Problems der Definierbarkeit und der Verflochtenheit von *Zeit* und *Zeitreise* ist keine scharfe Abgrenzung möglich. Außerdem können viele Unterrichtsinhalte für die einen bereits *Zeitreisen* darstellen, für die anderen entsprechen sie nicht den Vorstellungen von einer *Zeitreise*.

Um in dieser Arbeit konkret über *Zeitreisen* schreiben zu können, mußte ich eine allgemein akzeptable Abgrenzung finden.

Zuerst wollte ich erfahren, welche Vorstellungen zu *Zeitreisen* existieren. Um zu erfahren, welche gängigen Vorstellungen Menschen verschiedener Altersstufen von *Zeitreisen* haben, erstellte ich einen Fragebogen mit vier bewußt allgemein gehaltenen Fragen. Der Fragebogen wurde sowohl in Schulklassen als auch privat verteilt. Ausgehend von den erhaltenen Antworten, konnte ich bestimmte Charakteristika von *Zeitreisen* formulieren, und so den Begriff *Zeitreise* etwas mehr konkretisieren.

1.1. Fragebogen

Der Fragebogen beinhaltete folgende vier Fragen:

1. Was stellen Sie sich unter einer *Zeitreise* vor? Geben Sie bitte ein kurzes Beispiel.
2. Sind *Zeitreisen* Ihrer Meinung nach möglich? Warum/Warum nicht?
3. Kennen Sie Bücher, Filme, etc. über *Zeitreisen*? Welche?
4. Beschreiben Sie bitte ein Erlebnis, das für Sie wie eine *Zeitreise* war.

Ich möchte betonen, daß der Fragebogen nicht empirisch-wissenschaftlich ausgewertet wurde. Der Fragebogen diente rein der Ideensammlung. Die Fragen sind bewußt unkonkret gehalten, weil meiner Meinung nach mit zunehmender Konkretisierung der Fragen die Ideen von *Zeitreise* eingeschränkt worden wären. So war es meine Absicht, die Fragen so zu formulieren, daß *Zeitreisen* nicht sofort der Physik zugerechnet werden. Als ich die Bögen aushändigte, betonte ich im einleitenden Gespräch, daß es keine allgemeingültige Definition des Begriffs *Zeitreise* gäbe und daher auch keine "falschen" Antworten möglich seien. Ich wollte in den Fragen auch offen lassen, wer oder was das *zeitreisende* Objekt ist. In Frage vier fragte ich jedoch eindeutig nach einem persönlichen *Zeitreiseerlebnis*, also mit dem Menschen als *zeitreisendem* Subjekt.

Da ich während eines längeren Auslandsaufenthaltes (Im Zuge des Erasmus-Programms studierte ich im Studienjahr 1998/1999 an der Universität Padua in Italien.) den Fragebogen entwickelte und die ersten Bögen an dortige heimische oder ebenfalls ausländische Studierende austeilte, sind die Fragen viersprachig formuliert. Insgesamt erhielt ich 105 ausgefüllte Fragebögen.

Beispiele aus den erhaltenen Antworten:

"Zeitreise ist, ...

- ... wenn man in einer Zeitzone Silvester feiert und dann schnell in die nächst-westliche Zeitzone fährt, um dort noch einmal Silvester zu feiern."
- ... wenn ich meine Kindheitsfotos anschau."
- ... wenn ich einen Roman lese, der ein anderes Jahrhundert beschreibt."
- ... wenn man eines Morgens aufwacht, und es gibt n o c h keine Autos und n o c h keine Fernseher."
- ... wenn ich neunzig Jahre zurückreise und mir von Albert Einstein die Relativitätstheorie erklären lasse."
- ... wenn ich eine déjà vu-Erlebnis habe."
- ... wenn man träumt. Träume sind das ultimative Medium für Reisen jeder Art."
- ... nur mit einer Zeitmaschine möglich."
- ... wenn man mit Lichtgeschwindigkeit reist."
- ... wenn man mit einem Raumschiff eine "Hypersprung" in der Raumzeit macht."
- ... das Zurückgehen in die Vergangenheit mit "maschineller" Hilfe."
- ... wenn man ein Schwarzes Loch passiert."
- ... eine Deplazierung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft."
- ... das psychische und physische Erleben einer anderen Zeit."
- ... wenn man ein anderes Zeitgefühl hat oder dieses überhaupt verliert."
- ... wenn man in eine andere Dimension reist."
- ... in die gleiche Welt, aber in eine andere Zeit zu reisen."
- ... Nostalgie, Erinnerungen einerseits, und Reise mittels einer Maschine andererseits."
- ... - aufgrund des normalen Zeitflusses reist man sowieso ständig in die Zukunft."
- ... - weiß nicht."

Dies sind Antworten von Menschen unterschiedlichen Alters auf die Frage, was für sie eine Zeitreise wäre.

1.2. Folgerungen

1. Der Mensch als zeitreisendes Subjekt

Aus den obigen im Alltag zu findenden Vorstellungen zu Zeitreise geht hervor, daß als das durch die Zeit reisende Subjekt meist ein Mensch verstanden wird. Der Mensch erinnert sich, der Mensch träumt, der Mensch besteigt eine Zeitmaschine, der Mensch fährt durch ein Wurmloch, etc.

Dies führe ich darauf zurück, daß der Mensch ein die Zeit wahrnehmendes Lebewesen ist (Die Zeitwahrnehmung des Menschen wurde in Kapitel Zwei bereits erörtert).

Demzufolge kann auch nur ein Mensch eine Zeitreise als solche erkennen.

Dies ist in Hinblick auf physikalische Beispiele zum Thema Zeitreisen interessant, da beispielsweise die Zeitdilatation der Myonen als "Zeitreise der Myonen in die Zukunft" bezeichnet wird. Das Verhalten der Myonen wird aus einer menschlichen Sichtweise heraus interpretiert, in der Begriffe wie *Reise* oder *Zukunft* einen Sinn haben.

2. (Un-)Möglichkeit von Zeitreisen

Obwohl auf Frage Eins (Was stellen Sie sich unter einer Zeitreise vor?) außerordentlich oft *Träume*, *Erinnerungen*, *Romane Lesen*, etc. genannt wurden, wurde oftmals im selben Fragebogen auf die Frage Zwei (Sind Zeitreisen Ihrer Meinung nach möglich? Warum/Warum nicht?) mit *Nein* geantwortet.

Ich führe dies darauf zurück, daß durch die unterschiedliche Fragestellung unterschiedliche Gedankengänge angesprochen wurden. So ist die Frage nach einer Vorstellung sehr offen und läßt sehr viele Antworten zu, die alle gleichermaßen richtig sind. Als Vorstellung ist sozusagen alles erlaubt.

Bei der Frage nach Möglichkeit von Zeitreisen wird eine eher wissenschaftliche Denkweise angesprochen. Die Antwort sollte begründet werden können. Als Gegenargument für Zeitreisen wurden meistens physikalische Gründe (teils physikalisch richtig, teils falsch) genannt, obwohl im selben Fragebogen auf Frage Eins *Träume*, *Erinnerungen*, etc. geantwortet wurden.

Ich kann mir diese Diskrepanz nur dadurch erklären, daß eine Fragestellung wie in Frage Zwei nur im naturwissenschaftlichen Unterricht vorkommt und daher automatisch nach einer naturwissenschaftlichen bzw. physikalischen Begründung gesucht wird. (Anm.: Die psychische Zeitwahrnehmung des Menschen ist selbstverständlich auch naturwissenschaftlich erklärbar. Der Fragebogen wurde jedoch zum Großteil an Schüler/innen ausgeteilt, die noch keinen Psychologieunterricht hatten.).

Eine andere Erklärung könnte sein, daß in wissenschaftlicher Hinsicht der Zeitbegriff zumeist ausschließlich der Physik zugeordnet wird. Da den Jugendlichen aus der

Science Fiction fast ausschließlich physikalische Zeitreisen bekannt sind, die auf der Allgemeinen Relativitätstheorie basieren, werden auch nur solche als "richtige" Zeitreisen gesehen.

Ich persönlich halte diese Erkenntnis für sehr interessant. Aufgrund dessen kann im Unterricht gezielt die Verschiedenartigkeit des Zeitbegriffs hervorgehoben und behandelt werden. Im Physik-Unterricht kann gezielt darauf hingewiesen werden, daß Zeitreisen aufgrund der Relativitätstheorie eine Möglichkeit darstellen, daß es jedoch in der Physik nicht nur den relativistischen Zeitbegriff gibt, sondern auch andere Zeitbegriffe, aufgrund derer es keinen Sinn macht, von Zeitreisen zu sprechen (z.B. quantenmechanischer Zeitbegriff).

Außerdem kann gezeigt werden, daß auch psychische Zeitreisen auf physikalischen Prozessen beruhen, und es somit durchaus legitim ist, diese als naturwissenschaftlich mögliche Zeitreisen zu bezeichnen. Der Unterschied zu physikalischen Zeitreisen bestünde darin, daß der psychischen Zeitreise eine psychische Zeitwahrnehmung zugrunde liegt, während der physikalischen Zeitreise ein objektiver, vom Menschen unabhängiger Zeitbegriff zugrunde liegt. Da es jedoch keinen Zweifel und keine Diskussion darüber gibt, daß psychische und physikalische Zeit gleichermaßen wissenschaftlich akzeptiert sind, sollten sie durchaus auch als zwei getrennte, aber gleichwertige, Zeitbegriffe im "Zeit-Unterricht" behandelt und Parallelen oder Unterschiede herausgearbeitet werden.

3. Charakteristische Elemente von Zeitreisen

Aufgrund der Antworten zum Fragebogen fand ich vier mögliche Charakteristika von Zeitreisen. Diese wurden schon in Kapitel Eins dargelegt, sind aber für die Thematisierung von Zeitreise im Unterricht wichtig, und sollen deshalb kurz wiederholt werden.

- a) *Allgemeine Merkmale treten auf, die geschichtlich oder jahreszeitlich mit einer anderen Zeit in Verbindung stehen.*
- b) *Geschichtlich herausragende Merkmale treten auf, die eindeutig einer bestimmten Zeit zuordenbar sind.*
- c) *Eine Person trifft auf ihre persönliche Vergangenheit oder Zukunft.*
- d) *Eine Uhr zeigt eine andere Zeit an, als man nach dem Zeitverlauf im eigenen Bezugssystem erwarten würde.*

Es kann davon ausgegangen werden, daß, wenn mindestens eines dieser Charakteristika auf ein Ereignis zutrifft, dieses Ereignis (oder diese Situation) als *Zeitreise* bezeichnet werden kann.

Die Charakteristika geben einerseits also Bedingungen vor und ermöglichen so eine Abgrenzung von Zeitreise, andererseits sind sie so offen formuliert, daß die verschiedenen subjektiven Ansichten über Zeitreisen durchaus alle ihren Platz finden. Es wird auch kein bestimmter Zeitbegriff bevorzugt, sodaß physikalische, psychische und kulturelle Zeitreisen als gleichwertig und gleich richtig nebeneinander stehen können.

4. Zeitreise als Thema im Unterricht

Um Zeitreise im Unterricht zu thematisieren, würde ich vorschlagen, zunächst in interdisziplinärer Weise den Zeitbegriff zu behandeln. Dies dient vor allem der Begriffsklärung in Hinblick auf Zeitreise, um späteren begrifflichen Verwirrungen und Mißverständnissen vorzubeugen.

Aufgrunddessen werde ich im Weiteren Möglichkeiten zur Thematisierung des Zeitbegriffs, und darauf basierend Möglichkeiten für einen Unterricht über Zeitreisen darstellen.

2. ZEIT UND ZEITREISE IM UNTERRICHT

Im Folgenden stelle ich Überlegungen zur Thematisierung von *Zeit* im Unterricht an. Hierzu würde ich eine interdisziplinäre Herangehensweise vorschlagen, die Bereiche wie Sprache (Deutsch, Englisch, etc.), Wahrnehmung (Psychologie, Biologie, Physik), Bewegung (Sport, Physik), Philosophie, Musik, Darstellende Kunst, Geschichte, Sozialkunde, Mode, Zeit im praktischen Alltag (Physik, Chemie, ...) etc. umfaßt. Dazu könnte von Fragen zum jeweiligen Thema ausgegangen werden. Die Fragen sollen zum Denken und zur interdisziplinären Suche nach Antwort motivieren. In Klammern wird jeweils die Alterstufe angegeben, die für die Bearbeitung der Fragen meiner Ansicht nach geeignet wäre. Für jüngere Altersgruppen ist es notwendig, die Fragen zu vereinfachen bzw. umzuformulieren.

2.1. Mögliche Unterrichtsinhalte

Zeit und Sprache

Fächer:

Deutsch, tote und lebende Fremdsprachen, Philosophie

Mögliche Fragestellungen:

- Welche Wörter stehen mit dem Zeitbegriff in Verbindung? (Alle Alterstufen)
- Wie kommt die Zeit in der Grammatik vor? (ab 10)
- Wie können an der Sprache charakteristische Elemente des gültigen Zeitbegriffs festgestellt werden? (ab 16)
- Wie kann zeitliche Dauer durch literarische Mittel gedehnt oder gekürzt werden? (ab 16)
- Wie kann der Begriff Zeit umschrieben werden? (ab 14)

Mögliche Arbeitsaufträge:

- Es könnte analysiert werden, in welcher Form Zeit in der Grammatik Ausdruck findet (Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft) und diesbezüglich zwei Sprachen miteinander verglichen werden.
- Außerdem könnte eine Sammlung all jener Begriffe oder Redewendungen, die Zeit als zentralen Begriff haben, gemacht werden.
- Es soll versucht werden, Texte so umzuschreiben, daß die mit Zeit in Zusammenhang stehenden Begriffe durch andere Begriffe ersetzt werden.

- Weiters können literarische Beschreibungen von Zeiträumen besprochen werden. Es könnte verglichen werden, wieviel Zeit einerseits gebraucht wird, um den Text zu lesen, und andererseits welche Zeitdauer im Text beschrieben wurde.

Wahrnehmung von Zeit als Veränderung, Dauer und Zeitrichtung

Fächer:

Physik, Chemie, Psychologie, Biologie, Leibesübungen, Geschichte/Sozialkunde, Geographie/Wirtschaftskunde, Kunstunterricht, Philosophie

Mögliche Fragestellungen:

- In welchen Lebensbereichen wird Zeit wahrgenommen? (ab 10)
- Aufgrund welcher Merkmale erkennt man Zeit? (ab 12)
- Was bedeutet "schnell", was bedeutet "langsam"? (alle Alterstufen)
- Was bedeutet "vorher", was bedeutet "nachher" (zeitlich)? (alle Alterstufen)
- Welche Merkmale hat Zeit? (ab 14)
- Wie würde eine Physik ohne Zeit aussehen? Gäbe es dann überhaupt Physik? (ab 16)

Mögliche Arbeitsaufträge:

- In Physik und Chemie kann Zeit als Veränderung wahrgenommen werden. Es sollten verschiedene physikalische oder chemische Vorgänge auf ihre Veränderlichkeit hin beobachtet werden. Es könnte auch versucht werden, sich eine Natur oder eine Welt ohne Zeit, also ohne Veränderung, vorzustellen. Was würde übrig bleiben? Es soll hier die zentrale Stellung der Zeit als Ausdruck für Veränderung deutlich gemacht werden. Weiters kann die Dauer eines Vorgangs, also die Geschwindigkeit der Veränderung, analysiert werden. Dieser Veränderungsaspekt der Zeit soll für die folgenden Vorschläge gleichermaßen zentral sein.

- Es könnten beispielsweise in Biologie, im Turnunterricht und in Psychologie Schüler/innen-Versuche zur menschlichen Reaktionszeit gemacht werden. Im Zusammenhang damit könnte die psychische Zeitwahrnehmung von Veränderungen (schnell/langsam) besprochen werden.

- Ein weiteres Thema wäre die unterschiedliche Zeitwahrnehmung bei Tieren. Beispiel: Ein Raubvogel sieht viel mehr Bilder pro Sekunde als ein Mensch. Daher sieht er auch schnelle Bewegungen, die für den Menschen aufgrund ihrer Schnelligkeit nicht wahrnehmbar sind. Im Gegensatz dazu ist die zeitliche Wahrnehmung eines Faultiers viel langsamer als jene des Menschen. Es könnte auch verglichen werden, inwieweit sich diese Unterschiede in der Bewegung der Tiere äußern.

- Ein weiterer Versuch wäre, die zeitliche Dauer ohne Zuhilfenahme einer Uhr von den Schüler/innen schätzen zu lassen. Es könnten unterschiedliche Versuchsbedingungen geschaffen werden: mit/ohne Musik, mit/ohne Beleuchtung, allein/mit anderen, etc.
- In Geschichte/Sozialkunde könnte die soziale und kulturelle Wahrnehmung von Zeit thematisiert werden. Z.B. könnten für verschiedene historische und kulturelle Epochen bestimmte Charakteristika gesucht werden. Beispiele: Städteplanung, Handelswesen, Kleidung, Sozialstruktur in den Familien und im Gemeinwesen, Technikausrüstung, etc.
- Ebenso können in Geographie und Wirtschaftskunde zeitliche Veränderungen dargestellt werden. Z.B. Kontinentalbewegungen, Staatsformen, Veränderungen der Grenzen, Veränderungen der Handelsmethoden und des Zahlungsverkehrs, etc.
- In Musik, der Bildenden Kunst und in den Medien werden verschiedene Effekte aufgrund der zeitlichen Wahrnehmung des Menschen ausgelöst. Man denke z.B. an die Bildfolge bei Zeichentrickfilmen. Es könnten filmische und akustische Mittel besprochen werden, anhand derer die zeitliche Wahrnehmung manipuliert werden kann. Ein Versuch wäre, daß die Schüler/innen die zeitliche Dauer verschiedener Videoclips oder Werbefilme schätzen sollen. Es sollte darauf geachtet werden, welche musikalische Untermalung und welcher Filmschnitt welchen Effekt auslöst.
- Allgemein kann der Thematisierung von Zeit in der Kunst nachgegangen werden. Beispiele: "Die Uhr" von Haydn, "Zeit" von Salvador Dalí, etc.

Objektive Zeit, Zeitmessung

Fächer:

Physik, Chemie, Psychologie, Biologie, Leibesübungen, Geschichte

Mögliche Fragestellungen:

- Wozu braucht man Uhren? (alle Altersstufen)
- Wie könnte die Zeit angegeben werden, wenn es keine Uhren gäbe? (ab 10)
- Wozu dient eine objektive Zeit? (ab 16)
- Welche Probleme würden sich ergeben, wenn eine objektive Zeit fehlen würde? (ab 16)

Mögliche Arbeitsaufträge:

- Eine mögliche Aufgabe wäre, eine Methode zu finden, um möglichst allgemeingültig eine Zeitdauer angeben zu können. Es dürfen keine Uhren verwendet werden. Hier könnte eine Unterscheidung zwischen einseitig und periodisch ablaufenden Vorgängen getroffen werden (Pulsschlag, Sanduhr, etc.). Als Zeitdauer, die von den Schüler/inne/n zu messen ist, könnten chemische Prozesse oder physikalische Vorgänge herangezogen werden
- Es könnte ein Zeitmeßgerät gebastelt werden (z.B. eine Wasseruhr).
- Im Turnunterricht könnte ein Wettlauf durchgeführt werden, wobei die Zeitmessung ohne Uhren stattfinden soll.
- Zur Gegenüberstellung von objektiver und individuell-subjektiver Zeit könnte die circadiane Uhr des Menschen behandelt werden.
- Selbstverständlich fallen in diesen Themenbereich die Geschichte der Zeitmessung und ihre Verbindung mit Astronomie, sowie beispielsweise die Konstruktion einer Sonnenuhr.

Absolute Zeit - Relative Zeit

Fächer:

Physik, Mathematik, Philosophie (Einfluß der Relativitätstheorie auf das Weltbild, Entwicklung wissenschaftlicher Theorien), Psychologie, Kunstunterricht (Filme), Sprachen (Zeitreiseliteratur)

Mögliche Fragestellungen:

- Was unterscheidet den modernen physikalischen Zeitbegriff vom Zeitbegriff Newtons? (ab 17)
- Aus welchen Gründen sind physikalische Zeitreisen auf Basis des relativistischen Zeitbegriffs möglich, auf Basis des Newtonschen Zeitbegriffs nicht? (ab 18)
- Welche Parallelen gibt es zwischen dem subjektiv-individuellen psychischen Zeitbegriff und dem relativen physikalischen Zeitbegriff? (ab 18)
- Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede weisen Licht- und Schallwellen auf? (ab 17)
- Aus welchen Gründen wird in der Wissenschaftsgeschichte eine Theorie von einer anderen abgelöst? (ab 18)
- Wie sind Raum und Zeit in den verschiedenen physikalischen Theorien miteinander verknüpft? (ab 18)

Mögliche Arbeitsaufträge:• *Raumzeitliche Koordinaten*

Es könnte ein Vergleich durchgeführt werden, wie Raum und Zeit in der Newtonschen Physik, in der Quantenmechanik und in der Relativitätstheorie miteinander verknüpft sind. Dazu kann allgemein davon ausgegangen werden, daß in der Physik ein Ereignis durch räumliche und zeitliche Koordinaten bestimmt ist. Insofern sind auch in der Newtonschen Physik Raum und Zeit bezüglich eines Ereignisses miteinander verbunden.

Der Unterschied von relativer und absoluter Zeit kann anhand des folgenden Gedankenexperiments erklärt werden: Die Schüler/innen werden (fiktiv) aufgefordert, sich in einer Stunde vor dem Haupteingang der Schule zu treffen. Angenommen wird, daß alle Schüler/innen über richtig gehende Uhren verfügen und pünktlich sind!

Nach der Newtonschen Physik treffen sich alle Schüler/innen nach einer Stunde vor dem Haupteingang (Pünktlichkeit vorausgesetzt), egal was sie in dieser einen Stunde gemacht haben und egal, ob sie zu Fuß, mit dem Rad, etc., also mit verschiedener Geschwindigkeit den Weg zum Haupteingang zurückgelegt haben.

Nach der Relativitätstheorie werden sich nur jene Schüler/innen nach einer Stunde vor dem Haupteingang treffen, die sich innerhalb dieser Stunde mit Geschwindigkeiten relativ zum Haupteingang bewegt haben, die der Lichtgeschwindigkeit gegenüber vernachlässigbar sind. Es ist nicht mehr egal, was die Schüler/innen in der Zwischenzeit gemacht haben, und vor allem, welche Geschwindigkeit sie relativ zum System des Haupteingangs hatten. Manche Schüler/innen werden zu spät kommen, obwohl sie nach ihren Uhren pünktlich sind. Raumzeitliche Koordinaten sind also abhängig von der Relativbewegung der Bezugssysteme und somit nicht absolut gültig.

In der Newtonschen Physik sind also raumzeitliche Koordinaten absolut gültig, in der Relativitätstheorie sind sie nicht mehr absolut gültig.

In der Quantenmechanik stellt sich das Problem, daß kein wirklich punktgenauer Ort und keine punktgenaue Zeit für ein Treffen (von Teilchen) vereinbart werden könnte.

Lichtgeschwindigkeit

• Licht ist eine elektromagnetische Welle. Die Absolutheit der Lichtgeschwindigkeit bezieht sich nicht nur auf sichtbares Licht, sondern auf alle elektromagnetischen Wellen. Sie ist in der elektromagnetischen Natur begründet und daher qualitativ ganz anders als akustische Wellen. Dies sollte betont werden. Licht und Schall wird zu sehr als äquivalent gesehen ("das eine sieht man, das andere hört man"). Auch die herkömmlichen Beispiele zu Gleichzeitigkeit setzen diese beiden Wellenarten zu sehr gleich und lassen die Betonung des qualitativen Unterschieds vermissen.

• Es könnte herausgearbeitet werden, wieso die Absolutheit der Lichtgeschwindigkeit nicht abgeleitet, sondern postuliert wurde. Dabei kann der Frage nachgegangen wer-

den, aufgrund welcher physikalisch-theoretischen Vorteile dieses Postulat aufgestellt wurde. In Zusammenhang damit könnte diskutiert werden, was der Ausdruck "physikalische Wirklichkeit" bedeutet.

- Weiters könnte diskutiert werden, welche Verständnisschwierigkeiten mit der Relativitätstheorie und dem Postulat der absoluten Lichtgeschwindigkeit verbunden sind, die in der Newtonschen Physik nicht auftreten.

Zeitreisen aufgrund der relativen Zeit

- Es könnten Beispiele für Zeitreisen aus Literatur und Film gesucht werden, die mittels der Speziellen Relativitätstheorie stattfinden könnten.

Beispiel: Wie lange und mit welcher Geschwindigkeit müßte Dornröschen fliegen, um nach hundert Jahren "jung und schön wie zuvor" wieder auf der Erde aufzuwachen? (Angenommen, das Schloß wäre zu einem Raumschiff umbaubar.)

- Weiters könnte erarbeitet werden, wieso Zeitreisedarstellungen in die Vergangenheit, wie in "Terminator" oder "Zurück in die Zukunft", aufgrund der Speziellen Relativitätstheorie nicht möglich wären.
- Selbstverständlich fallen in diesen Bereich alle speziell-relativistischen Effekte (Myonen, zum Teil auch Zwillingsparadoxon), die ich in den vorangegangenen Kapiteln bereits beschrieben habe.

Die gekrümmte Raumzeit

Fächer:

Physik, Mathematik, Philosophie (Einfluß der Relativitätstheorie auf das Weltbild, Entwicklung wissenschaftlicher Theorien), Religion (Metaphysik, Kraftbegriff), Kunstunterricht (Filme), Sprachen (Zeitreiseliteratur)

Mögliche Fragestellungen:

- Welche Vorteile hinsichtlich der Erklärbarkeit physikalischer Phänomene bietet die Annahme weiterer Dimensionen? (ab 18)
- Was wollen physikalische Theorien erklären? (ab 18)
- Was wird als Wirklichkeit bezeichnet? (ab 17)
- Wie veränderte sich der Kraftbegriff in der Geschichte? (ab 18)
- Wie machen sich Kräfte bemerkbar? (ab 14)
- Was ist für Kräfte charakteristisch? (ab 17)

Mögliche Arbeitsaufträge:

- *Kraft*

Zum Thema Kraft könnten verschiedene metaphysische und physikalische Kraftbegriffe miteinander verglichen werden.

- *Scheinkräfte*

Es könnte die Corioliskraft mit der Gravitationskraft verglichen werden.

Die Corioliskraft kann gezeigt werden, indem auf einem Plattenspieler ein Blatt Papier befestigt wird und ein/e Schüler/in mit geschlossenen Augen mit einem Filzstift vom Drehpunkt bis zum Rand eine "Gerade" zieht, einmal bei ausgeschaltetem, einmal bei eingeschaltetem Plattenspieler. Nach Ansicht des/der Schüler/in war ihre Bewegung jedesmal die selbe. Er/Sie ist der Meinung, eine annähernd gerade Linie mit der Hand beschrieben zu haben. Daraus kann abgeleitet werden, daß es auf das Bezugssystem ankommt, ob die Linie gerade oder gekrümmt ist.

Mit dieser Erkenntnis könnten die Planetenbahnen besprochen werden, einmal aus der Sicht einer flachen Raumzeit, einmal aus Sicht einer gekrümmten Raumzeit.

Im Zuge dessen können die Schwierigkeiten der Vorstellbarkeit eines Hyperraums besprochen werden.

Gezeitenkräfte

- Allgemein sollte besprochen werden, wie wir Kräfte spüren.
- Es könnte gezeigt werden, daß die Krümmung der Raumzeit spürbar ist, daß wir diese Empfindung jedoch als Kraft interpretieren. In der Allgemeinen Relativitätstheorie wird diese Empfindung zurückgeführt auf Veränderung der Längenmaßstäbe. (Siehe dazu Kapitel Drei)

Kosmologie

- Es könnte diskutiert werden, welche Konsequenzen die Annahme einer gekrümmten Raumzeit mit sich bringt. In diesem Zusammenhang können Schwarze Löcher und Wurmlöcher behandelt werden. (Siehe dazu Kapitel Fünf)
- Weiters könnten Science Fiction-Filme und -Romane auf ihre kosmologischen Grundlagen analysiert und überprüft werden.
- Als Konsequenz einer Reise durch ein Wurmloch in die Vergangenheit können die daraus erwachsenden philosophischen Probleme besprochen werden (Großvaterparadoxon).
- Im Sprachenunterricht könnte als Arbeitsauftrag eine Zeitreisengeschichte auf physikalischer Grundlage erarbeitet werden.

Zeitreisen in Literatur, Film und anderen Medien

Fächer:

Physik, Sprachen, Geschichte, Kunst, Philosophie, etc.

Mögliche Fragestellungen:

- Aufgrund welcher Charakteristika ist eine Szene, ein Erlebnis, etc. als Zeitreise zu erkennen? (Wieso weiß die Person, daß sie in der Zeit gereist ist? (ab 12))
- Welche filmischen oder literarischen Mittel gibt es, Zeitreisen darzustellen?
- Aufgrund welcher Motive und Zwecke wird eine Zeitreise unternommen?

Mögliche Arbeitsaufträge:

- Ein Auftrag könnte lauten, allgemein Werbungen zu suchen, die Zeitreise als Element verwenden. Beispiel: "Das Auto der Zukunft ..."; "Der Duft des nächsten Jahrtausends" etc.
- Es könnten Filme gezielt auf Zeitreiseelemente hin analysiert werden. Es soll erkannt werden, wie eine Zeitreise filmisch dargestellt wird. Dabei sollen auch die Reisemittel, die Reiseziele und die Reismotive herausgearbeitet werden.
- Aus einer Sammlung von Zeitreisefilmen, in denen die Reise mittels einer Zeitmaschine stattfindet, könnten Gemeinsamkeiten und Unterschiede (z.B. Korrelation von technischer Entwicklung und Entstehungsjahr der Geschichte) analysiert werden.

2.2. Konsequenzen von Zeitreisen

Meines Erachtens wäre es von Bedeutung, im Unterricht auch die mit Zeitreisen verbundenen gesellschaftlichen und physikalischen Konsequenzen zu betrachten. Auf Paradoxa, die sich aus einer Reise in die Vergangenheit ergäben ("Großvaterparadoxon") werde ich hier nicht mehr eingehen, da diese schon ausführlich in Kapitel Fünf behandelt wurden und die Theorie der Parallelen Welten als Lösungsvorschlag präsentiert wurde. Ich möchte mich hier eher mit jenen Konsequenzen befassen, die sich beispielsweise aus speziell-relativistischen Zeitreisen ergeben würden. Außerdem beleuchte ich kurz philosophische Konsequenzen, wie etwa die Frage nach der Identität.

Ein Datum für alle

Angenommen, es wären jene Ressourcen vorhanden, die es allen Menschen ermöglichen würden, eine Zeitreise in der Art des Zwillingsparadoxon zu unternehmen. Wenn alle Menschen (oder sehr viele Menschen) beliebig ihre Zeitreise bestimmen könnten, also deren Dauer und Geschwindigkeit, die letztendlich für den Zeitunterschied zum Ausgangsort bestimmend sind, kommen sie zu völlig verschiedenen Zeiten zu ihrem Ausgangspunkt zurück. Ihre Leben und ihre Lebenszeiten sind vollkommen individuell. Daraus würde folgen, daß alle Geschehnisse im gesellschaftlichen wie privaten

Bereich, die sich auf allgemeingültige Daten stützen, quasi unmöglich werden, da alle in einer anderen Zeit leben. Bildlich ausgedrückt ist für die/den eine/n Reisende/n der 13. Oktober 2005 (angenommen es gäbe eine unveränderliche Erdenzeit als Vergleichsmöglichkeit) eine Woche entfernt, für die/den andere/n ein halbes Jahr. Konsequenz daraus wäre der Zusammenbruch jeglicher auf der Allgemeingültigkeit von Daten beruhender Systeme wie Bürokratie. Auch eine Staatsformen wie die Demokratie wären undurchführbar, weil z.B. das Datum einer Wahl für alle "relativ weit entfernt" wäre. Selbst wenn man alle zur Wahl aufrufen würde, die eben gerade an diesem Tag in der "Erdengegenwart" verweilen, wäre dies sinnlos, weil diese möglicherweise nicht für ihre Zukunft wählen sondern für jene ihrer Kinder oder Enkelkinder. Ein derartiges In-die-Zukunft-Wählen, und zwar obendrein unter verschiedenen Voraussetzungen, ist sicher nicht mehr mit dem Konzept einer Demokratie vereinbar. Was würden wir wohl dazu sagen, wenn für die politische Landschaft, in der ich jetzt lebe, meine Großmutter die Stimme abgegeben hätte. Aber selbst zahlenmäßig würde sich der Grundpfeiler der Demokratie, nämlich die allgemeine Wahlberechtigung für Volljährige, nicht ausgehen. Denn es könnte zwar so ausgelegt werden, daß meine Großmutter stellvertretend für mich wählte, aber wer wählte für meine älter Schwester?

Identitätsfrage

Wären Zeitreisen in die Vergangenheit oder in die eigene Zukunft möglich, so könnte ich mein jüngeres oder älteres Ich treffen. Umgekehrt könnte ich von meinem jüngeren oder älteren Ich besucht werden. Aber wenn mich mein zukünftiges Ich besucht, wo ist dann die Identität? Erscheine ich mir dann als fremde Person, obwohl ich weiß, daß diese Person mein jüngeres Selbst ist? Müßte, wenn dies so wäre, meine Identität nicht unendlichfach geben? Außerdem könnte dann nicht mehr ausgesagt werden, daß ich vor einer Minute und ich in diesem Augenblick dieselbe Identität haben. An die bürokratischen Schwierigkeiten der Erstellung "Relativitätstheorie-tauglicher" Identitätsausweise ist gar nicht zu denken!

Mit menschlicher Identität hängt auch menschliche Autonomie und Willensfreiheit zusammen. Die Konsequenzen bezüglich Willensfreiheit wurden in Kapitel Fünf bereits erörtert.

2.3. Film- und Literaturtips

Aufgrund der unglaublichen Menge an Filmen und Romanen, in denen Zeitreisen vorkommen, ist es nahezu unmöglich, alle aufzulisten. Ich möchte daher nur ganz wenige Filme und Romane erwähnen, die mir entweder aus physikalischer Hinsicht oder aufgrund ihres phantastischen Inhalts empfehlenswert erscheinen. Daher ist die Auswahl als rein subjektiv zu betrachten und erhebt in keinster Weise Anspruch auf Vollständigkeit. Beigefügt sind kurze Kommentare.

Filme

"Time Machine", H. G. Wells ¹	Zeitreise mittels Zeitmaschine; pessimistische Sozialutopie; geringer physikalischer Gehalt
"Zurück in die Zukunft"	Reise mittels Zeitmaschine in die Vergangenheit; Darstellung des "Großvaterparadoxons"; geringer physikalischer Gehalt
"Raumschiff Enterprise"; "Star Trek" (Serie und Kinofilm)	Darstellung interstellarer Reisen; teilweise sehr hoher physikalischer Gehalt (vor allem in Star Trek: Reisen durch Wurmlöcher, etc.).
"Terminator", A. Schwarzenegger	Zeitreise in die Vergangenheit; Gewalt, Brutalität; interessant aufgrund der Darstellung des "Großvaterparadoxons"
"Event Horizon"	Zeitreise mittels eines Schwarzen Lochs in ein Universum des Schreckens; Horrorelemente; physikalisch interessant
"Odyssee 2001"	Interstellare Reise; mittlerer physikalischer Gehalt

¹Wells, H. G., *The Time Machine*, Bloomington: Indiana University Press

"Contact", nach einem Roman von Carl Sagan ²	Visualisierte Reise durch ein Wurmloch; physikalisch interessant
"Jurassic Park", S. Spielberg	Eigentlich kein Zeitreisefilm im herkömmlichen Sinn, erhält jedoch seine Faszination aufgrund von Zeitreiseelementen; physikalischer Gehalt gering
"Strange Days"	Virtuelle Realität; geringer physikalischer Gehalt
"Der Schläfer", Woody Allen	Zeitreise mittels Schlaf; psychologisch interessant; sehr lustig
"Und täglich grüßt das Murmeltier"	Ein Tag wiederholt sich ständig, nur mit kleinen Abweichungen; kann als Darstellung Paralleler Welten interpretiert werden; ansonsten kein physikalischer Gehalt
"Lola rennt"	Dieselbe halbe Stunde im Leben von Lola verläuft dreimal auf unterschiedliche Art und Weise; physikalischer Gehalt aufgrund von Interpretationsmöglichkeit als Parallele Welten; Spannung und Unterhaltung ohne Brutalität
"Orlando" ³ , Sally Potter, nach einem Roman von Virginia Woolfe	Zeitsprünge über Jahrhunderte; kein physikalischer Gehalt; interessant aufgrund der filmischen Umsetzung von Zeitreisen.

²Sagan, Carl, *Contact*, New York 1985

³Woolfe, Virginia, *Orlando*, Frankfurt am Main: Fischer, Tb.Nr. 1981

Literatur

"Sternstagebücher" ⁴ , Stanislaw Lem	Interstellare Reisen; eine Fülle an Zeitreisen; sehr lustig; hoher physikalischer Gehalt
"Und immer wieder die Zeit" ⁵ , Alan Lightman	Beschreibung verschiedener Wirklichkeiten, in denen die Zeit nicht fließt, sondern stockt oder springt oder umkehrt oder verschwindet ...; hoher physikalischer Gehalt
"Time Machine" ⁶ , H. G. Wells	(Siehe oben)
"Neuromancer" ⁷ , W. Gibson	Virtuelle Realität; Zukunftsvision; wenig physikalischer Gehalt, aber psychologisch interessant
"1984", G. Orwell	Pessimistische Sozialutopie; geringer physikalischer Gehalt
"Briefe in die chinesische Vergangenheit" ⁸ , H. Rosendorfer	Reise mittels Zeitmaschine; sehr lustig; geringer physikalischer Gehalt
"Dornröschen", Gebrüder Grimm	Zeitreise mittels Schlaf; kein physikalischer Gehalt
"Die Entdeckung der Langsamkeit" ⁹ , S. Nadolny	Kein Zeitreisebuch, aber Thematisierung der Zeit; hoher psychologischer Gehalt

⁴Lem, Stanislaw, *Sternstagebücher*, Frankfurt am Main: Suhrkamp 1978, Tb. Nr. 459

⁵Lightman, Alan, *Und immer wieder die Zeit. Einstein's Dreams*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1997

⁶Wells, H. G., *The Time Machine*, Bloomington: Indiana University Press

⁷Gibson, William, *Neuromancer*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1997

⁸Rosendorfer, Herbert, *Briefe in die chinesische Vergangenheit*, München: dtv 1998

⁹Nadolny, Sten, *Die Entdeckung der Langsamkeit*, München: Piper 1983

"Die Insel des vorigen Tages" ¹⁰ , U. Eco	Buch über die Datumsgrenze und die Schwierigkeit der Ortsbestimmung in der Seefahrt; diesbezüglich physikalisch interessant
"Längengrad" ¹¹ , D. Sobel	Keine Zeitreisegeschichte; Entwicklung der Taschenuhr; physikalisch interessant

Ich empfehle außerdem zum Thema "Zeitreisen" die Lektüre herkömmlicher Reiseliteratur¹². In vielen Fällen wird man feststellen, daß eine Reise in kultureller Hinsicht auch eine Zeitreise ist.

¹⁰Eco, Umberto, *Die Insel des vorigen Tages*, München, Wien: Carl Hanser Verlag 1995

¹¹Sobel, Dava, *Längengrad*, Goldmann Verlag 1998, btb Nr. 27318

¹²Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die historische Entwicklung des Reisens.

Vgl. Brilli, Antonio, *Als Reisen eine Kunst war*, Berlin: Wagenbach 1997

3. DIDAKTISCHE ÜBERLEGUNGEN ZUR RELATIVITÄTSTHEORIE

Am Beispiel des Zwillingsparadoxons möchte ich auf die Schwierigkeiten hinweisen, die sich aus dem Versuch der Vermittlung der Relativitätstheorie ergeben. Besonderes Augenmerk werde ich auf Wirklichkeitsnähe und die Vermittlung physikalischer Inhalte durch das Beispiel legen. Meine teils sehr kritischen Betrachtungen sollen kein Ausdruck einer Geringschätzung dieses Beispiels sein, sondern lediglich auf die Schwierigkeit hinweisen, die Inhalte der Relativitätstheorie durch Beispiele zu vermitteln.

Das Zwillingsparadoxon wird an dieser Stelle nicht mehr ausführlich dargestellt. Ich beziehe mich auf die Darstellung in Kapitel Vier und möchte daher darauf verweisen.

Zeitdilatation als Wirklichkeit

Die Zeitdilatation allgemein ist sehr schwierig begreifbar zu machen. Für die Person A vergeht wie für die Person B ihre eigene Zeit völlig normal. Lediglich der "Blick aus der Ferne" auf die Uhr des anderen Inertialsystems verblüfft ein wenig. Nach dem "gesunden Hausverstand" führt diese Folgerung zu einem Widerspruch, und es stellt sich unvermeidbar die Frage: Auf welcher Uhr vergeht denn nun *w i r k l i c h* die Zeit langsamer? bzw. Welche/r ist nun *w i r k l i c h* der/die Jüngere?

Allein aus der Formulierung der aus Hoffnung auf Lösung gestellten Fragen geht schon hervor, welchem Mißverständnis bei der Betrachtung des Beispiels aufgesessen wird. Es wird davon ausgegangen, daß es *e i n e* absolute Wirklichkeit gibt. Gerade Fakten, wie der Altersunterschied von Personen oder auch nur die Relation älter/jünger sollten doch absolut sein. Ja, wenn sich die Personen (oder Uhren) im selben Bezugssystem befinden würden, dann wären diese Zeitunterschiede absolut. Die Personen wären in ein und derselben Wirklichkeit. Ich muß korrigieren: Natürlich bewegen sich die Menschen tagtäglich relativ zueinander: zu Fuß, auf Zugfahrten, im Auto, im Flugzeug oder in der Raumstation. Die Zeitdilatation, die dabei beobachtet wird, ist jedoch nahezu unmerklich - die uns möglichen Geschwindigkeiten sind einfach zu klein gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit, als daß der Effekt deutlich bemerkbar wäre und uns tagtäglich verwundern würde (bis wir uns schließlich vermutlich auch daran gewöhnt hätten).

Unser "Hausverstand" ist ein Produkt unserer Erfahrungen. Da wir Zeitdilatationen im Sinne der Relativitätstheorie aufgrund ihrer geringen Größe nicht bemerken, erfahren wir sie nicht. Die Zeitdilatation ist nicht Schein, sondern wirklich! Nur hat jedes Bezugssystem seine eigene Wirklichkeit. Es gibt soviele Wirklichkeiten wie es Bezugssysteme gibt. Und jede dieser Wirklichkeiten hat ihre absoluten Relationen wie jünger/älter, kürzer/länger, kleiner/größer. In der einen Wirklichkeit ist es völlig

hinfällig, wie diese Relationen in der anderen Wirklichkeit sein mögen, weil sie keine Auswirkung hätten.

Somit können die obigen Fragen folgendermaßen beantwortet werden:

Von meinem Bezugssystem aus gesehen altert die Person im relativ zu mir bewegten Bezugssystem *w i r k l i c h* langsamer als ich und deren Uhr geht *w i r k l i c h* langsamer als meine. Ich weiß, daß die andere Person genau das Gegenteil behauptet, weil für sie die Wirklichkeit eine andere ist. Da wir uns niemals im selben Bezugssystem befinden werden (wir sind relativ zueinander in gleichförmiger Bewegung, also für immer), werden wir nie in der selben Wirklichkeit leben und somit werden unsere Relationen niemals die selben sein.

Der Mensch als Uhr

Ich bin mir bewußt, daß sich die Zeiteffekte in den Beispielen als viel spannender und verblüffender darstellen lassen, wenn die Uhren Menschen sind (also biologische Uhren). Vermutlich rührt dies daher, daß wir uns mit irgendwelchen Bills und Bobs eher identifizieren können als mit einem Myon A und einem Myon B. Ich möchte jedoch bewußt am allgemeinen Uhrenbegriff festhalten, da sich daraus bei genauerer Betrachtung mehr Möglichkeiten ergeben. Die Uhr "Mensch" ist nämlich für physikalische Experimente eher ungeeignet. Erstens ist sie sehr anfällig für Störungen und funktioniert z.B. bei großen Beschleunigungen nicht mehr (soll heißen: der Mensch stirbt). Zweitens ist sie eher ungenau, was sich darin zeigt, daß z.B. kleine Zeitdilatationseffekte nicht wahrgenommen werden. Die Uhr "Mensch" schränkt die Möglichkeiten zur Untersuchung von Zeitdilatationseffekten ein. Es stellt sich als viel brauchbarer und unverfänglicher heraus, die relativistischen Effekte anhand von Teilchen (Teilchengeschwindigkeiten, Teilchenlebensdauern, etc.) darzustellen. Schließlich sind im Bereich der Teilchenphysik die relativistischen Effekte wirklich beobachtbar, denn die Teilchen sterben keinen frühen und qualvollen Tod. Trotzdem werden in der Literatur Beispiele mit menschlichen Uhren geführt, die selbige menschlichen Uhren aufgrund der darin auftretenden Beschleunigungen eindeutig nicht überleben würden. Das heißt, die Uhr würde eigentlich schon lange nicht mehr existieren, bevor sie auf die erforderliche Geschwindigkeit beschleunigt wäre und der eigentlich interessante Teil des Beispiels erst beginnt.

Mir ist klar, daß die Autor/inn/en populärwissenschaftlicher Literatur sich dieser Methode bedienen, um einer grauen physikalischen Theorie mehr Farbe zu verleihen. Ohne Zweifel ist durch diese Methode die Relativitätstheorie einem viel breiteren Publikum ein Begriff geworden (ob sie dadurch auch besser verstanden wird, sei in Frage gestellt), als wenn in diesem Zusammenhang immer nur von Teilchen die Rede gewesen wäre. Und möglicherweise haben gerade solche verblüffenden Beispiele den einen oder die andere zum Physikstudium motiviert. Ich halte jedoch eine gewisse

Skepsis gegenüber dieser Methode der Wissensvermittlung für angebracht. Jene Vereinfachungen, die zugunsten der Vorstellungskraft gemacht werden, sind leider oft fern jeglicher wirklicher Möglichkeit. Ich frage mich, ob es letztenendes nicht eher zum Verständnis beitragen würde, bei realistischen Möglichkeiten zu bleiben, auch wenn sie auf den ersten Blick nicht so spannend zu sein scheinen. Denn was ist befriedigend daran, daß ein Beispiel (vermeintlich) verstanden wird, wenn als Voraussetzung so unrealistische Annahmen getroffen werden müssen, wie etwa, daß ein Mensch die Beschleunigung von 0 km/s auf 200000 km/s innerhalb eines Augenblicks unbeschadet übersteht? An diesem Punkt hängt aber z.B. das ganze Zwillingsparadoxon! (Siehe dazu weiter unten.) Wie realistisch ist das Beispiel als Ganzes und was wird letzten Endes daraus gelernt?

Es ist richtig, daß die Identifikationsmöglichkeit in einem Beispiel das Interesse am Thema wachsen läßt. Aber meiner Meinung nach ist es unerläßlich, bei der Vermittlung von physikalischem Wissen daran zu denken, was dem Publikum davon im Kopf hängenbleibt und ob sich dieses mit jenen Inhalten deckt, die ich vermitteln wollte. Das sehe ich als didaktischen Auftrag.

Am Beispiel des Zwillingsparadoxons schlägt meines Erachtens die Verblüffung über den plötzlichen Altersunterschied eher in Unglaubhaftigkeit als in Verständnis um. In Erinnerung bleibt das Zwillingsparadoxon schließlich als spannende Geschichte, die man entweder glaubt, oder auch nicht. Infolgedessen wird die Relativitätstheorie zu einer Lieferantin für "unglaubliche Geschichten", aber es bleibt die aus dem Erfahrungsschatz stammende Erkenntnis: Die Wirklichkeit ist anders. Damit wird die Relativitätstheorie genau in jenes Eck gestellt, aus dem sie Physiker/innen mit Mühe versuchen, herauszuholen: nämlich der Unwirklichkeit. Genau diese Konsequenz wird meiner Meinung nach in den vielen über Relativitätstheorie geschriebenen populärwissenschaftlichen Büchern nicht genügend berücksichtigt. Es wird oft zuviel Wert auf "Knalleffekte" gelegt und dabei vergessen, daß diese Knalleffekte meistens nur verwirren.

Wirklichkeitsnähe physikalischer Beispiele

Wird davon ausgegangen, daß die Aufgabe der Physik die bestmögliche Beschreibung der Wirklichkeit ist, was schließlich der gesellschaftliche Anspruch an die Physik ist, dann muß ein Beispiel so gewählt werden, daß die dadurch demonstrierte neue Theorie in die bestehende Wirklichkeit integrierbar ist bzw. als Wirklichkeit akzeptiert werden kann. Das Beispiel selber darf der Wirklichkeit aber auf keinen Fall widersprechen! Der Mensch ist aufgrund seiner Konzeption nicht in der Lage, alle Erkenntnisse der Physik durch eigene Erfahrung zu bestätigen und zu verstehen (z.B. die Physik der ganz kleinen (Quantentheorie) und der ganz großen Bereiche (Kosmolo-

gie)). Diese Theorien werden jedoch durch erfolgreiche Experimente bestätigt und somit akzeptiert, auch wenn keine Menschen die Hauptrollen spielen.

Meiner Ansicht nach ist es absolut nicht kontraproduktiv für das Verständnis einer Theorie, wenn klargestellt wird, daß die Bereiche, in denen jene Phänomene auftreten, welche nur durch diese Theorie erklärt werden können, zu klein bzw. zu groß sind, um innerhalb der menschlichen Vorstellungskraft Platz zu finden und daher schlicht und einfach nicht vorstellbar sind. So gesehen tut der menschliche Hausverstand, um diesen noch ein letztes Mal zu strapazieren, eigentlich gut daran, ein Beispiel wie das Zwillingsparadoxon **n i c h t** als realistisch zu akzeptieren, weil es unrealistisch ist! Menschen neigen zwar dazu, alles auf sich zu beziehen, aber ich bin davon überzeugt, daß sie ab einem gewissen Alter über jene Intelligenz verfügen, auch von ihrer eigenen (be-)greifbaren Welt abstrahieren zu können. Ich persönlich halte es auch für legitim und in vielfacher Hinsicht für seriöser, daß für das Verständnis bestimmter physikalischer Konsequenzen Voraussetzungen wie Alter des Publikums (ein Problem, das sich in der Schule stellt) oder ein gewisses physikalisches Vorwissen und Vorstellungsvermögen gefordert werden. Selbstverständlich ist es an den Physiker/inne/n, diese Voraussetzungen gegebenenfalls zu schaffen!

Meine kritischen Betrachtungen über das Erklären physikalischer Theorien anhand von Beispielen spiegeln meine eigenen Erfahrungen wider, die ich selber beim Versuch, die Relativitätstheorie zu verstehen, machte.

Zum Abschluß meiner kritischen Bemerkungen möchte ich Richard P. Feynman zitieren, der sich dieses Problems der Wissensvermittlung gegenübergestellt sah, als er die Theorie der Quantenelektrodynamik einem breiten Publikum zugänglich machen wollte.

*"Viele Popularisierungsversuche wissenschaftlicher Arbeiten erzielen eine scheinbare Einfachheit, indem sie etwas anderes beschreiben und damit ihren vorgeblichen Gegenstand erheblich verzerren. Die Achtung vor unserem Thema verbietet uns ein solches Verfahren. So haben wir in stundenlangen Diskussionen versucht, ein Maximum an Klarheit und Einfachheit zu erringen, ohne die Wahrheit durch einen Kompromiß zu entstellen."*¹³

Vermittlung physikalischer Inhalte

Die Geschichte des Zwillingsparadoxons bleibt in den Köpfen der Menschen sehr wohl hängen, es stellt quasi eine "Eselsbrücke" zu den einmal gelernten Inhalten der Relativitätstheorie dar - mit gravierenden Fehlschlüssen! Dies möchte ich (auch auf eigener Erfahrung begründet) kurz darstellen:

¹³Feynman, Richard P., *QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, München: Piper 1988, S.11

Es wird erinnert, daß die Zwillingenbrüder zu Beginn der Geschichte gleich alt sind. Dann fliegt einer von beiden mit einer Rakete weg und kommt nach einigen Jahren zurück. Wenn sich die Zwillinge wieder treffen, ist der eine (nämlich jener aus der Rakete) viel jünger geblieben als der andere. Schluß auf die Relativitätstheorie: In bewegten Systemen vergeht die Zeit langsamer.

Dies ist genau jener Schluß, aufgrund dessen die Spezielle Relativitätstheorie angezweifelt wurde und das Zwillingenproblem zu einem Paradoxon machte. Relativ zueinander bewegen sich nämlich *b e i d e* Zwillingenbrüder! Trotzdem ist letztendlich nur einer der jüngere. Daher sollte darauf geachtet werden, daß auch die Auflösung des Zwillingenparadoxons im Gedächtnis bleibt. Das, was das Zwillingenparadoxon eigentlich zeigen soll, ist, daß der Zeitdilatationseffekt nur solange gleichermaßen und in gleicher Größe jeweils in bezug auf das bewegte Inertialsystem festgestellt wird, solange sie sich gleichförmig relativ zueinander bewegen. Sobald jedoch diese Bedingung nicht mehr zutrifft, entsprechen sich die von den Bezugssystemen aus gegenseitig beobachteten Zeitdilatationen nicht mehr. Dies wird deutlich im tatsächlich bestehenden Altersunterschied beim Wiedersehen der Zwillinge.

Um das Zwillingenparadoxon auflösen zu können, muß der gravierende Unterschied zwischen relativ zueinander gleichförmig bewegten und beschleunigten Inertialsystemen bereits begriffen worden sein. Im vorliegenden Fall muß also zumindest irgendwann einmal schon verstanden worden sein, daß eine Flugbahnänderung, in welche Richtung auch immer, eine beschleunigte Bewegung darstellt. Ich meine jedoch, daß dies nicht immer vorausgesetzt werden kann.

Ich machte die Erfahrung, daß vor allem in der populärwissenschaftlichen Literatur das Zwillingenparadoxon im Kapitel über die Spezielle Relativitätstheorie in Zusammenhang mit relativ gleichförmiger Bewegung erwähnt wird, also zu einem Zeitpunkt, an dem der/die Leser/in das, was mit dem Beispiel demonstriert werden soll, noch gar nicht weiß bzw. selber überprüfen kann. Nun könnte als Argument angeführt werden, daß das Zwillingenparadoxon zum Nachdenken anregt (dieser Prozeß wird durch Paradoxa erfahrungsgemäß ausgelöst) und zum Weiterstudium der Lektüre motiviert, also einen schönen Übergang von der Speziellen zur Allgemeinen Relativitätstheorie bietet. Es muß jedoch auch davon ausgegangen werden, daß manche Leser/innen nach dem Kapitel über die Spezielle Relativitätstheorie die Lektüre abbrechen. Ihnen bleibt das Paradoxon im Kopf in Verbindung mit der Speziellen Relativitätstheorie. Es wird meist vergessen, wieso es überhaupt als "Paradoxon" bezeichnet wird, nicht jedoch aus Kenntnis der Sachlage (die ja das vermeintliche Paradoxon als *k e i n* Paradoxon entlarvt) sondern aus Gewöhnung an den Namen des Beispiels ohne weiteres Hinterfragen. In Folge ergeben sich die oben genannten Fehlinterpretationen.

Ich möchte klarstellen, daß ich persönlich das Zwillingenparadoxon (oder besser Uhrenparadoxon) als sehr spannendes und sehr brauchbares Beispiel erachte. Ich möchte

hier nur zur Diskussion stellen, ob Zeitpunkt und Zusammenhang, in dem das Uhrenparadoxon üblicherweise angeführt wird, passend gewählt sind.

4. "ZEITREISE" ALS PROJEKT

Als Beispiel für die Umsetzung des Themas "Zeitreise" im Unterricht möchte ich den Ablauf und die Ergebnisse der vom IAAC (Internationalen Alpen-Adria-College) im Sommer 1999 in Tanzenberg (Kärnten) veranstalteten Projektwoche zum Thema "Zeitreisen", an der ich selber teilnehmen durfte, präsentieren.

An der vom IAAC veranstalteten Projektwoche zum Thema "Zeitreisen" nahmen Schulen aus Slowenien, Kroatien, der Slowakei und Österreich teil. Jede Schule war durch ein- bis zwei Lehrpersonen und zwei bis vier Schüler/innen vertreten. Das Projekt beinhaltete einerseits die tägliche Arbeit in Arbeitsgruppen, andererseits Workshops, die an den arbeitsgruppenfreien Nachmittagen stattfanden und eine Zusammenarbeit auf verschiedenen Ebenen ermöglichten.

Da die Schüler/innen und Lehrer/innen aus dem nicht nicht-deutschsprachigen Ausland über hervorragende Deutschkenntnisse verfügten, konnte das Projekt in deutscher Sprache abgehalten werden. In sprachlichen Zweifelsfällen wurde Englisch gesprochen.

Am ersten Tag fand die Gruppeneinteilung in die Arbeitsgruppen statt. Jene Lehrer/innen, die keine Arbeitsgruppe bzw. keinen Workshop leiteten, teilten sich auch zur Mitarbeit in Arbeitsgruppen ein. Diese Einteilung sollte während der ganzen Woche unverändert bleiben, es sollten also keine Arbeitsgruppenwechsel stattfinden, um die Erstellung eines die ganze Woche widerspiegelnden Arbeitsprodukts zu ermöglichen.

Der Tagesablauf der Projektstage war so eingeteilt, daß vormittags und nachmittags in den diversen Arbeitsgruppen bzw. Workshops gearbeitet wurde. An den Abenden wurden Vorträge zum Thema gehalten.

Da der Veranstaltungsort des Projekts, das Bundesgymnasium Tanzenberg, in der Nähe der ehemals römischen Provinzhauptstadt Virunum liegt, war die Römerzeit ein zentrales Thema.

Arbeitsgruppen und Workshops

Archäologie

Die Archäologiegruppe begann ihre Arbeit mit einer Besichtigung der Ausgrabungsstätte im Zollfeld ("Virunum"). Während der Besichtigung wurde vom Ausgrabungsleiter anhand von ausgegrabenen Gebäuden und Gegenständen die Lebensweise der Römer erklärt, ihre Kleidung, ihre sportliche und kämpferische Aktivität, ihr Handel und ihre Götterwelt. Die Gruppenteilnehmer/innen wurden auch allgemein über die römische Geschichte dieser Region informiert, um so ein abgerundetes Geschichtsbild von der Römerzeit zu erhalten.

Der körperlich-aktive Teil der Arbeit bestand für die Teilnehmer/innen darin, an der Ausgrabung des Amphitheaters von Virunum aktiv mitzuarbeiten.

Eindrücke der Schüler/innen:

"Es war sehr lustig, interessant und lehrreich, ein paar Tage bei "den Römern" zu verbringen. Man konnte eine andere Zivilisation und Lebensweise kennenlernen."

"Immer, wenn ich bei den Ausgrabungen geholfen habe, fühlte ich die alte römische Kultur in jedem Winkel."

Römisch Kochen

An einem Nachmittag fand der Workshop "Römisch Kochen" statt. Es wurden alte überlieferte römische Kochrezepte nachgekocht und auch gegessen!

Chemie

Die Chemie-Gruppe beschäftigte sich im Sinne von *Zeitreise* mit den alten Kulturtechniken der Metallgewinnung sowie der Papier- und Seifenherstellung. Es wurde dargestellt, wie diese Techniken in der gegenwärtigen Industrie in weiterentwickelter Form praktisch angewendet werden

Zeitreise und Film

Diese Gruppe, die ich mitbetreut habe, ging der Frage nach den filmischen Umsetzungsmöglichkeiten von Zeit bzw. Zeitreise nach.

Zu Beginn bot ich eine Einleitung zum Thema Zeit. Dabei wurden verschiedene physikalische und psychologische Aspekte von Zeit beleuchtet. Hauptaugenmerk wurde auf folgende Themen gelegt:

- a) Die Richtung der Zeit
- b) Zeitdauer

- c) Parallele Zeitverläufe ("Parallele Welten")
- d) Zeitsprünge, Zeitreisen

Wir suchten nach einer Möglichkeit, die Bearbeitung dieser Themen so präsentieren zu können, daß in der kurzen, uns zur Verfügung stehenden Zeit möglichst viel von den Inhalten vermittelt werden kann, und fanden als geeignetes Präsentationsmedium den Film. Dementsprechend waren die Arbeitsaufträge, zu den obigen Themen kurze, aber aussagereiche, Videofilme zu produzieren. Dazu wurden zwei Filmteams zu je drei Schüler/inne/n gebildet und mit Videokameras ausgestattet.

a) Ob ein Vorgang symmetrisch oder asymmetrisch in der Zeit ist, kann durch Vorwärts- oder Rückwärtsspielen des Videos festgestellt werden: Dazu wurden charakteristische Bewegungsabläufe gesucht und gefilmt.

Bei zeitsymmetrischen Bewegungsabläufen erscheint die Bewegung gleich, wenn der Film in verkehrter Richtung angeschaut wird. (Es kommt einem/einer nicht komisch vor, wenn der Film von hinten nach vorne betrachtet wird.) Z.B.: Zweige, die sich im Wind bewegen, eine Brunnenfontäne aus weiter Entfernung, das Öffnen und Schließen einer Tür.

Bei zeitasymmetrischen Bewegungen sind die vorgespielten und zurückgespielten Filme offensichtlich ungleich. Z.B.: auf eine Turnmatte umfallende Schüler/innen, Springbrunnen aus der Nähe, aus einem Glas Trinken, Zeichnen, Sprechen...

b) Filmische Mittel, wie z.B. Schnitt, Aufnahmeperspektiven usw., können zur Veränderung der Realzeit der Dauer einer Handlung eingesetzt werden. Wir haben einerseits Szenen gedreht, in denen Zeit verkürzt wurde. So wurde z.B. das Schreiben eines Textes auf zwei Tafeln von der Realzeitdauer von 15 Minuten auf die Filmzeitdauer von 30 Sekunden reduziert.

Andererseits wurde eine Handlung von zehn Sekunden (ein Zug bei einem Schachspiel) auf 30 Sekunden gedehnt.

c) Beim Thema "Parallele Welten" ging es um das filmische Umsetzen paralleler Vorgänge, wie z.B.: der optischen und akustischen Wahrnehmung verschiedener Personen zur gleichen Zeit in der gleichen Umgebung. Die beiden gefilmten Wahrnehmungen konnten auf dem Fernsehschirm nebeneinander parallel verfolgt werden.

d) Zum Thema Zeitsprünge und Zeitreisen wurden Filme vorgeführt und dahingehend analysiert, mit welchen filmtechnischen oder inhaltlichen Mitteln Zeitsprünge bzw. Zeitreisen dargestellt werden.

1. Film: "Orlando"

Als Beispiel für die Darstellung von sehr langen Zeiträumen innerhalb von 90 Minuten sahen wir den Film "Orlando" (Regie: Sally Potter, nach einem Roman von Virginia Woolfe), in dem eine Person, Orlando, dargestellt wird, die mehrere Jahrhunderte lang lebt, und dabei selbst nicht altert. Orlando findet sich immer wieder in neuen Situationen und Epochen wieder. Die Zeitsprünge zwischen diesen Situationen werden dadurch dargestellt, daß Orlando plötzlich in einen tiefen, mehrere Tage dauernden Schlaf verfällt und an einem anderen Platz in der Geschichte wieder aufwacht. Der Schlaf wird also hier als Mittel zur Zeitreise eingesetzt.

2. Film: "Time Machine"

Der Film "Time Machine" basiert auf dem Roman von H. G. Wells, der um die Jahrhundertwende (19./20. Jhdt.) entstand.

In diesem Film begibt sich der Hauptdarsteller mittels einer selbstgebauten Zeitmaschine auf Zeitreisen, wobei er das gewünschte Reiseziel, also jenes Erdenjahr, in das er reisen möchte, auf seiner Maschine einstellt. In der fernen Zukunft angekommen, stellt er fest, daß sich eine Zwei-Klassen-Gesellschaft gebildet hat, in der die eine Klasse über die andere herrscht und deren Mitglieder sogar verspeist. Der Hauptdarsteller verliebt sich jedoch in eine Frau aus der beherrschten Klasse und will sie aus dieser schrecklichen Zeit retten.

In "Time Machine" wird die Zeitreise bereits mittels einer Maschine ausgeführt, was auf eine gewisse Technikfaszination im ausgehenden 19. Jahrhundert schließen läßt. Die Aussage des Films ist eine zukunfts-kritische, es wird eine negative Sozialutopie dargestellt.

Optische Zeit

Das Ziel war, Vorgänge, die man mit freiem Auge nicht wahrnehmen kann, da sie zu langsam oder zu schnell für die menschliche Wahrnehmung sind, mit einer Digitalkamera festzuhalten. (Z.B. Sternbewegung am nächtlichen Sternenhimmel, Wolkenbildung, Brennprozeß einer Kerzenflamme.)

Experiment 1:

Es wurde eine Kerze mit Hilfe einer Zeitrafferaufnahme beim Abbrennen im 15 Sekunden-Takt photographiert. Aus diesen Beobachtungen konnte der Schluss gezogen werden, daß der Docht am Anfang das Wachs am Rand zum Schmelzen bringt, wodurch die Flamme an Größe gewinnt. Die nun größere Flamme schmilzt mehr Wachs, so daß sie sich selbst ertränkt und kleiner wird.

Experiment 2:

Eine weitere Zeitrafferaufnahme gab Einblicke in die faszinierenden Veränderungen der Wolkenformen. Für diesen Versuch wurde die Kamera auf einem Stativ befestigt und fotografierte wiederum im computergesteuerten 15 Sekunden-Takt den Himmel. Das Ergebnis waren deutlich wahrnehmbare Wolkenbewegungen.

Experiment 3:

Es sollten die einzelnen Bewegungsabläufe eines fallenden Wassertropfens festgehalten werden. Dazu wurde die Technik der Kurzzeitfotografie angewendet. Der Raum wurde verdunkelt, der Blitz wurde durch den Wassertropfen mittels einer Lichtschranke ausgelöst, bei jeder Wiederholung jedoch mit einer kleinen zeitlichen Versetzung. Als Ergebnis konnte man die einzelnen Sequenzen des Falles des Wassertropfens deutlich erkennen.

Zeit in Sprache und Alltag

Diese Gruppe ging der Verwendung des Begriffes *Zeit* in verschiedenen Sprachen nach. Es wurden folgende Sprachen miteinander verglichen: Slowakisch, Tschechisch, Slowenisch, Kroatisch und Deutsch. Als Ergebnis der Arbeit konnte ein fünfsprachiges "Zeit-Wörterbuch" und ein Kreuzworträtsel zum Thema *Zeit* präsentiert werden.

Theater und Video

Die Theater- und Video-Gruppe produzierte einen Kurzfilm mit dem Titel: "Don't play with time", eine filmische Umsetzung des "Großvaterparadoxons".

Inhalt:

Durch den Einfluß von ihrer eifersüchtigen Freundin wird ein Mädchen auf eine Zeitreise geschickt. Sie trifft - ohne es zu wissen - ihre damals 18jährigen Eltern. Sie fühlt sich zu ihrem eigenen Vater hingezogen, trennt ihre Eltern und vermeidet dadurch ihre eigene Existenz.

- 1) Einstieg: Nicole und Misko auf der Wiese, Bettina spioniert, macht ein Foto.
- 2) Bettina ist zu Hause, betrachtet das Foto, zerreißt es, verbrennt Nicole, Misko bleibt.
- 3) Bettina kommt zu Nicole, um ihr zum Geburtstag zu gratulieren. Auf der Geburtstagskarte ist das Datum erkennbar. Bettina schenkt Nicole eine Uhr. Nicole spielt mit der Uhr und geht plötzlich auf Zeitreise.
- 4) Szene im Gasthaus: Nicole taucht auf, sieht ein Plakat, auf dem ein völlig anderes Datum steht als sie erwarten würde, wundert sich. Am Nebentisch sitzt ein Pärchen. Nicole macht sich an den jungen Mann heran, seine Begleiterin geht daraufhin an den

Nachbartisch. Nicole will dem jungen Mann ihre Telefonnummer geben und zieht versehentlich ein Foto von sich als Baby und ihren Eltern. Sie erschrickt, erkennt die Eltern in dem jungen Paar wieder, das sie gestört hat und versucht, die Eltern wieder zusammenbringen. Es gelingt jedoch nicht. Nicole ist verzweifelt, läuft davon und löst sich langsam auf.

Zeit in der Biologie

Die Biologie-Gruppe ging der Frage nach der biologischen Uhr von Menschen im Speziellen und der Natur im Allgemeinen nach.

1. Es wurden Korrelationen zwischen natürlichen und menschlichen Perioden gesucht (Wach/Schlaf-Rhythmus und Tag/Nacht-Rhythmus; Mondzyklus und Menstruationszyklus).
2. Weiters wurde versucht zu beobachten, was alles in genau einer Minute in der Natur passiert.
3. Es wurde die circadiane Uhr des Menschen erörtert (Änderung der Körpertemperatur im Laufe eines Tages, etc.)

Persönliche Gedanken zur Projektwoche:

Als die Projektwoche stattfand, hatte ich mich schon mehrere Monate mit dem Thema *Zeitreisen* beschäftigt. Auf der Projektwoche wurden viele theoretische Inhalte, die teilweise auch in dieser Arbeit vorkommen, erfolgreich in die Praxis umgesetzt. Das war ein sehr schönes und motivierendes Erlebnis für mich und hat gezeigt, daß *Zeit* und *Zeitreise* nicht zu theoretisch und un(be)greifbar sind, um im Unterricht thematisiert zu werden.

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Diplomarbeit behandelte ich das Thema *Zeitreisen*. Zuerst ging ich der Frage nach, was unter *Zeitreise* allgemein zu verstehen sei, um in weiterer Folge verschiedene Möglichkeiten für *Zeitreisen* darzustellen. Mein Hauptaugenmerk richtete sich auf physikalische *Zeitreisen* und die damit zusammenhängenden physikalischen Grundlagen. Aufgrund der Interdisziplinarität des Zeitbegriffs behandelte ich auch nicht-physikalische *Zeitreisen*, um einen vollständigen Überblick über *Zeitreisen* zu geben.

Zeitreisen allgemein

Die erste Hälfte der Arbeit diente der Begriffsklärung und der Schaffung eines grundlegenden Verständnisses.

Zur Eingrenzung des Begriffs *Zeitreise* untersuchte ich zunächst in interdisziplinärer Weise verschiedene herkömmliche *Zeitreise*-Vorstellungen. Die allgemein verbreiteten Vorstellungen von *Zeitreisen* erfuhr ich größtenteils aus einer von mir durchgeführten Umfrage zum Thema *Zeitreisen*. Mittels der gefundenen Gemeinsamkeiten in den *Zeitreise*-Vorstellungen konnte ich charakteristische Merkmale formulieren, aufgrund derer eine Situation oder ein Erlebnis als *Zeitreise* bezeichnet wird. Jene Merkmale, an denen sich eine Person im Allgemeinen in ihrem "normalen Zeitfluß" orientiert, sind beispielsweise Uhrzeit, Jahreszeit, geschichtlich-kulturelle Merkmale wie Technikausstattung etc. Treten nun Merkmale auf, die nicht in den normalen Zeitfluß integrierbar sind, kann die Situation oder das Erlebnis als *Zeitreise* interpretiert werden.

Nicht jeder Zeitbegriff kann einer *Zeitreise* zugrunde liegen. Ich versuchte daher, aus den obengenannten allgemeinen Vorstellungen von *Zeitreisen* charakteristische Elemente jenes, für eine *Zeitreise* in Frage kommenden, Zeitbegriffs zu finden. Da vor allem der Zeitbegriff der relativistischen Physik oder auch jener der psychischen Zeit den meisten *Zeitreise*-Vorstellungen zugrunde liegen, wurden diese beiden Zeitbegriffe ausführlich beleuchtet.

Aus der Relevanz der relativistischen Zeit für Zeitreisen erschien es mir wichtig, eine ausführliche Darstellung der Entwicklung vom absoluten Zeitbegriff Newtons, nach welchem Zeitreisen physikalisch nicht möglich sind, zum relativen Zeitbegriff Einsteins zu bieten. Ziel dieser Vorgehensweise war es, zu zeigen, daß die Möglichkeit oder Unmöglichkeit von Zeitreisen vom Zeitbegriff abhängt, der ihnen zugrunde gelegt wird. Insofern muß die Frage "Sind Zeitreisen möglich?" je nach Zeitbegriff differenziert beantwortet werden.

Physikalische Zeitreisen

Die zweite Hälfte der Arbeit steht ganz im Zeichen physikalischer Zeitreisen. Zuerst wurden Zeitreisemöglichkeiten, die sich durch den relativistischen Effekt der Zeitdilatation ergeben, dargestellt. Aufgrund der Veränderung der Längen- und Zeitmaßstäbe in relativ zueinander bewegten Systemen können Phänomene auftreten, die als Zeitreisen interpretiert werden können. Als Beispiel behandelte ich die Lebensdauer von Myonen und das sogenannte "Zwillingsparadoxon".

Im Weiteren ging ich auf jene Zeitreisemöglichkeiten ein, die sich aus der Krümmung der Raumzeit bzw. aus "Löchern" im Raumzeitkontinuum ergeben. Im Zuge dessen wurde kurz die Entwicklung eines Sterns bis hin zu einem Schwarzen Loch dargestellt. Aus den Einsteinschen Feldgleichungen geht hervor, daß ein Schwarzes Loch nicht unbedingt in einer Singularität enden muß. Als Lösungen kommen auch Tunnel in der Raumzeit, sogenannte "Wurmlöcher" in Frage. Dadurch könnten interstellare Reisen in entfernte Raumzeitgebiete, aber auch in andere Universen möglich sein. Da Reisen in der Raumzeit auch als Zeitreisen auffaßbar sind, wurden die verschiedenen möglichen Lösungen für Wurmlöcher behandelt. Im Zusammenhang mit Reisen durch Wurmlöcher erörtere ich jene paradoxen Situationen, die sich als Konsequenzen aus einer Reise in die Vergangenheit ergeben könnten und stellte eine mögliche Auflösung dieser Paradoxa mit Hilfe der Theorie der Parallelen Welten dar.

Zum Abschluß des physikalischen Teils behandelte ich sogenannte Überlicht-Phänomene, wie Tachyonen, den Tunneleffekt und Teleportation. Diese können insofern als Zeitreisen betrachtet werden, als eine zumindest lichtschnelle Informationsübertragung stattfindet.

Didaktische Überlegungen

Im Anschluß an den physikalisch-fachlichen Teil der Arbeit stellte ich Überlegungen an, welche Möglichkeiten der Inhaltsvermittlung, beispielsweise in Hinblick auf die Relativitätstheorie, das Thema Zeitreisen für den Schulunterricht eröffnet und wie die Thematisierung von Zeit und Zeitreisen im Unterricht möglich wäre. Dazu ging ich von der interdisziplinären Relevanz des Zeitbegriffs aus und entwarf mögliche Fragestellungen und Arbeitsaufträge für unterschiedliche Fächer und unterschiedliche Alterstufen.

Da ich die Möglichkeit hatte, das Thema Zeitreisen auf einer vom Internationalen Alpen Adria College veranstalteten Projektwoche in Zusammenarbeit mit Schüler/inne/n und Lehrer/inne/n praktisch umzusetzen, stellte ich als Abschluß der Arbeit das Endprodukt dieser Zusammenarbeit vor.

LITERATURVERZEICHNIS

BÜCHER, ZEITSCHRIFTEN

Aichelburg, Peter C. (Hrsg.), *Zeit im Wandel der Zeit*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1988

Aichelburg, P. C., Schein, F., *Wormholes and timetravel*, Acta Physica Polonica, Vol. 29, 1998

Aristotele, *Fisica*, traduzione di Luigi Ruggiu, Milano: Rusconi 1995

Aschoff, Jürgen, *Die innere Uhr des Menschen*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290

Assmann, Jan, *Das Doppelgesicht der Zeit im altägyptischen Denken*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290

Bartsch, Hans-Jochen, *Mathematische Formeln*, Leipzig: Fachbuchverlag, 1989

Bastable, Jonathan, *Good Timing. Time Travel*, Artikel in der Zeitschrift *About Time*, Nr.2

Bergmann; Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.8, Sterne und Weltraum*, Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin/New York: de Gruyter 1997

Biagioli, Mario, *Galilei, der Höfling. Entdeckungen und Etikette: Vom Aufstieg der neuen Wissenschaft*, Frankfurt am Main: Fischer 1999

- Brilli, Antonio, *Als Reisen eine Kunst war*, Berlin: Wagenbach 1997
- Cramer, Friedrich, *Der Zeitbaum. Grundlegung einer allgemeinen Zeittheorie*, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1993
- Davis, P. C. W., *Space and time in the modern universe*, Cambridge University Press 1977
- Davies, Paul, *Die Unsterblichkeit der Zeit. Die moderne Physik zwischen Rationalismus und Gott*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1995
- Deutsch, David, Lockwood, Michael, *Die Quantenphysik der Zeitreise*, Spektrum der Wissenschaft, Nov. 1994
- Deutsch, David, *La trama della realtà*, Torino: Einaudi 1997
- Dürr, H.-P., *Wie offen ist die Zeit? Die Verantwortung für unsere Zukunft*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit?. Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990
- Eco, Umberto, *Die Insel des vorigen Tages*, München, Wien: Carl Hanser Verlag 1995
- Elias, Norbert, *Über die Zeit*, Frankfurt am Main: Suhrkamp 1997
- Everett, H., *"Relative State" Formulation of Quantum Mechanics*, zitiert in: Mainzer, Klaus, *Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit*, München: Beck 1995, Beck'sche Reihe Nr. 2011
- Feynman, Richard P., *QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, München: Piper 1988, S.11
- Frauenfelder, Hans, Henley, Ernest M., *Teilchen und Kerne. Subatomare Physik*, München, Wien: R. Oldenbourg Verlag 1979
- Galilei, Galileo, *Dialogo dei Massimi Sistemi*, a cura di Ferdinando Flora, Mondadori 1996
- Galilei, Galileo, *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*, Darmstadt 1973

- Gerthsen, Ch., Kneser, H.O., Vogel, H., *Physik*, 16.Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer 1989
- Geymonat, Ludovico, *Galileo Galilei*, Torino: Einaudi 1969
- Gibson, William, *Neuromancer*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1997
- Gott, J. Richard III, *Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solution*, Physical Review Letters 66, 1991
- Großklaus, Götz, *Medienzeit*, zitiert in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit?. Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990
- Grüsser, Otto-Joachim, *Zeit und Gehirn*, in: Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290
- Gumin, Heinz und Meier, Heinrich (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, München: Piper 1989, Nr. 2290
- Hawking, Steven W., *Eine kurze Geschichte der Zeit. Die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg: Rowohlt 1988
- Hawking, Steven, *Chronology protection conjecture*, Physical Review Letters 46, 1992
- Halpern, Paul, *Löcher im All. Modelle für Reisen durch Raum und Zeit*, Hamburg: Rowohlt 1977
- Hess, Peter, *Zur Pharmakologie von MDMA*, in: Weigle, Constanze, Rippchen, Ronald (Hrsg./in.), *MDMA. Die psychoaktive Substanz für Therapie, Ritual und Re-creation*, 1992: Der Grüne Zweig 103
- Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997
- Hogan, C., Kirschner, R., Suntzeff, N., *Die Vermessung der Raumzeit mit Supernovae*, Artikel in: *Spektrum der Wissenschaft*, März 1999

- Kaempfer, W., *Die Zeit und die Uhren*, zitiert in: Cramer, Friedrich, *Der Zeitbaum. Grundlegung einer allgemeinen Zeittheorie*, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1993
- Kaku, Michio, *Im Hyperraum. Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen*, Hamburg: Rowohlt 1994
- Kanitscheider, Bernulf, in: *Zeit-Zauber. Unser Jahrhundert denkt über das Geheimnis der Uhren nach. Franz Kreuzer im Gespräch mit Michael Ende und Bernulf Kanitscheider*, Wien: Franz Deuticke Verl. ges. 1984
- Langenbach, Jürgen, *Physikwunder: Teleportation*, Artikel in: *Der Standard*, 11.12.1997
- Lasota, Jean-Pierre, *Die Enthüllung der Schwarzen Löcher*, in: *Spektrum der Wissenschaft*, August 1999
- Lem, Stanislaw, *Sterntagebücher*, Frankfurt am Main: Suhrkamp 1978, Tb. Nr. 459
- Levine, Robert, *Eine Landkarte der Zeit. Wie Kulturen mit Zeit umgehen*, München: Piper 1998
- Lightman, Alan, *Und immer wieder die Zeit. Einstein's Dreams*, München: Wilhelm Heyne Verlag 1997
- Lorentz, Hendrik Anton, *Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichtes nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt*, zitiert in: Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln*, Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Verlag 1997
- Mach, Ernst, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, zitiert in: Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften*, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wissenschaftsverlag 1989
- Mach, Ernst, *Die Prinzipien der Wärmelehre*, Leipzig 1896
- Mach, Ernst, *Die Prinzipien der Wärmelehre*, zitiert in: Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften*, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI-Wissenschaftsverlag 1989

- Mainzer, Klaus, *Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit*, München: Beck 1995, Beck'sche Reihe Nr. 2011
- Mittelstaedt, Peter, *Der Zeitbegriff in der Physik*. Grundlagen der exakten Naturwissenschaften, Bd.3, Mannheim/Wien/Zürich: BI- Wissenschaftsverlag 1989
- Mitter, Heinrich, *Mechanik. Vorlesung über Theoretische Physik 1*, BI- Hochschultaschenbücher Bd. Nr. 698, Mannheim 1989
- Morris, M. S., Thorne, K. S., *Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity*, Am. J. Phys. 56 (5), May 1988
- Morris, M. S., Thorne, K. S., Yurtsever, U., *Wormholes, Time Machines and the Weak Energy Condition*, Physical Review Letters 61, 1988
- Müller, Bernd, *Schneller als das Licht*, bild der wissenschaft 8/1997
- Müller, Rainer, *Zurück in die Zukunft*, bild der wissenschaft 8/1997
- Nadolny, Sten, *Die Entdeckung der Langsamkeit*, München: Piper 1983
- Nahin, Paul J., *Time Machines. Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, New York: AIP 1993
- Planck, Max, *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*, Annalen der Physik, IV,1901; zitiert in: Segrè, Emilio, *Personaggi é scoperte della fisica contemporanea*, Milano: Mondadori 1996
- Platon, *Die Zeit und die Planeten*, in: *Timaios*, Hülser, Karheinz (Hrsg.), nach der Übersetzung von Schleiermacher, Friedrich, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1991, S.257
- Poincaré, Henri, *Das Maß der Zeit*, in: Aichelburg, Peter C. (Hrsg.), *Zeit im Wandel der Zeit*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1988
- Pöppel, Ernst, *Wie kam die Zeit ins Hirn?*, in: Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit?. Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990

- Prigogine, Ilya, *La nascita del tempo. Le domande fondamentali sulla scienza dei nostri giorni*, Milano: Bompiani 1998
- Prigogine, Ilya, *Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*, München: Piper 1979
- Quien, N., Wehrse, R., Kindl, Ch., *Licht auf Abwegen*. in: *Spektrum der Wissenschaft. Digest: Astrophysik*, Jänner 1999
- Rennert, P., Schmiedel, H., Weißmantel, Ch. (Hrsg.), *Kleine Enzyklopädie, Physik*, Thun/Frankfurt/M.: Deutsch 1987
- Robb, A.A., *The Theory of Space and Time*, zitiert in: Russell, Bertrand, *Das ABC der Relativitätstheorie*, Frankfurt/Main: Fischer 1989
- Roenneberg, Till, *Zeiträume, innere Uhren und Zeitgeber*, Artikel in: *du, die Zeitschrift der Kultur*, Heft Nr. 10, Oktober 1997, Zürich: TA-Media AG
- Rosendorfer, Herbert, *Briefe in die chinesische Vergangenheit*, München: dtv 1998
- Rothman, Tony, *Die sieben Pfeile der Zeit*, Wissenschaftsessay in: *Zeitmagazin*, Hamburg: Zeitverlag
- Russell, Bertrand, *Das ABC der Relativitätstheorie*, Frankfurt/Main: Fischer 1989
- Schachtel, Ernst, *Metamorphosis*, zitiert in: Fox Keller, Evelyn, *Liebe, Macht und Erkenntnis. Männliche oder weibliche Wissenschaft?*, München, Wien: Carl Hanser Verlag 1986
- Sagan, Carl, *Contact*, New York 1985
- Schein, F., Aichelburg, P. C., Israel, W., *String-supported wormhole spacetimes containing closed timelike curves*, *Physical Review Letters* 54, 1996
- Segrè, Emilio, *Personaggi é scoperte della fisica contemporanea*, Milano: Mondadori 1996
- Sexl, Raab, Streeruwitz, *Physik I*, Wien: Ueberreuter 1982

- Sexl, Raab, Streeruwitz, *Physik 2*, Wien: Ueberreuter 1983
- Sexl, Roman, Schmidt, Herbert K., *Raum, Zeit, Relativität*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1991
- Sexl, R. u H., *Weißer Zwerge - Schwarze Löcher*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1979
- Sexl, Roman U., Urbantke, Helmuth K., *Relativität, Gruppen Teilchen*, Wien: Springer-Verlag 1976
- Sobel, Dava, *Längengrad*, Berlin: Goldmann Verlag 1998, btb Nr. 27318
- Steinberg, A. M., Kwiat, P. G., Chiao, R. Y., *Measurement of the Single-Photon Tunneling Time*, Physical Review Letters 71, 1993
- Thorne, Kip S., *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München: Droemer Knaur 1994
- Weidner, R. T., Sells, R. L., *Elementare moderne Physik*, Wiesbaden: Vieweg 1982
- Weis, Kurt (Hrsg.), *Was ist Zeit?. Zeit und Verantwortung in Wissenschaft, Technik und Religion*, München: dtv 1995, Nr. 1990
- Weizsäcker, Carl Friedrich von, zitiert in: Davies, Paul, *Gott und die moderne Physik*, München: C.Bertelsmann Verlag 1986
- Wells, H. G., *The Time Machine*, Bloomington: Indiana University Press
- Wolf, Fred Allen, *Parallele Universen. Auf der Suche nach anderen Welten*, Frankfurt am Main: Insel Verlag 1993
- Woolfe, Virginia, *Orlando*, Frankfurt am Main: Fischer, Tb. Nr. 1981

INTERNET

Braunstein, Samuel L., *A fun talk on teleportation*,

<http://www.research.ibm.com/quantuminfo/teleportation/braunstein.html> (Stand: 8.10.1999)

Chiao, Raymond Y., *What is known about tachyons ...*, Scientific American, Ask the Experts,

<http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics29.html> (Stand: 22.9.1999)

Deutsch, David, Ekert, Artur, *Quantum Communication moves into the unknown*,

<http://www.qubit.org/intros/comm/comm.html> (Stand: 8.10.1999)

Holman, Richard F., *What exactly is a "wormhole"?*, Sci. Am., Ask the Experts,

<http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics34.html> (Stand: 22.9.1999)

IBM® Research (Verf. Unbek.), *Quantum Teleportation*,

<http://www.research.ibm.com/quantuminfo/teleportation/> (Stand: 8.10.1999)

Reucroft, Stephen, Swain, John, *What ist the Casimir effect?*, Sci. Am., Ask the Experts,

<http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics44/physics44.html> (Stand: 1.10.1999)

The Board of Trustees of the University of Illinois (Verf. unbek.) ©1995, *A Black Hole Is Born*,

<http://www.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/NumRel/BlackHoleFormation.html> (Stand: 27.9.1999)

Universität Innsbruck (Verf. unbek.), *Quantum Teleportation*,

http://www.uibk.ac.at/c/c704/qo/photon_teleport/tpidea.html (Stand: 26.9.1999)

University of Oregon (Verf. unbek.), *Worm Holes and Such*,

<http://zebu.uoregon.edu/~imamura/122/mar13/travel.html> (Stand: 23.9.1999)

Visser, Matt, *What exactly is a "wormhole"?*, Scientific American, Ask the Experts,

<http://www.sciam.com/askexpert/physics/physics34.html> (Stand: 22.9.1999)

Zeilinger, Anton, *Jenseits jeder Gewißheit. Das Rätsel der Quantenwelt*,

<http://www.info.uibk.ac.at/c/c704/qo/de/jenseits/index.html> (Stand: 26.9.1999)

