

Unverkäufliche Leseprobe

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Text und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.



Richard A. Muller

JETZT

Die Physik der Zeit

Aus dem Amerikanischen
von Sebastian Vogel

S. FISCHER



Erschienen bei S. FISCHER

Die Originalausgabe erschien unter dem Titel
»Now. The Physics of Time« im Verlag W.W. Norton,
New York/London 2016
© 2016 by Richard A. Muller

Für die deutschsprachige Ausgabe:
© 2018 S. Fischer Verlag GmbH, Hedderichstr. 114,
D-60596 Frankfurt am Main

Für die Verwendung des Auszugs aus
»As Time Goes By« von Herman Hupfeld
dankt der Verlag der Bienstock
Publishing Company o/b/o Redwood Music Ltd.

Gesamtherstellung: CPI books GmbH, Leck
Printed in Germany
ISBN 978-3-10-002536-4

Inhalt

	Einleitung	7
TEIL I	Verblüffende Zeit	15
KAPITEL 1	Das verschränkte Rätsel	17
KAPITEL 2	Einstiens Regression in die Kindheit	29
KAPITEL 3	Das springende <i>Jetzt</i>	46
KAPITEL 4	Widersprüche und Paradoxa	68
KAPITEL 5	Grenze Lichtgeschwindigkeit, Schlupfloch Lichtgeschwindigkeit	81
KAPITEL 6	Imaginäre Zeit	92
KAPITEL 7	Bis zur Unendlichkeit und noch viel weiter	112
TEIL II	Ein gebrochener Pfeil	127
KAPITEL 8	Ein Pfeil der Verwirrung	129
KAPITEL 9	Die Entmystifizierung der Entropie	136
KAPITEL 10	Die Mystifizierung der Entropie	147
KAPITEL 11	Die Zeit wird erklärt	162
KAPITEL 12	Unser unwahrscheinliches Universum	170
KAPITEL 13	Das Universum bricht aus	185
KAPITEL 14	Das Ende der Zeit	205
KAPITEL 15	Die Entropie kommt unter die Räder	219
KAPITEL 16	Der Zeitpfeil: Alternativen	237
TEIL III	Gespenstische Physik	261
KAPITEL 17	Eine Katze, tot und lebendig	263
KAPITEL 18	Das Quantengespenst wird gekitzelt	276

KAPITEL 19	Einstein bekommt Angst	294
KAPITEL 20	Die Rückwärts-Zeitreise wird beobachtet	315
TEIL IV	Physik und Realität	345
KAPITEL 21	Über die Physik hinaus	347
KAPITEL 22	Cogito ergo sum	363
KAPITEL 23	Freier Wille	376
TEIL V	Jetzt	395
KAPITEL 24	Der 4-D-Urknall	397
KAPITEL 25	Die Bedeutung des <i>Jetzt</i>	415
ANHANG 1	Die Mathematik der Relativität	421
ANHANG 2	Zeit und Energie	439
ANHANG 3	Der Beweis, dass $\sqrt{2}$ eine irrationale Zahl ist	445
ANHANG 4	Die Schöpfung	447
ANHANG 5	Die Mathematik der Unschärfe	450
ANHANG 6	Physik und Gott	453
	Danksagungen	458
	Abbildungsnachweise	459
	Register	461

Einleitung

Jetzt – jener rätselhafte, flüchtige Zeitpunkt, der seine Bedeutung in jedem Augenblick ändert – verwirrt seit jeher Priester, Philosophen und Physiker, und das aus gutem Grund. Um das *Jetzt* zu verstehen, braucht man Kenntnisse über Relativitätstheorie, Entropie, Quantenphysik, Antimaterie, Zeitreisen in die Vergangenheit, Verschränkung, den Urknall und dunkle Energie. Erst *jetzt* verfügen wir über alle physikalischen Kenntnisse, um das *Jetzt* zu verstehen.

Die schwer fassbare Bedeutung von *Jetzt* war ein Stolperstein für die Entwicklung der Physik. Wir verstehen die Zeitdehnung durch Geschwindigkeit und Gravitation und sogar die Umkehr der Zeit in der Relativitätstheorie, aber wir haben keine Fortschritte gemacht, wenn es darum geht, die verblüffendsten Aspekte der Zeit zu verstehen: ihr Fließen und die Bedeutung des *Jetzt*. Das grundlegende Zeichenbrett der Physik, Raum-Zeit-Diagramm genannt, geht über solche Fragen hinweg; Physiker halten dieses Fehlen unsinnigerweise manchmal für eine Stärke und gelangen zu dem Schluss, das Fließen der Zeit sei eine Illusion. Aber das ist rückständig. Solange wir die Bedeutung des *Jetzt* nicht dingfest machen können, werden weitere Fortschritte in der Erforschung der Zeit – jenes Schlüsselaspekts der Realität – weiterhin auf Hindernisse stoßen.

Mit diesem Buch verfolge ich das Ziel, die wesentlichen physikalischen Aspekte zusammenzusetzen wie Puzzlesteine, bis sich ein eindeutiges Bild des *Jetzt* herauskristallisiert.

Damit das klappt, müssen wir auch diejenigen Puzzlesteine finden und entfernen, die an den falschen Orten eingesetzt wurden.

Dass das Rätsel bisher so schwer zu lösen war, liegt daran, dass dazu ein breites Spektrum physikalischer Kenntnisse erforderlich ist. Physik ist weder einfach noch geradlinig, und deshalb behandelt dieses Buch eine ungeheure Menge von Themen – eigentlich vielleicht zu viele für einen einzigen Band. Man kann deshalb durchaus hin und her blättern und mit Hilfe des Registers wichtige Gedanken finden, die man vielleicht vermisst hat. Ebenso kann man sich meine Erzählung als eine Art Krimi vorstellen, in dem sich allmählich immer mehr Anhaltspunkte ergeben, bis sie schließlich zu einer bemerkenswerten Auflösung führen.

Mein Hintergrund ist vorwiegend die Experimentalphysik – die Konstruktion und Benutzung neuer Gerätschaften, mit denen man physikalische Tatsachen, die zuvor verborgen waren, vermessen oder gelegentlich auch neu entdecken kann. Zwei meiner Projekte standen in unmittelbarem Zusammenhang mit unseren Kenntnissen über die Zeit: eine Messung der Mikrowellentrümmer des Urknalls und eine genaue Vermessung der früheren Ausdehnung des Universums einschließlich der Entdeckung dunkler Energie, die diese Expansion beschleunigt. Ich muss zwar zugeben, dass ich auch einige rein theoretische Fachartikel geschrieben habe, das tat ich aber vor allem dann, wenn die Finanzmittel für Experimente knapp waren oder wenn die Theorie nach meiner Überzeugung vom richtigen Weg abgekommen war. So weit ich weiß, ist dies derzeit das einzige Buch, das gezielt von der Zeit handelt und von einem Physiker geschrieben wurde, der tief in der experimentellen Arbeit steckt; ich werde versuchen, einige Einblicke in die Herausforderungen und Frustrationen zu geben, mit denen solche Arbeiten verbunden sind.

Der Weg zum Verständnis des *Jetzt* besteht aus fünf Teilen. In Teil I mit der Überschrift *Verblüffende Zeit* erläutere ich zunächst einige handfest nachgewiesene und dennoch erstaunliche Aspekte der Zeit, die im Wesentlichen von Albert Einstein entdeckt wurden. Zeit kann sich nicht nur dehnen, biegen und umkehren, sondern solche Verhaltensweisen haben auch Einfluss auf unser tägliches Leben. Das Satellitensystem GPS, das dafür sorgt, dass wir uns nicht verirren, stützt sich in großem Umfang auf Einsteins Relativitätsgleichungen, die von diesen seltsamen Eigenschaften der Zeit handeln. Die Relativitätstheorie hat uns den Begriff der vierdimensionalen Raumzeit beschert. Die wichtigste Aussage von Teil I lautet: Wir wissen eine Menge über die Zeit, und ihr Verhalten ist nicht einfach, aber gut bekannt. Wie schnell sie läuft, hängt von den lokalen Bedingungen der Geschwindigkeit und Gravitation ab, und selbst die Reihenfolge von Ereignissen – die Frage, welches Ereignis sich zuerst abgespielt hat – ist keine allgemeingültige Wahrheit. Darüber hinaus liefert uns Einsteins Relativitätstheorie einen großen Teil des Gerüsts, das wir brauchen, um die Bedeutung des *Jetzt* zu verstehen.

Der Teil II trägt die Überschrift *Ein gebrochener Pfeil*. Hier entferne ich aus dem Puzzle ein Stück, das an die falsche Stelle gepresst wurde, eine Theorie, die den Fortschritt beim Verstehen des *Jetzt* mehr als jede andere behindert hat. Dieser falsch angebrachte Puzzlestein ist die Theorie des Physikers Arthur Eddington, die angeblich eine Erklärung für den Zeitpfeil liefert – für die Tatsache, dass die Vergangenheit über die Zukunft bestimmt und nicht andersherum. Um ihn aus dem Weg zu räumen, präsentiere ich zuerst die bestmögliche Argumentation, die seine Theorie unterstützt, und erst danach mache ich auf ihre tödlichen Schwächen aufmerksam.

Eddington führte das Fließen der Zeit auf die Zunahme der *Entropie* zurück, die ein Maß für die Unordnung im Univer-

sum darstellt. Heute wissen wir über die Entropie des Universums viel mehr als Eddington, der seine Theorie 1928 formulierte, und ich werde darlegen, dass er das Pferd von hinten aufzäumte. Das Fließen der Zeit verursacht die Zunahme der Entropie, nicht andersherum. Die Erzeugung von Entropie hat nicht die tyrannische Wirkung, die man ihr häufig zuschreibt. Wie sich herausstellt, ist die Kontrolle über die Wege der Entropie entscheidend für unser Verständnis des *Jetzt*.

Im Teil III, *Gespenstische Physik*, kommt ein weiteres wichtiges Element für das Verstehen des *Jetzt* hinzu: die geheimnisvolle Wissenschaft der Quantenphysik. Sie ist vielleicht die erfolgreichste Theorie aller Zeiten – Vorhersagen und Beobachtungen stimmen bis auf zehn Dezimalstellen überein –, und doch ist sie sowohl beunruhigend als auch besorgniserregend. Das gespenstische Verhalten der Quantenwellen und ihrer Messung verletzt in krasser Weise Einsteins Relativitätsprinzipien, allerdings nicht so, dass man es unmittelbar beobachten oder ausnutzen könnte. Das Verhalten der Quantenwelle stellt unser Realitätsempfinden in Frage und entwickelt es weiter – ein Empfinden, das sich als entscheidend erweisen wird, wenn wir Licht in das *Jetzt* bringen wollen. So ergibt sich aus der Quantenphysik unter Umständen die höchst beunruhigende – oder vielleicht auch befreiende – Folgerung, dass die Vergangenheit nicht mehr über die Zukunft bestimmt, oder jedenfalls nicht vollständig. Einige Aspekte der Quantenphysik, die der Intuition am stärksten widersprechen, insbesondere das seltsame Merkmal der *Verschränkung*, wurden experimentell bestätigt, und diese (überraschenden!) experimentellen Befunde legen die Vermutung nahe, dass die eingeschränkte Fähigkeit, die Zukunft vorherzusagen, für alle Zeiten eine grundlegende Schwäche der Physik bleiben wird.

In *Physik und Realität*, dem Teil IV, untersuche ich die Grenzen der Physik. Keine Sorge, die Zeit und das *Jetzt* ge-

hören nicht in diesen Bereich; sie haben ihren Ursprung in der Physik, aber wie wir sie wahrnehmen, hängt von unserem Gespür für die Realität ab, einem Gespür, das über die Physik hinausreicht. Die Mathematik bildet eine Welt der Realität ab, die sich nicht durch physikalische Experimente belegen lässt; das gilt sogar für etwas so Einfaches wie die Tatsache, dass die Quadratwurzel von 2 eine irrationale Zahl ist. Andere Themen dagegen sind real, gehören aber nicht in die Domäne für der Physik; dazu gehört zum Beispiel die Frage, wie die Farbe Blau eigentlich *aussieht*. Die Leugnung nichtphysikalischer und nichtmathematischer Wahrheiten wurde von Philosophen als *Physikalismus* bezeichnet. Der Physikalismus ist ein Glaube und hat alle Merkmale einer Religion. Leider führen die Indizien entgegen Einsteins glühender Hoffnung zu der Schlussfolgerung, dass die Physik unvollständig ist und nie in der Lage sein wird, die gesamte Realität zu beschreiben.

Im Teil V mit der Überschrift *Jetzt* werden die einzelnen Anhaltspunkte des Puzzles zusammengesetzt und zeigen in einem einheitlichen Bild, warum die Zeit fließt und welche Bedeutung der flüchtige Augenblick hat, den wir *Jetzt* nennen. Die Lösung liegt in einem Ansatz, der den Urknall vierdimensional betrachtet. Die Explosion des Universums schafft ständig nicht nur neuen Raum, sondern auch neue Zeit. Der vorderste, expandierende Rand der Zeit ist das, was wir als *Jetzt* bezeichnen, und der Fluss der Zeit ist die ständige Erschaffung von neuen *Jetzts*. Wir erleben den neuen Augenblick anders als den vorangegangenen, weil er der einzige ist, in dem wir Entscheidungen treffen und unseren freien Willen ausüben können, um damit die Zukunft zu beeinflussen und zu verändern. Allen Argumenten der klassischen Philosophen zum Trotz wissen wir heute, dass der freie Wille mit der Physik vereinbar ist; wer anders argumentiert, orientiert sich an der Religion des Physikalismus. Wir können die Zukunft

nicht nur mit wissenschaftlichen, sondern auch mit nichtwissenschaftlichen Kenntnissen wie Empathie, Tugend, Ethik, Fairness und Gerechtigkeit beeinflussen, um so den Fluss der Entropie zu lenken und eine Stärkung der Zivilisation – oder auch ihre Zerstörung – ins Werk zu setzen.

Drei mögliche Tests dieses vierdimensionalen Modells der fortschreitenden Zeit schaue ich mir näher an. Die beobachtete beschleunigte Expansion des Universums, die im Zusammenhang mit der *dunklen Energie* steht, sollte von einer Beschleunigung im Ablauf der Zeit begleitet sein. Diese Theorie sagt vorher, dass die Zeit derzeit schneller fließt als in der Vergangenheit, und das führt zur Vorhersage einer neuen und (möglicherweise) beobachtbaren Zeitdehnung, einer neuen Rotverschiebung. Effekte sind vielleicht auch bei der Untersuchung der ersten Augenblicke des Urknalls zu erkennen; diese Ära der *Inflation*, so die Hoffnung, kann man vielleicht eines Tages durch den Nachweis von Gravitationswellen erforschen, die damals ausgesandt wurden; solche Wellen können wir indirekt beobachten, indem wir das Polarisierungsmuster der Mikrowellenstrahlung studieren.

Der dritte Test wurde konzipiert, als das LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, Laser-Interferometer-Observatorium zur Beobachtung von Gravitationswellen) 2016 erstaunlicherweise zwei große, verschmelzende schwarze Löcher nachweisen konnte. Solche Ereignisse lassen neuen Raum entstehen, und nach der 4-D-Theorie entsteht dabei auch neue Zeit; diese sollte im späteren Teil des Pulses für eine Verzögerung sorgen, die man beobachten kann, wenn zukünftige Ereignisse größer oder näher sind und sich durch ein stärkeres Signal verraten.

Wer mehr über die mathematischen Grundlagen lesen will, findet Einzelheiten über die Relativitätstheorie und die mathematischen Befunde in mehreren Anhängen; darüber

Einleitung

hinaus stehen dort auch einige phantasievolle Gedichte und Gedanken über die nichtphysikalische Realität.

Machen wir uns also daran, das Puzzle zusammenzusetzen.