

Die Quantenmechanik – der Traum, aus dem die Stoffe sind (Teil 3)

Friedrich Wagner, März 2013 (September 2015)

www.frwagner.de

Wie wir im zweiten Teil dieses Aufsatzes gesehen haben, hat es in den letzten Jahrzehnten trotz intensivster Bemühungen nicht eine einzige Interpretation der Quantenmechanik geschafft, eine überzeugende Erklärung für die rätselhaften Phänomene zu finden, die im ersten Teil vorgestellt wurden. Tragen die subjektivistischen Ansätze, die für zentrale Fragen gar keine Erklärungen liefern, ja den Verzicht auf Erklärungen zum Programm erhoben haben, in dieser Debatte tatsächlich den Sieg davon? Das klägliche Scheitern der realistischen Alternativen scheint diesen Schluss nahe zu legen.

Tatsächlich gibt es aber noch ein Ansatz, der ihnen diesen Sieg streitig machen könnte. Er ermöglicht eine realistische Beschreibung unserer Welt und kann für viele, vielleicht sogar für alle Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik echte physikalische Erklärungen geben. Obwohl diese Interpretation schon in den 80er Jahren entstanden ist, fristet sie seitdem ein Schattendasein und wird in vielen Büchern zur Deutungsdebatte mit keiner Silbe erwähnt. Woran liegt das? Der Grund dafür ist schnell gefunden. Das Grundelement klingt so unglaublich, dass es vielen Physikern schlichtweg unseriös erscheint, sich damit auseinanderzusetzen: Die Interpretation erklärt quantenmechanische Korrelationen durch *Wellen, die in der Zeit zurücklaufen*.

In diesem dritten Teil werde ich versuchen, Sie zu überzeugen, dass dieser Ansatz, der den Namen „Transaktionsinterpretation“ trägt, längst nicht so verrückt ist, wie er im ersten Moment erscheint. Im Mittelpunkt steht dabei eine klärende Diskussion der Zeit selber, die zu einem überraschenden Ergebnis führen wird.

Sind Sie bereit für den letzten Teil der Reise in die wundersame Welt der Quantenmechanik?

Naheliegende Fragen

Die Transaktionsinterpretation wurde 1986 vom amerikanischen Physik-Professor John G. Cramer aufgestellt¹. Seine Kernthese ist die Annahme, dass die quantenmechanische Wellenfunktionen keine subjektive, sondern eine echte physikalische Welle beschreibt, die aber nicht nur Kausalwirkungen auf zukünftige Ereignisse, sondern auch auf Ereignisse in der Vergangenheit hat. Auf dieser Basis lassen sich viele quantenmechanische Phänomene erklären, insbesondere das ansonsten so schwer zu fassende Problem der Verschränkung.

Für einen solchen Ansatz drängen sich einige naheliegende Fragen auf:

1. Spiegeln neben unserer alltäglichen Erfahrung nicht auch sämtliche physikalische Theorien den Umstand wieder, dass Ursache-Wirkungs-Ketten ausnahmslos in Zukunftsrichtung stattfinden?
2. Sind Auswirkungen auf vergangene Ereignisse nicht bereits logisch unmöglich, da die Einordnung in vergangene und zukünftige Ereignisse genau dadurch definiert ist, dass die Zukunft durch aktuelle Ereignisse verändert werden kann, die wiederum aus Ereignissen aus der Vergangenheit beeinflusst wurden?
3. Ist meine Oma in Gefahr?

Der letzte Punkt spielt natürlich auf das oft zitierte Zeitreise-Paradoxon an: Wenn Auswirkungen auf die Vergangenheit möglich wären, könnte man in die Vergangenheit reisen (oder diese entsprechend beeinflussen) und seine eigene Oma töten, bevor sie die eigene Mutter geboren hat². Damit wäre man selber nie geboren worden, hätte also die Zeitreise gar nicht antreten können, ein offensichtlicher logischer Widerspruch.

Schaut man sich diese Fragen an, verwundert es nicht, dass die Annahme von Kausalwirkungen auf die Vergangenheit – auch wenn sie in noch so vielen Büchern und Science Fiction Filmen für unterhaltsame Wendungen sorgen – als ein vollkommen unseriöser Trick erscheinen muss, der keinen Platz in der Wissenschaft haben sollte.

Aber liegt der Fall tatsächlich so klar? Keineswegs. Es wird mir in diesem Aufsatz nicht gelingen, endgültige Antworten zu geben oder das uralte Rätsel der Zeit aufzulösen. Ich werde aber versuchen, Sie davon zu überzeugen, dass Kausalwirkungen in Vergangenheitsrichtung nicht prinzipiell unmöglich sind. Vielleicht gelingt es mir sogar, Ihnen einige positive Hinweise dafür plausibel zu machen, dass es solche Wirkungen tatsächlich gibt. Erst dann möchte ich auf die Transaktionsinterpretation zurückkommen.

Um dieses Ziel zu erreichen, möchte ich im folgenden Kapitel zunächst den Gedankengängen des australischen Philosophen Huw Price folgen. Sein Buch „Time's Arrow and Archimedes' Point“ von 1996 zeigt meiner Meinung nach in ganz hervorragender Weise, wie brüchig die scheinbar eindeutige Richtung des Zeitpfeils von der Vergangenheit in die Zukunft ist. Auf dieser Basis wird jede einzelne der oben aufgestellten Fragen eine Antwort erfahren. Das zweite Kapitel stellt dann die Interpretation von John Cramer vor, die in dem Buch „Schrödingers Kätzchen und die Suche nach der Wirklichkeit“ von John Gribbin von 1998 und in zwei aktuellen Büchern von Ruth Kastner besonders gut erklärt wird.

¹ „The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics“, Cramer, J., Reviews of Modern Physics 58 (1986). Diesen Text sowie weitere Publikationen des Autors findet man auch unter www.npl.washington.edu/npl/int_rep/tiqm/TI_toc.html.

² Warum sich dieses Paradoxon um die Oma des Zeitreisenden dreht und nicht um dessen Mutter oder ihn selber, wird wohl ein ewiges Rätsel der Wissenschaftsgeschichte bleiben.

Die Sicht von Nirgendwann

Huw Price formuliert in seinem Buch zunächst den folgenden Ausgangspunkt, für den er einige Plausibilitätsargumente bringt, den er aber nicht zu beweisen versucht: Die Raumzeit liegt als vierdimensionales Blockuniversum vor, in dem Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gleichermaßen real sind. Die Auszeichnung der Gegenwart und der scheinbare Fluss der Zeit sind Artefakte unserer Perspektive, wie wir als Menschen die Welt wahrnehmen. Vom amerikanischen Schriftsteller Thornton Wilder gibt es ein Zitat, das dieses Bild perfekt trifft:

Nur dem Anschein nach ist die Zeit ein Fluss. Sie ist eher eine grenzenlose Landschaft, und was sich bewegt, ist das Auge des Betrachters.

Dies ist natürlich zunächst einmal höchst unintuitiv. Wie kann die Vergangenheit real sein, wenn sie für uns unveränderlich vergangen ist und wie kann es die Zukunft sein, die noch gar nicht feststeht? Aus philosophischer Sicht ist dieser Standpunkt aber sehr attraktiv. So vermeidet er zum Beispiel die Schwierigkeiten, die bei der Definition einer objektiven Richtung eines „Flusses“ der Zeit auftreten, und er ist mit der vierdimensionalen Raumzeitbeschreibung der Relativitätstheorie kompatibel. Tatsächlich wird er von dieser Theorie sogar sehr nahegelegt, denn die ohnehin schon verwegene Vorstellung, dass nur die Welt in der gerade jetzt stattfindenden Nanosekunde zwischen Vergangenheit und Zukunft einen Realitätsstatus beanspruchen darf, wird durch die Relativität der Gleichzeitigkeit praktisch ad absurdum geführt. Mit welcher Berechtigung kann jemand die Realität auf seinen augenblicklichen Moment der Gegenwart beschränken, wenn es vom Standpunkt eines anderen Betrachters abhängt (genauer gesagt von seinem Bewegungszustand), welche Ereignisse ihm als gleichzeitig erscheinen? Versuchen Sie gerne einmal in Gedanken, eine Antwort auf diese Frage zu finden, bevor Sie fortfahren³.

Für physikalische Fragestellungen, die die Asymmetrie der Zeit betreffen, ergibt sich daher für Huw Price die Notwendigkeit eines Standpunktes „außerhalb“ der Zeit, einem Archimedischen Punkt „von nirgendwann“⁴. Aus dieser Sicht lassen sich in der gegenwärtigen Physik immer wieder auftretende Standardfehler entlarven:

- Die zeitliche Asymmetrie unserer Perspektive wird in die objektive Realität projiziert und so fälschlicherweise für allgemeingültig gehalten.
- Eine Zeitasymmetrie wird durch die Anwendung einer physikalischen Theorie in Zukunfts-, aber nicht in Vergangenheitsrichtung zu begründen versucht. Dabei wird die zu erklärende Zeitasymmetrie aber bereits vorausgesetzt.

Durch die Ausräumung solcher Fehler ergibt sich eine interessante Neubewertung der Zeitasymmetrien in verschiedenen physikalischen Bereichen. Die folgenden Abschnitte zeigen, wohin diese Analyse führt.

³ Sehr überzeugende Argumente für diese Ansicht findet man auch in [Brandon 2013] und (unabhängig davon!) in der Tatsache, dass alle derzeitigen Ansätze für eine einheitliche Quantengravitationstheorie (einschließlich Strings und Quantum Loops) auf eine vollständige Eliminierung des Zeitparameters hinauslaufen.

⁴ Archimedes wird die Aussage zugeschrieben, er könne ganz alleine die Erde anheben, wenn er nur einen festen Punkt und einen ausreichend langen Hebel hätte. Als Archimedischen Punkt bezeichnet man auch eine unbezweifelbare Wahrheit, von der aus man die Welt zu erklären versucht.

Die Zeitasymmetrie in der Physik

Eine wichtige Beobachtung ist zunächst, dass *keine* der grundlegenden physikalischen Theorien wie der Newton'schen Mechanik, der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie oder der Quantenmechanik eine explizite zeitliche Asymmetrie enthalten! Die zeitlichen Entwicklungsgleichungen dieser Theorien können vollkommen gleichberechtigt in Zukunfts- und Vergangenheitsrichtung angewandt werden⁵. Eine Ausnahme dieser Regel ist allerdings die Thermodynamik, daher soll die Suche nach dem Zeitpfeil dort beginnen.

Ein bekanntes Phänomen ist die Zunahme der Entropie in Zukunftsrichtung. Man denke nur an Milch, die sich mit Kaffee mischt, an die Ausbreitung einer Duftwolke oder an den Ordnungszustand eines Kinderzimmers, dessen Zerfall zum chaotischen Zustand gleichverteilter Spielzeuge nur durch regelmäßige Aufräumaktionen gebremst werden kann (glauben Sie mir, ich weiß, wovon ich rede). Aber wie ist dieses alltäglich erfahrbare Prinzip physikalisch begründet? Die Thermodynamik als phänomenologische Theorie beschreibt diese Prinzipien lediglich, ohne eine zugrunde liegende Erklärung anbieten zu können.

Eine wichtige Feststellung ist zunächst einmal, dass der hohe Entropiezustand in der Zukunft gar nicht erklärungsbedürftig ist. Er stellt nämlich definitionsgemäß den wahrscheinlichsten Zustand dar. Würde man z.B. den Ort der Milch- und Kaffeeteilchen durch eine reine Zufallsverteilung festlegen, wäre ein gleichmäßig durchmischter Zustand sehr viel wahrscheinlicher als die Konzentration der Milchteilchen an einer Stelle. Für diesen „Milchklecks im Kaffee“ Makrozustand gibt es nämlich viel weniger mögliche Mikrozustände (genaue Konstellation aller beteiligten Moleküle) als für den durchmischten Kaffee. Die Anzahl der zu einem Makrozustand kompatibler Mikrozustände ist auch genau der mathematische Kern der Entropiegröße. Kein Wunder also, dass sich nach einiger Zeit von ganz alleine der „natürliche“, d.h. wahrscheinlichere Zustand einstellt.

Erklärungsbedürftig ist hingegen der niedrige Entropiezustand in der Vergangenheit. Das Verhältnis von Makro- zu Mikrozuständen ist eine zeitpunktunabhängige Systemeigenschaft, daher wäre es auch für einen vorherigen Zustand am wahrscheinlichsten, wenn dieses Verhältnis sehr hoch war, d.h. wenn ein gleichmäßig durchmischtes System vorlag. Wir wissen natürlich aus unserer täglichen Erfahrung, dass das nicht der Fall ist, aber woran liegt das? Wie kann ganz konkret die kinetische Gastheorie als mikroskopische Basis der Thermodynamik diese Vorgänge nachbilden?

Der bekannteste historische Erklärungsversuch ist das sogenannte H-Theorem von Ludwig Boltzmann. Es beschreibt eine irreversible Zunahme der Entropie auf Basis einer zeitlich reversiblen Mikrophysik. Da dieses Theorem aber in Zukunfts- *und* Vergangenheitsrichtung angewandt werden kann, sofern nicht schon eine Zeitasymmetrie vorausgesetzt werden soll, kann es keine Erklärung der Zeitasymmetrie liefern⁶. Das gilt auch für andere dynamische Theorien wie die nichtlinearen Chaos-Theorien. Die Zeitasymmetrie der Thermodynamik, d.h.

⁵ Tatsächlich gibt es mit der sogenannten CP-Verletzung bei der schwachen Wechselwirkung (auch schwache Kernkraft genannt) einen physikalischen Prozess, der nicht zeitsymmetrisch ist. Da diese Art der Wechselwirkung aber eine sehr geringe Reichweite hat und auf Prozesse innerhalb des Atomkerns beschränkt ist, wird ihr für die Erklärung des makroskopischen Zeitpfeils keine Bedeutung zugemessen.

⁶ Auch die Argumentation Boltzmanns, dass wir uns in einer kosmologischen Epoche mit einer zufällig entstandenen niedrigen Entropievergangenheit und somit wachsender Entropie befinden, weil wir nur unter solchen Zuständen existieren können, ist nicht stichhaltig. Definitionsgemäß wäre es nämlich viel „billiger“, d.h. wahrscheinlicher, unseren gegenwärtigen Zustand direkt als Zufallsprodukt entstehen zu lassen. Außerdem beobachten wir das Entropiewachstum auch in räumlichen und zeitlichen Regionen, die für die Bedingungen unserer Existenz irrelevant sind, z.B. in anderen Galaxien.

der makroskopische Zeitpfeil, lässt sich somit nicht aus den Eigenschaften der Gesetze der Mikrophysik ableiten. Im Grunde ist das gar nicht überraschend, denn es käme einem Zaubertrick gleich, aus zeitlich reversiblen Gesetzen eine zeitliche Vorzugsrichtung abzuleiten.

Woher stammt aber der niedrige Entropiezustand in der Vergangenheit? Jedes konkrete Beispiel lässt sich stets durch anderen Prozess außerhalb des betrachteten Systems begründen, z.B. mag der Milchlecks in dem Kaffee durch eine äußere Einwirkung eines Menschen entstanden sein, dessen Energie aus Nahrung stammt, die wiederum auf die Photosynthese und damit auf die Energie der Sonne zurückgeht. Aber woher stammt der niedrige Entropiezustand, der vor gut 4 Milliarden Jahren das Sonnenfeuer entfachte? Spielt man diesen Gedankengang weiter, landet man unwillkürlich bei der Feststellung, dass es der Anfangs-/Frühzustand unseres Universums gewesen sein muss, der durch seinen niedrigen Entropiegehalt all diese Prozesse in Gang gesetzt hat. Tatsächlich zeigen die kosmologischen Modelle und astronomischen Beobachtungen (insbesondere die Isotropie der kosmologischen Hintergrundstrahlung) ja auch, dass der Frühzustand unsers Universum sehr homogen war, was in einem vorwiegend gravitativem System einem sehr geordneten und somit unwahrscheinlichen Zustand entspricht. Die Frage, wie es zu diesem Zustand kommen konnte, stellt dabei ein bis heute ungelöstes Problem der Kosmologie dar. Vielleicht können die aktuellen Theorien des inflationären Universums eine Antwort darauf geben, aber das ist eine ganz eigene Thematik, die den Rahmen dieses Aufsatzes bei weitem sprengen würde.

Halten wir die Gedanken dieses Abschnitts kurz fest. Wir sind mit einem alltäglichen Phänomen gestartet und wurden mit einem kosmologischen Rätsel zurückgelassen. Das mag nicht besonders befriedigend sein. Für das Thema dieses Aufsatzes ist aber die Feststellung wichtig, dass die Zeitasymmetrie, wie sie die Thermodynamik über die Zunahme der Entropie beschreibt, ein rein makroskopisches Phänomen ist, das sich nicht in den grundlegenden physikalischen Wirkungsprinzipien wiederfindet. Auch die kinetische Gastheorie bildet somit keine Ausnahme – sämtliche physikalischen Entwicklungsgleichungen von der klassischen Mechanik bis zur Relativitätstheorie und Quantenmechanik sind zeitlich vollkommen symmetrisch. Dies ist die Antwort auf die erste Frage des Einleitungskapitels.

Basierend auf diesem Zwischenergebnis soll nun die Frage untersucht werden, ob Kausalwirkungen in Vergangenheitsrichtung grundsätzlich möglich sind. Aber was bedeutet der Begriff der Kausalität überhaupt?

Die Möglichkeit einer Rückwärts-Kausalität

Unter Kausalität versteht man eine Beziehung zwischen Ursachen und daraus abgeleiteten Wirkungen. Die zeitliche Asymmetrie der Kausalität besteht in dem Grundsatz, dass Wirkungen (Effekte) immer *nach* ihren Ursachen auftreten, aber niemals davor. Wer hätte jemals etwas anderes erlebt!? So naheliegend dieses Prinzip auch ist, so schwer ist es, es physikalisch zu untermauern. Die populärste Sichtweise ist die Annahme eines zeitasymmetrischen physikalischen Prozesses, auf den sich die Kausalität dann per Definition beziehen kann. Wie der vorherige Abschnitt gezeigt, ist aber alles andere als einfach, einen solchen Prozess zu finden, da sämtliche relevanten Gesetze der Mikrophysik zeitreversibel sind. Wie lässt sich also dieses Dilemma auflösen?

Es gibt eine ganze Reihe von philosophischen Ansätzen zur Konkretisierung des Kausalitätsbegriffs, von denen aber keiner unumstritten ist. Der konventionalistische Standpunkt führt die Kausalität zum Beispiel auf reine Konvention zurückführt und behauptet somit die Nichtexistenz von „Ursachen“ und „Wirkungen“. Dies ist aber eine sehr extreme und

logisch schwache Sichtweise, die auch nicht die *scheinbare* Objektivität der Kausalität erklären kann.

Huw Price plädiert in seinem Buch zu dem Ansatz des „perspektivischen Konventionalismus“: Die Kausalität beruht auf Konvention, aber diese ist nicht beliebig. Die Kausalität ist eine Projektion einer Asymmetrie *unserer menschlichen Perspektive*. Dadurch erhält die Kausalität, insbesondere die von uns Menschen erfahrbare, wieder einen gewissen Grad an Objektivität, ohne in Widerspruch zu den Gesetzen der Mikrophysik zu geraten. Die Basis für diese Sicht bietet unsere zeitliche Asymmetrie als „Agenten“ in der Welt, da wir uns an die Vergangenheit erinnern können und die Zukunft für uns offen ist. Dieser makroskopische Zeitpfeil wäre dann der Grund dafür, dass uns sämtliche kausalen Vorgänge zeitlich asymmetrisch *erscheinen*.

Vor diesem Hintergrund wäre eine Rückwärts-Kausalität nicht von vorneherein ausgeschlossen. Sie wäre nicht einfach eine umgekehrte Vorwärts-Kausalität, sondern würde einer objektiven Struktur der Welt entsprechen, die es zulässt, dass in unserer zeitlichen Perspektive Kausalbeziehungen sowohl in Zukunfts-, als auch in Vergangenheitsrichtung existieren.

Dieser Ansatz ist die Antwort von Huw Price auf die zweite Frage des Einleitungskapitels: Wirkungen in Vergangenheitsrichtung sind weder logisch inkonsistent noch stellen sie ein tautologisches Wortspiel ohne objektiven Gehalt dar. Sie sind somit nicht *per se* ausgeschlossen.

Wie steht es nun schließlich um das Problem des Zeitreisenden?

Vermeidung des Zeitreise-Paradoxons

Das bereits angesprochene Zeitreise-Paradoxon veranschaulicht, dass es Kausalbeziehungen in Vergangenheitsrichtung gibt, die zu logischen Inkonsistenzen führen und daher nicht möglich sind. Hieraus kann aber nicht die Unmöglichkeit *aller* derartiger Kausalbeziehungen abgeleitet werden. Die Probleme entstehen erst dann, wenn ein Ereignis der Vergangenheit beeinflusst wird, das uns bereits bekannt ist. Wenn die Kausalbeziehungen aber dergestalt sind, dass ihre Wirkungen in der Vergangenheit für uns unzugänglich sind, löst sich der Widerspruch auf. Das mag wie ein Taschenspielertrick erscheinen, ist aber eine Antwort auf die Frage, ob das Zeitreise-Paradoxon einen generellen Beweis für die Unmöglichkeit von Kausalbeziehungen in Vergangenheitsrichtung darstellt. Ein logischer Widerspruch würde sich nur aus der empirisch nicht zu rechtfertigenden Annahme ergeben, dass im Prinzip die gesamte Vergangenheit für uns zugänglich, d.h. wissbar ist.

Hieraus folgt aber auch, dass die Rückwärts-Kausalität nicht direkt empirisch falsifizierbar oder verifizierbar ist. Selbst wenn es sie gibt, kann nur der Teil der Vergangenheit von unseren jetzigen Aktionen beeinflusst werden, der uns unbekannt ist. Die Belege für die Existenz solcher Wirkungen können daher nur indirekter Natur in Form größerer konzeptueller Einfachheit und Eleganz sein. Und tatsächlich: Wie selbst vielen Physikern unbekannt ist (zumindest mir erging es so), gibt es bereits eine etablierte physikalische Theorie, die sich auf genau diese Konzepte stützt.

Überraschungen in der Theorie des Lichts und der Materie

Die in den 40er Jahren von Richard Feynman, Julian Schwinger und Shinichiro Tomonaga entwickelte Quantenelektrodynamik (kurz QED) stellt einen theoretischen Rahmen für die Beschreibung von Photonen und geladenen Punktteilchen wie z.B. Elektronen dar. Sie erweitert dazu die Elektrodynamik, die als Grenzfall in ihr enthalten ist, auf die Gesetze der Quantenmechanik. Die QED wurde 1965 mit dem Physik-Nobelpreis gewürdigt und darf sich rühmen, einer der am genauesten experimentell überprüften Theorien der Physik zu sein⁷. Ihr Anwendungsbereich ist nahezu universell und umfasst dank der vollständigen Beschreibung der Atomhüllen auch den kompletten Bereich der Chemie, der wiederum die Basis der Biologie bildet. Damit ist sie eine der bedeutendsten und erfolgreichsten Theorien der Physik.

Ein besonderer Aspekt dieser Theorie wird aber gerne außer Acht gelassen. Er klingt einfach zu unsinnig, um ernst genommen zu werden. Es geht dabei – Sie ahnen es schon – um die Rolle der Zeit. Eine besondere Rolle spielt dabei ein Elementarteilchen, nämlich das Positron.

Ein Positron ist das sogenannte Antiteilchen zum Elektron: Es hat die gleichen physikalischen Eigenschaften, aber genau die umgekehrte Ladung, d.h. es ist positiv geladen. Dieses Teilchen kann künstlich erzeugt werden, aber auch in der kosmischen Strahlung nachgewiesen werden, die tagtäglich auf die Erde trifft. Begegnet ein solches Teilchen seinem Antiteilchen, zerstören sich beide gegenseitig und erzeugen ein hochenergetisches Photon. Gemäß der QED kann aber auch das Photon selber in ein Positron-Elektron-Paar zerfallen, dessen Bestandteile in verschiedene Richtungen auseinanderfliegen, bis sie wieder auf ihr Antiteilchen treffen und der Prozess von vorne beginnt. Richard Feynman, wahrscheinlich der bedeutendste Physiker der zweiten Jahrhunderthälfte, erkannte nun, dass sich dieser Vorgang viel einfacher beschreiben lässt, wenn man das Positron als ein Elektron betrachtet, das sich *rückwärts in der Zeit bewegt*. In dieser Perspektive wird das Elektron an einem Photon zeitlich gespiegelt, so dass es sich – als „Positron“ – zeitlich rückwärts bewegt, bis es wieder auf ein Photon trifft, das es wieder in die Zukunft schickt. Diese Betrachtungsweise kommt mit nur zwei statt drei Elementarteilchen aus und führt zu den exakt gleichen experimentell überprüfbareren Vorhersagen.

Dieses Ergebnis lohnt sich festgehalten zu werden. Die Annahme zeitlich rückwärts laufender Wirkungen ist nicht nur konsistent mit den experimentellen Ergebnissen, sondern vereinfacht sogar die physikalische Beschreibung von Elektron-Photon-Wechselwirkungen.

Aber das ist noch nicht alles. Ein anderes Grundkonzept dieser Theorie ist die Idee, dass sich ein Teilchen oder auch Licht nicht einfach auf einer geraden Linie von Position A nach Position B bewegt, sondern dass *alle* Bahnen durchlaufen werden, die in A beginnen und in B enden, seien sie auch noch so krumm und verwinkelt. Damit ist wohlgerne nicht gemeint, dass diese Bahnen durchlaufen werden *könnten*, sondern dass sie *tatsächlich* durchlaufen werden. Wenn wir an die Doppelspaltexperimente denken, bei denen das Elektron scheinbar beide Spalte durchquert, um dahinter ein Interferenzmuster zu erzeugen, klingt dieser Gedanke nicht ganz so verrückt wie auf den ersten Blick. Für jeden dieser Pfade lässt sich nun eine Wahrscheinlichkeit angeben, deren Summation zu dem Ergebnis führt, dass sich fast alle diese Pfade gegenseitig auslöschen, d.h. kompensieren. Als beobachtbares Ergebnis bleibt dann – je nach betrachtetem System und äußeren Einflüssen – eine Bahn nahe der geraden Linie zwischen A und B übrig, was ja auch den experimentellen Tatsachen und im Falle des

⁷ Die QED liefert z.B. für eine bestimmte Eigenschaft eines Elektrons, den gyromagnetischen Faktor, einen Wert von $2,0023193048 \pm 8$. Der gemessene Wert (der kurioserweise noch genauer zu ermitteln ist) beträgt $2,002319304365 \pm 5$.

Lichts unser alltäglichen Erfahrung entspricht. Dies ist der allen Physikern bekannte Teil der QED. Feynman stellte sich aber nun die Frage, ob auch zeitlich rückwärts laufende Wirkungen eine mögliche Art der Wechselwirkung darstellen. Speziell ging es dabei um einlaufende, sogenannte „avancierte“ Wellen, die wie von Geisterhand gesteuert von allen Seiten gleichzeitig auf einen Punkt in der Mitte zusammenlaufen. Sie stellen die zeitumgekehrte Version der auslaufenden, sogenannten „retardierten“ Wellen dar, wie sie uns täglich z.B. als Radio- oder Wasserwellen begegnen. Tatsächlich fand er heraus, dass sich die Wirkungen von avancierten und retardierten Wellen gerade so kompensieren, dass sie in der Gesamtbetrachtung genau den beobachtbaren Phänomenen entsprechen. Präziser formuliert ergab Feynman's Analyse, dass sie sich *nahezu* vollständig kompensieren. Der Unterschied führt zu einem erhöhten Widerstand, den Elektronen ihrer Beschleunigung entgegensetzen und der tatsächlich messbar ist. Bis zum heutigen Tag gibt es keine überzeugende alternative Erklärung für diesen erhöhten Widerstandswert.

Die Welt aus Sicht eines Photons

Ein letzter Gedanke zu diesem Thema soll noch erlaubt sein. Nach der Relativitätstheorie vergeht die Eigenzeit eines Beobachters um so langsamer, je schneller er sich bewegt. Bei einer Geschwindigkeit knapp unter der Lichtgeschwindigkeit vergehen für einen solchen Beobachter daher nur Bruchteile von Sekunden, während in der Welt um ihn herum Jahre vergehen. Wie könnte demnach die Welt aus Sicht eines Photons aussehen, das sich mit Lichtgeschwindigkeit durch das Universum bewegt? Es würde seine gesamte Geschichte vom Moment der Erzeugung vom Punkt A bis zu seiner Vernichtung am Punkt B als einen einzigen Augenblick erleben, in dem es keine Vergangenheit oder Zukunft gibt. Für das Photon gibt es daher nicht den geringsten Unterschied, ob es von A nach B oder von B nach A läuft, selbst wenn A das Licht einer fernen Galaxis und B das Auge eines menschlichen Beobachters sein sollte. Es lohnt sich, diesen Gedanken einmal auf sich wirken zu lassen.

Ein Zwischenfazit

Die bisherigen Überlegungen zur Rückwärts-Kausalität lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Sie erscheint lediglich in unserer zeitasymmetrischen Perspektive unintuitiv.
- Sie ist sinnvoll definierbar und logisch konsistent.
- Sie steht in Einklang mit unseren empirischen Erfahrungen.
- Sie ist kompatibel zur Zeitsymmetrie der grundlegenden physikalischen Theorien.
- Sie ist ein wichtiger Bestandteil der Theorie der Quantenelektrodynamik.

Dieses Konzept führt allerdings auf keine Phänomene, die nicht durch eine alternative Theorie erklärbar wären. Ihre Begründung kann allein an der konzeptuellen Einfachheit und Eleganz bei der physikalischen Beschreibung unserer Welt festgemacht werden. Dieses Versprechen, das bei der Theorie der Quantenelektrodynamik schon zum Vorschein kam, wird von der Rückwärts-Kausalität bei der Interpretation der Quantenmechanik aber tatsächlich eingelöst. Somit lässt sich noch eine weitere Eigenschaft hinzufügen:

- Sie ermöglicht eine realistische Interpretation der Quantenmechanik, in der viele quantenmechanische Phänomene eine natürliche Erklärung finden.

Wie dieses kleine Wunder geschieht (wir erinnern uns an die vielen erfolglosen Versuche im zweiten Teil dieses Aufsatzes), zeigt das folgende Kapitel.

Die Transaktionsinterpretation der Quantenmechanik

Wir sind nun endlich bei der Vorstellung der letzten noch fehlenden Interpretation der Quantenmechanik angelangt. Wie schon erwähnt wurde dieser Ansatz schon vor mehr als 25 Jahren erdacht, seitdem führt er aber ein unverdientes Schattendasein. Vorhang auf für eine spannende neue Perspektive in dieser Debatte!

Grundgedanke und Formalismus

Die zentrale Idee von John Cramer's Neuinterpretation der Quantenmechanik lässt sich in einem einzigen Satz zusammenfassen: Die quantenmechanische Wellenfunktion Ψ beschreibt eine reale physikalische Welle, die den Entwicklungsgleichungen der speziell-relativistischen Quantenmechanik gehorcht und sich nicht nur in Zukunfts- sondern auch in Vergangenheitsrichtung ausbreitet. Das ist der Kern der Transaktionsinterpretation, der Rest sind Details.

Neben dem bereits ausführlich behandelten Aspekt, ob eine solche Rückwärts-Kausalität überhaupt möglich sein kann, stellt sich bei einem solchen Ansatz natürlich die Frage nach der exakten physikalischen Basis, d.h. nach einem mathematischen Formalismus, der in Einklang mit den experimentell ermittelten Fakten steht. Fast alle neuen Ideen, die Grundkonzepte der Physik umzudeuten, scheitern in diesem Punkt. Wie besteht die Transaktionsinterpretation diesen Test?

Kurz gesagt, sie besteht ihn mit Bravour. Diese Interpretation basiert auf dem gleichen Formalismus der Theorie der Quantenmechanik, der in so fantastischer Weise die Messergebnisse der unzähligen in den letzten Jahrzehnten durchgeführten Experimenten beschreibt und vorhersagt. Dieser unglaubliche empirische Erfolg der Quantenmechanik spiegelt sich mittlerweile auch in unserem alltäglichen Leben in Form von Computerchips, Lasern und vielen anderen technologischen Geräten wieder, und auch die vollkommen neuartigen Anwendungen wie Quantencomputer oder die Quantenkryptografie rücken immer mehr ins Licht der Öffentlichkeit.

Tatsächlich passt Cramer's Interpretation sogar *besser* zur Mathematik der Quantenmechanik als die herkömmliche Sichtweise. Schaut man sich den Formalismus genau an, lässt es sich nämlich gar nicht vermeiden, zwei genau entgegengesetzte Spielarten der Wellenfunktion Ψ zu betrachten, um eine Verbindung zu den experimentellen Resultaten zu schaffen. Wie in jedem Physikstudium gelehrt wird und im ersten Teil dieses Aufsatzes bereits erwähnt wurde, gehorcht die Wellenfunktion Ψ zwar der Zeitentwicklung der Schrödingergleichung, ist aber für sich genommen gar nicht experimentell beobachtbar. Das lässt sich schon daran festmachen, dass sie eine komplexe Zahl darstellt. Erst nach ihrer Multiplikation mit der sogenannten „konjugierten“ Wellenfunktion $\bar{\Psi}$ erhält man eine experimentell überprüfbare Zahl, nämlich die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein System in einem bestimmten Zustand befindet. Die konjugierte Wellenfunktion $\bar{\Psi}$ erfüllt dabei genauso wie Ψ die quantenmechanischen Gleichungen und stellt daher eine gleichberechtigte Lösungsmenge dar. Es lohnt sich daher, diese Wellenfunktion $\bar{\Psi}$ etwas genauer anzuschauen.

Mathematisch erhält man die Konjugierte einer komplexen Zahl, die sich aus Real- und Imaginärteil zusammensetzt, durch Vorzeichenumkehr des Imaginärteils, was in der zweidimensionalen komplexen Ebene einer spiegelbildlichen Umkehr bezüglich der realen Achse entspricht. Welche physikalische Bedeutung könnte diese Konjugationsbeziehung im Rahmen der Quantenmechanik haben? Schon 1926 wies Max Born, auf den die

Wahrscheinlichkeitsabbildung der Quantenmechanik zurückgeht, auf die mögliche Interpretation dieser Größe $\bar{\Psi}$ als zeitumgekehrte Variante der Wellenfunktion Ψ hin. Weil dieser Gedanke aber zu verrückt erschien, wurde in den darauffolgenden Jahrzehnten nur die Wellenfunktion Ψ als physikalische Größe ernst genommen. An dieser Sicht hat sich bis heute nichts geändert, obwohl jede empirische Anwendung der Quantenmechanik auf dieser Multiplikation der Wellenfunktion mit ihrer konjugierten Wellenfunktion beruht.

Es lässt sich somit festhalten, dass die Transaktionsinterpretation nicht nur kompatibel zum mathematischen Formalismus der Quantenmechanik ist, sondern im Gegensatz zur herkömmlichen Sichtweise sogar ein absolut zentrales Element dieser Theorie widerspiegelt. Aber gibt es auch ein anschauliches Bild für die Grundprinzipien dieser Interpretation? Der folgende Abschnitt gibt den Versuch von John Cramer für dieses Unterfangen wieder. Hierfür möchte ich aber eine Warnung aussprechen. Wie bei allen Veranschaulichungen von physikalischen Theorien sollte man sich bewusst sein, dass die dargebotenen Bilder keinen Anspruch auf eine direkte Beschreibung der realen Vorgänge erheben. Sie können lediglich eine Idee der Grundprinzipien einer im Grunde abstrakten Theorie liefern, die in der Sprache der Mathematik formuliert wurde.

Das physikalische Grundprinzip

Der Kern der Transaktionsinterpretation lässt sich an der Wechselwirkung zweier geladener Teilchen wie z.B. Elektronen illustrieren. Gerät ein Elektron in Schwingung, kann es in der herkömmlichen Sichtweise ein Photon emittieren, das sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt und irgendwann von einem anderen Elektron absorbiert wird. In Cramer's Interpretation emittiert das Elektron dagegen zunächst zwei Arten von „Angebotswellen“ (der Grund für diesen Namen wird gleich klar werden), nämlich retardierte Wellen in Zukunftsrichtung mit positiver Energie und avancierte Wellen in Vergangenheitsrichtung mit negativer Energie und das vollkommen symmetrisch. Beide Wellen breiten sich dabei mit Lichtgeschwindigkeit aus. Betrachten wir hierbei zunächst die retardierten Wellen, so werden sie irgendwann das andere Elektron erreichen. Anstatt dort einfach absorbiert zu werden, regen sie dieses Elektron zum Aussenden von retardierten „Bestätigungswellen“ an, die sich in Überlagerung mit den retardierten Angebotswellen des ersten Elektron gegenseitig auslöschen, d.h. in Summe bleiben von den beiden Elektronen keine Wellen in Zukunftsrichtung über. Auf der Verbindungslinie zwischen den beiden Elektronen läuft zusätzlich ein avanciertes Bestätigungssignal in Vergangenheitsrichtung zurück, das auf das erste Elektron trifft und dort den gleichen oder genauer gesagt spiegelbildlichen Prozess auslöst: Das erste Elektron wird zur Aussendung avancierter Wellen angeregt, die sich mit dem ursprünglichen Feld der avancierten Wellen des ersten Elektrons überlagern und sich dabei gegenseitig auslöschen. In der Summe bleibt somit ein retardiertes Signal vom ersten zum zweiten Elektron und ein avanciertes in Gegenrichtung übrig und zwar auf dem direkten Weg zwischen den beiden Elektronen. Da die avancierte Welle eine negative Ladung trägt, löschen sich diese beiden Wellen nicht aus, sondern verstärken sich gegenseitig: Je nach Sichtweise, von der keine der anderen ausgezeichnet ist, transportieren beide Wellen positive Energie in Zukunftsrichtung bzw. negative Energie in Vergangenheitsrichtung. Dieser „quantenmechanische Handschlag“, wie John Cramer ihn nennt, bildet die Grundlage jeder quantenmechanischen Wechselwirkung und ersetzt den plötzlichen Kollaps der Wellenfunktion.

Dieses Bild ist ein perfektes Beispiel für die oben skizzierte „Sicht von Nirgendwann“ von Huw Price. Aufgrund der vollkommenen Symmetrie der Zeitrichtungen sind diese im Grunde

konzeptuell überflüssig, als Ergebnis resultiert einfach eine ganz bestimmte Beziehung oder Verbindung zwischen den beiden Elektronen, die nicht dem üblichen zeitgeordneten Ursache-Wirkungs-Prinzip gehorcht. Dazu passt auch die Tatsache, dass aus Sicht der Wellen nach den Gesetzen der Relativitätstheorie gar keine Zeit vergeht, da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Für sie fallen der Anfangs- und Zielpunkt auf einen einzigen Augenblick zusammen.

Klingt das schwer vorstellbar? Für mich selber und sicherlich auch die meisten Lesern ist es das sicherlich. Wir sind schließlich temporal denkende und handelnde Wesen, für die sich Vergangenheit und Zukunft grundlegend voneinander unterscheiden. Es wäre aber voreilig, aus der fehlenden Intuition abzuleiten, dass das atemporale Grundprinzip der quantenmechanischen Welt nicht richtig sein kann. Warum sollte auch unsere Intuition, die wir uns im Lauf der menschlichen Evolution angeeignet haben, in der Welt der Elektronen und Atome ein genauso verlässlicher Führer wie im täglichen Leben sein? Für diesen historischen Trugschluss gäbe es auch außerhalb der Quantenmechanik genügend Gegenbeispiele.

Ein neuer Blick auf die Rätsel der Quantenwelt

Es verbleibt jetzt nur noch ein Kapitel in meiner kleinen Aussichtstour durch die Quantenmechanik. Darin möchte ich zeigen, wie sich die merkwürdigen Phänomene, die ich im ersten Teil vorgestellt hatte, im Lichte der Transaktionsinterpretation darstellen. Das Tolle daran ist die Tatsache, dass dieses Kapitel eigentlich gar nicht nötig ist. Basierend auf dem oben beschriebenen Grundprinzip erscheinen sie nämlich gar nicht mehr merkwürdig, sondern vielmehr als konkrete Spielarten dieses Prinzips, wie man sie auch ohne Kenntnis der experimentellen Resultate hätte ableiten können. Es wäre daher eine überaus lohnende Übung, vor dem Lesen dieses Kapitels noch einmal zum ersten Teil dieses Textes zurückzugehen und sich selber zu überlegen, wie sich die Phänomene aus dieser Perspektive deuten lassen. Sie werden möglicherweise überrascht sein, wie einfach das geht. Ich hoffe auch, dass Ihnen aus dem zweiten Teil dieses Aufsatzes noch gut in Erinnerung ist, welche Klimmzüge und teils haarsträubenden Zusatzannahmen die anderen Interpretationen machen mussten, um den beobachteten Resultaten gerecht zu werden. Für mich stellt das den überzeugendsten Nachweis dar, dass die Interpretation von John Cramer den Kern der Quantenmechanik trifft.

Beginnen wir mit dem Versuchsaufbau, bei dem die Merkwürdigkeiten der quantenmechanischen Welt besonders deutlich zu Tage treten. Im ersten Teil habe ich das tatsächlich durchgeführte „Delayed Choice“ Experiment vorgestellt, bei dem ein Elektron durch eine Zwischenwand mit zwei Spalten geschickt wird und dahinter einen Schirm vorfindet, der hoch- und runtergeklappt werden kann. Im hochgeklappten Zustand zeigt der Schirm das typische Interferenzmuster, während er in dem anderen Zustand den Weg für zwei Richtungsdetektoren frei macht, die das Elektronen beim Durchflug durch den oberen oder unteren Spalt „ertappen“ können. Die Interferenzeffekte verschwinden dabei in diesem zweiten Fall. Die Besonderheit an dieser Versuchsanordnung besteht darin, dass der Schirm erst nach dem Durchflug der Elektronen durch die Zwischenwand umgeklappt wird, d.h. das Elektron „weiß“ bei der Zwischenwand noch gar nicht, ob es wie eine Welle durch beide Spalte gehen soll oder sich wie ein Teilchen für eines der beiden Spalte entscheiden muss. Es kann sich daher in diesem Moment auch nicht auf eine der beiden sich gegenseitig ausschließenden Eigenschaften festlegen, das tatsächliche Ergebnis *manifestiert* sich erst beim Akt der Messung.

Merken Sie etwas? Das grundlegende Rätsel dieser Versuchsanordnung verschwindet augenblicklich, wenn man sich nicht an die zeitliche Abfolge von Ursache und Wirkung klammert. Die stillschweigende Annahme besteht darin, dass die Wechselwirkung mit dem Messgerät das Elektron beim Passieren der Zwischenwand nicht beeinflussen kann, weil dieses zu einem früheren Zeitpunkt stattfindet. Aus Sicht der Transaktionsinterpretation gibt es aber gar keine zeitliche Reihenfolge. Der Akt der Messung beeinflusst den gesamten Weg des Elektrons von seinem Startpunkt bis zu seiner Detektion, genauso wie die Elektronenquelle und die Eigenschaften der Zwischenwand diesen Weg beeinflussen. Die Richtungsdetektoren sind in dieser Perspektive genauso am Wirkungsgeschehen beteiligt wie der Rest der Versuchsanordnung. Die von ihnen ausgehenden avancierten Wellen „zwingen“ das Elektron bildlich gesprochen, sich für den Durchflug durch den oberen oder unteren Spalt zu entscheiden. Der intuitiv schwer fassbare Welle-Teilchen-Dualismus bleibt dabei natürlich erhalten, er ist ein neuartiger und nicht wegzudiskutierender Zug der Quantenmechanik. Das Rätsel, warum eine Messung zu einem plötzlichen Kollaps der Wellenfunktion und damit zu einer Manifestierung der realen Systemeigenschaften führen kann, wird aber von der Transaktionsinterpretation überzeugend gelöst. Es gibt nur eine atemporale und in sich konsistente Gesamtbeschreibung des jeweiligen Ausgangs des Experiments, das von den Gesetzen der Quantenmechanik mit einer fantastischen Präzision beschrieben wird.

Aus diesem Gedankengang ergibt sich auch sofort eine neue Sichtweise für das Phänomen der Verschränkung. Bei dieser geisterhaften Verbindung zwischen zwei weit voneinander entfernten Teilen eines Quantensystems führt die Vermessung des einen Teilchens zu einer instantanen, d.h. augenblicklichen Veränderung des zweiten. Wie ist das möglich? Nicht eine einzige der im zweiten Teil dieses Aufsatzes vorgestellten Interpretationen konnte dieses Rätsel lösen. Bestenfalls wurde dafür plädiert, dass es keine echte physikalische Erklärung für diesen Effekt geben könne, der mittlerweile schon über mehr als 100km Entfernung nachgewiesen wurde.

Die Tatsache, dass die Messung einen Einfluss auf den Zustand des Gesamtsystems nimmt, ist aus Sicht der Transaktionsinterpretation dagegen vollkommen natürlich. Bildlich kann man sich die Messung an dem ersten Teilchen wieder als eine Wechselwirkung mit Aussendung von retardierten und avancierten Wellen vorstellen. Die avancierten Wellen laufen dabei zum Ursprungsort des Systems zurück und wirken sich dort auf das zweite Teilchen aus, indem sie es in den komplementären Zustand zum ersten Teilchen versetzen. Kein Wunder also, dass die Messung des zweiten Teilchens genau diese Eigenschaft zeigt. Selbst ohne genaue Kenntnis von einem solchen Wirkungsmechanismus kann man leicht erkennen, dass nur der verzweifelte Versuch, den Ablauf dieses Experiments in eine feste zeitliche Ordnung zu bringen, zu dem Interpretationsproblem führt. Es gibt daher kein anderes Beispiel in der Physik, bei dem die Vorzüge der atemporalen Perspektive so offensichtlich werden wie beim quantenmechanischen Phänomen der Verschränkung.

Als letzte Bemerkung über die Transaktionsinterpretation soll erwähnt werden, dass diese Theorie vor kurzem von Ruth Kastner eine relativistische Verallgemeinerung unter dem Namen "Possibilist Transactional Interpretation" erfahren hat. Ihre beiden Bücher von 2012 und 2015 bieten nicht nur eine ausgezeichnete Beschreibung dieser Interpretation, im zweiten Buch in einer vollständig nicht-mathematischen Art und Weise, sondern zeigen auch eine ganze Fülle von philosophischen Implikationen dieses Ansatzes auf, die weit über den Bereich der Quantenmechanik hinausgehen. Ich bin mir sicher, dass diese Bücher in den nächsten Jahren eine große Aufmerksamkeit erfahren werden.

Schlussworte

Das wars. Mehr habe ich zu diesem faszinierenden Thema der Quantenmechanik nicht beizutragen. Das Ergebnis ist ganz anders, als ich beim Beginn dieses Aufsatzes gedacht hatte. Ich kannte zwar den mathematischen Formalismus dieser Theorie sowie die historischen Interpretationen und einige ihrer Schwächen, aber ich hätte nicht gedacht, dass sie trotz ihres überraschenden Variantenreichtums dermaßen kläglich an dem Versuch scheitern, eine halbwegs überzeugende Erklärung der quantenmechanischen Rätsel zu liefern. Tragen die subjektivistischen Sichtweisen daher den Sieg davon, die die Suche nach einer realen, von unserer menschlichen Sichtweise unabhängigen Grundlage der beobachtbaren Phänomene für sinnlos halten? Diese Schlussfolgerung schien mir tatsächlich unumgänglich zu sein. Damit hätte ich meine tiefe Überzeugung aufgeben müssen, dass die Dinge so sind wie sie sind, auch wenn wir gerade nicht hinschauen. Diese Weltanschauung hatte meine jahrelange Beschäftigung mit hochkarätigen Kritikern des Realismus wie Paul Feyerabend, Thomas Kuhn oder Bas van Fraassen unbeschadet überstanden und dieser uralte philosophische Diskurs sollte nun durch die Quantenmechanik entschieden worden sein!?

Als ich bereits langsam versuchte, mich an diesen Gedanken zu gewöhnen, stieß ich auf das Buch von John Gribbin. Seine anschauliche Erklärung der Transaktionsinterpretation leuchtete mir sofort ein und erinnerte mich zudem an das Buch von Huw Price, das ich einige Jahre zuvor mit großer Faszination gelesen hatte. Das Ergebnis dieser beiden Gedankenwelten habe ich in diesem Aufsatz zusammenzufassen versucht. Natürlich beansprucht dieser Ansatz nicht, das letzte Wort zur Interpretation der Quantenmechanik zu sein und erst recht nicht, einen Beweis für die realistische Weltanschauung zu liefern. Er erscheint mir aber doch als eine in sich konsistente Sichtweise, deren einzige Schattenseite darin besteht, unser gewohntes Bild von Vergangenheit und Zukunft vollkommen auf den Kopf zu stellen.

Vielleicht ist die Zeit reif für einige Kopfstände? Wem dieses Unterfangen kindisch erscheint, dem gebe ich vollkommen Recht. Um noch einmal Albert Einstein zu zitieren:

Das Studium und allgemein das Streben nach Wahrheit und Schönheit ist ein Gebiet, auf dem wir das ganze Leben lang Kinder bleiben dürfen.