

NATURGESETZE

Was ist heute real?

Anlässlich des Buchs »The Road to Reality – A Complete Guide to the Laws of the Universe« von Roger Penrose, macht sich der Teilchenphysiker Henning Genz Gedanken über die Natur der Naturgesetze und deren Realität.

Von Henning Genz

Dem Verständnis der Realität haben Generationen von Philosophen ihr Leben gewidmet, offensichtlich ohne zu einem Ergebnis gekommen zu sein. Physiker, die mit dem Begriff Realität konfrontiert werden, wollen ihn pragmatisch verstehen. Ihnen geht es nicht darum, was Realität letztlich sei, sondern darum, was wir meinen, wenn wir diesen Begriff verwenden.

Anlass dieses Essays ist das im Sommer 2004 erschienene 1094 Seiten lange Buch »The Road to Reality – A Complete Guide to the Laws of the Universe« von Roger Penrose. Der emeritierte Mathematikprofessor der Universität Oxford ist Gewinner zahlreicher Preise, darunter, zusammen mit Stephen Hawking, der renommierte Wolf-Preis für Physik 1988. Ich habe mit dem Buch gehandelt, war von ihm fasziniert und fühle mich am Ende durch es bereichert. Bereichert durch Einblicke in die Denkweise von Roger Penrose, die zwar nicht meine ist, ihr aber nahe kommt. Verkürzt unterscheiden sich unsere Auffassungen vor allem dadurch, dass der Abgrund zwischen naiv verstehbarer und anderer Realität, den ich sehe, sich für den Oxford-Mathematiker nicht auftut. Die Naturgesetze halte ich wie er für real – Penrose in ihrer mathematischen »platonischen« Formulierung, ich in ihren Auswirkungen in der naiv verstandenen Realität der Physik.

Ich sollte klar machen, dass ich von einem Standpunkt aus schreibe. Nämlich von dem meines Buchs »Wie die Naturgesetze Wirk-

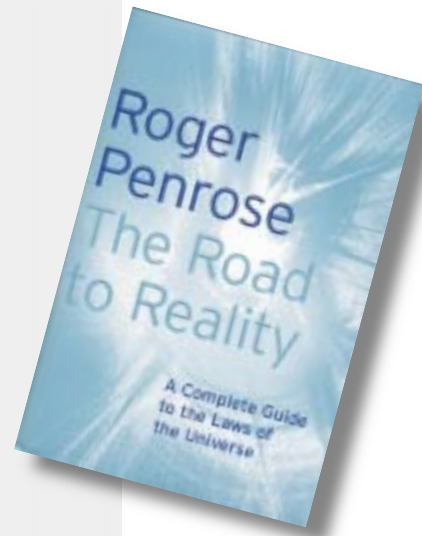
lichkeit schaffen«. Darin behaupte ich, dass den Gesetzen der Physik eher als den Objekten, deren Existenz sie behaupten – ihrer Ontologie –, Realität zugesprochen werden kann. Die naive Realität von Billardbällen und Zeigerstellungen wird hierdurch nicht berührt, wohl aber die von Newtons absolutem Raum sowie die von Molekülen und Elektronen. Will man ihnen Realität zusprechen, setzt man sich zwei komplementären Einwänden aus. Erstens dem der so genannten Unterbestimmtheit: Wie konnte Newton von »dem« absoluten Raum sprechen, wenn doch seine Mechanik keine experimentelle Unterscheidung von Räumen erlaubt, die sich mit verschiedenen konstanten Geschwindigkeiten relativ zueinander bewegen? Mit der Konsequenz, dass nur durch willkürliche Ernennung einer von ihnen zu dem absoluten Raum der Newton'schen Mechanik erhoben werden kann. Verzichtet man auf dieses subjektive Element, kann Realität offenbar nur der Gemeinschaft aller Räume mit verschiedenen Relativgeschwindigkeiten zugesprochen werden.

Den zweiten Einwand will ich durch das Billardballmodell der Gase erläutern. Dieses unterstellt, dass sich Moleküle in Gasen wie Billardbälle verhalten, indem sie elastisch aneinander stoßen. Natürlich müssen wir von Eigenschaften realer Billardbälle wie ihren Farben absehen, wenn wir sie als Modelle für Moleküle verwenden wollen. Aber dadurch verlieren sie ihre Realität im Sinn der Physik nicht. Denn wir verwenden diesen Begriff so, dass er farblose Bälle einbeziehen kann. Nicht aber einbeziehen kann er Objekte, denen eine Bahn im Raum zuzuweisen aus prinzipiellen

▼ Gasmoleküle bewegen sich durch Raum und Zeit wie Billardbälle. Bei tiefen Temperaturen jedoch dominieren Quanteneffekte – das klassische Raumzeitbild versagt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

*Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.*



Gründen unmöglich ist. Genau das aber erfordern die Eigenschaften von Gasen bei tiefen Temperaturen, bei denen Quanteneffekte dominieren. Während sich verdünnte Gase bei hohen Temperaturen durchaus wie ein Gewimmel von Billardbällen verhalten, versagt diese Vorstellung in der Nähe des absoluten Nullpunkts. Keine Ansammlung von Objekten, denen eine Bahn im Raum zugewiesen werden kann – zugleich also Ort und Geschwindigkeit –, kann die beobachteten Eigenschaften von Gasen bei tiefen Temperaturen besitzen. Objekte dieser Art würden im Widerspruch stehen zur Unschärferelation der Quantenmechanik, die sich auf Gase bei tiefen Temperaturen auswirkt.

Mit dem Buch von Penrose habe ich aus mehreren Gründen gehadert

Auf Gegenstände der Quantenmechanik ist der Realitätsbegriff der Klassischen Physik also nicht anwendbar. Um Worte geht es hier nicht, wohl aber darum, dass ein Abgrund den Realitätsbegriff der Klassischen Physik von dem der Quantenmechanik trennt. Natürlich gehören schlussendlich alle Objekte dieser Theorie an. So muss es möglich sein, die für ihr Verhalten geltenden Naturgesetze durch die Quantenmechanik zu verstehen, auch wenn nur ihre Auswirkungen auf Objekte der Anschauung real im Sinn der Physik und direkt beobachtbar sind (etwa Zeigerstellungen in Messgeräten).

Moleküle bei tiefen Temperaturen sowie Elementarteilchen werden von diesem Realitätsbegriff, den wir zur Abwehr weitergehender Deutungsforderungen als naiv bezeichnet

haben, nicht erfasst. Sie beziehen ihre Realität aus den Naturgesetzen, in denen sie nur als Begriffe auftreten und zur Ableitung von experimentell überprüfbaren Aussagen dienen. Aber auch die Gesetze selbst besitzen eine robuste Realität, die es erlaubt, sie im Sinne der Physik als real zu bezeichnen. Hierauf hat als erster Steven Weinberg, Physiknobelpreisträger von 1979, in seinen Büchern »Der Traum von der Einheit des Universums« und »Facing Up« hingewiesen. Ich verwende zur Erläuterung gern zwei gleiche Münzen. Beide sind zweifelsfrei real im Sinn der Physik. Genauso real ist aber auch dieser naturgesetzliche Zusammenhang: Wird die eine Münze zentral gegen die andere geschnipst, bleibt die erste liegen, und die zweite setzt deren Weg mit derselben Geschwindigkeit fort. Objekte und Naturgesetze besitzen also im Bereich der Klassischen Physik denselben hohen Grad robuster Realität.

Mit dem Buch von Roger Penrose habe ich aus mehreren Gründen gehadert. Erstens wegen seines ungewöhnlichen Sprachgebrauchs und bisweilen unverständlicher oder falscher Darstellungen in Sachen Physik, etwa bei den Elementarteilchen, meinem Fachgebiet. Zweitens wegen der mangelnden Redundanz des Buchs – trotz seines Umfangs bleibt vieles kryptisch. Drittens hat sich mir nicht erschlossen, weshalb das Werk so mit Mathematik überladen ist. Und ich kann viertens Penrose nicht folgen, wenn er der mathematischen Struktur physikalischer Theorien mehr Bedeutung zumisst als ihrem Inhalt.

Eine Behauptung, die Penrose früher aufgestellt hat, nimmt in diesem Buch einen er- ▷

▲ Der Theoretiker Roger Penrose vor der formelübersäten Tafel: Er trennt die Welt der mathematischen Wahrheiten von der körperlichen und der geistigen Welt.

▷ freulich geringen Raum ein: dass das menschliche Gehirn vermöge der Quantenmechanik Rechnungen durchführen könne, die mehr erbringen, als durch eine so genannte Turing-Maschine geleistet werden kann. (Die »Universelle Turing-Maschine« kann in endlicher Zeit nur endlich viele diskrete – sprich: durch Markierungen voneinander trennbare – Rechenschritte durchführen.) Keinem Hirnforscher, von dem ich weiß, ist diese Unterstellung eine Erwähnung wert. Penrose kann mit seiner These nicht nur das Quantenrechnen meinen. Quantencomputer rechnen zwar schneller als konventionelle, können aber nicht mehr erbringen.

Seine Ideen werden durch kein Experiment gestützt

Eindrucksvoll ist die eigenständige Kritik, die Penrose an nahezu allem übt, was der theoretischen physikalischen Grundlagenforschung lieb und wert ist: von der Symmetriebrechung und dem Vakuum über Strings und Dunkle Energie bis zur Quantenmechanik, die Penrose – wie einst schon Einstein – für unvollständig hält. Sein Problem ist nicht die quantenmechanische Verschränkung zuvor miteinander verbundener, nun aber weit voneinander entfernter Teilchen, die trotz ihrer Entfernung weiterhin ein gekoppeltes System bilden, sondern dass diese Verschränkung niemals »objektiv« aufgehoben wird. Dies beginnt bereits mit der »Reduktion des Wellenpakets« bei einer Messung, die Penrose als Quantensprung bezeichnet. Abhilfe schaffen soll die Allgemeine Relativitätstheorie, indem sie in das quantenmechanische Geschehen hineinwirkt. Aber hier wie anderswo muss Penrose sich den Vorwurf gefallen lassen, den er der physikalischen Grundlagenforschung macht: Seine Ideen werden durch kein Experiment gestützt.

Zahlreich sind die von Penrose zitierten Interpretationen der Quantenmechanik durch Physiker. Ich will mich mit ihm zu einer Interpretation bekennen und zugleich die Kritik zurückweisen, die er an ihr übt. Wenn überhaupt einem Konzept der Quantenmechanik Realität zuerkannt werden kann, dann der Wellenfunktion, durch die auf mathematisch abstrakte Weise der Zustand eines Systems beschrieben wird. Nicht also durch Ort und Impuls – wenn Penrose auch, für mich ein Widerspruch, die Unschärferelation so interpretiert, dass sie nur die gleichzeitige Messung von Ort und Impuls verbietet. Nein, diese Werte »gibt« es nicht: Die Unschärferelation besagt letztlich, dass auf dem Niveau der Wellenfunktionen Ort und Impuls selbst in dem Sinn unscharf sind, dass diese keine genau-

ren Werte besitzen können, als die Unschärferelation zulässt.

Penrose unterscheidet, anders als ich, nicht zwischen der naiv begreifbaren Realität von Alltagsobjekten einerseits und der von theoretischen Konstrukten wie der Wellenfunktion andererseits, die ihre »Realität« allein der Theorie verdanken, in der sie auftreten. Nun kennt die Quantenmechanik einen bis ins letzte Detail verstandenen, im Sinn von Penrose realen Prozess für reale Wellenfunktionen, den er den U-Prozess nennt. Von ihm unterscheidet er einen R-Prozess, der bei seinen Quantensprüngen auftritt und den die Quantenmechanik auf eine Folge von U-Prozessen zurückzuführen sucht; ein Vorhaben, das ihr bisher nicht zur allseitigen Zufriedenheit gelungen ist. Eine kurze Erläuterung: Die U-Prozesse betreffen von der Außenwelt isolierte quantenmechanische Systeme, deren Wellenfunktionen sich im Lauf der Zeit Schritt für Schritt deterministisch entwickeln – ganz wie die Orte klassischer Systeme. R-Prozesse treten dagegen auf, wenn quantenmechanische Systeme in Kontakt mit der Außenwelt treten, etwa bei Messungen. Der Universalitätsanspruch der Quantenmechanik besagt, dass sich auch das umfassende System – das ursprünglich quantenmechanische plus Außenwelt – durch deterministische Schritt-für-Schritt-Entwicklungen beschreiben lassen können muss. Ist das gelungen, bedarf die Quantenmechanik zumindest im Prinzip der Quantensprünge nicht mehr – an ihre Stelle treten Verfestigungen durch zahlreiche beteiligte Teilchen und Felder in der Außenwelt.

Unvollständige Quantenmechanik

Penrose hält eine Erklärung der R-Prozesse durch U-Prozesse für unmöglich, sodass die Quantenmechanik für ihn ein Vorläufer einer anderen, vollständigeren Theorie sein muss. Als physikalischen Grund führt er nur an, dass bei der Deutung von R-Prozessen durch U-Prozesse – beim Übergang von isolierten Systemen zu solchen im Kontakt mit der Außenwelt – sich die quantenmechanische Verschränkung von Systemen, die jemals in Kontakt miteinander gestanden haben, über das Universum ausbreiten müsste. So auch nach Auskunft der Quantenmechanik, aus der aber keine Gegenargumente folgen. Bemerkbar wäre es jedenfalls nicht. Penrose schwebt vor, die Quantenmechanik zu vervollständigen, und zwar durch Einbeziehung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Eher nebenbei erforschen Kosmologen und Elementarteilchenphysiker, wie die Ordnung anfangs in die Welt gekommen ist, und

 Nobelpreisträger Steven Weinberg hält nicht nur Objekte der Physik, sondern auch ihre Naturgesetze selbst für »real«.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

die seitdem einem zunehmenden Chaos weicht. Für Penrose ist das hingegen eine zentrale Frage der Urknalltheorie. Er weist darauf hin, dass der Zustand höchster Ordnung – minimaler Entropie – eines Systems, dessen Verhalten durch die Schwerkraft dominiert wird, derjenige ist, in dem Materie und Energie völlig gleichmäßig verteilt sind. Eben wegen seiner hohen Ordnung ist dieser Zustand so schwer einzustellen, dass sein Auftreten als Anfangszustand des Universums beliebig unwahrscheinlich ist.

Da er trotzdem aufgetreten ist, kann folglich nur bedeuten, dass im Urknall eine Welt entstand, die so symmetrisch war wie nur überhaupt möglich. Penrose, der Symmetrien übrigens für nicht so fundamental hält wie die gegenwärtige Physik, fügt zu der Annahme der Gleichverteilung von Materie und Energie im Urknall die hinzu, dass die Raumzeit selbst, sieht man von Materie und Energie ab, »konform« flach gewesen ist; ausgedrückt durch das Verschwinden einer abstrakten mathematischen Größe namens Weyl-Tensor.

Insgesamt unterteilt Penrose die Realität in drei Bereiche, die er zyklisch anordnet, und von denen jeder seine eigene Qualität besitzt: erstens die platonische Welt der mathematischen Wahrheiten, zweitens die körperliche und drittens die geistige Welt. Obwohl Penrose den einflussreichen Philosophen und Wissenschaftstheoretiker Karl Raimond Popper in diesem Zusammenhang nicht erwähnt, ist sein Modell doch eine Variante von dessen »Dreiweltentheorie«, das sich von dieser vor allem durch die unterstellten Beziehungen der Welten unterscheidet.

Tief und geheimnisvoll nennt Penrose die Relationen zwischen den drei Welten zueinander. Und in der Tat sind sie mir nicht ganz klar geworden: Die platonische Welt erklärt er zur ursprünglichsten, weil ihr bereits durch die Logik zur Existenz verholfen werde. Die zweite, die körperliche Welt, wird durch einen Teil der platonischen beherrscht; ich verstehe das so, dass für sie mathematisch formulierbare Gesetze gelten. Drittens die geistige Welt. Wie die platonische besitzt auch sie laut Penrose eine von der körperlichen unabhängige Existenz; kann also nicht, wie viele es wollen, als emergente Eigenschaft der körperlichen Welt verstanden werden.

Wie die körperliche Welt von Gesetzen der platonischen beherrscht wird, so wird die geistige Welt durch Gesetze regiert, die der Körperwelt entstammen. Schließlich ist die platonische Welt der geistigen ganz zugänglich. Sie kann auf der geistigen Welt vollständig aufbauen. Zu diesem Bild, das dem Körper-Geist-Dualismus die platonische Welt als

Vermittler zugesellt, muss nach meiner Auffassung eine Rückwirkung der geistigen auf die platonische hinzukommen, die aus der körperlichen Welt stammt. Denn es muss auch darum gehen, was von der platonischen Welt gewusst werden kann; und das hängt davon ab, welche Beweise in der körperlichen geführt werden können. Für mich ist die Turing-Maschine nicht nur ein Gedankenapparat, sondern eine Maschine, die in unserer Welt zumindest im Prinzip gebaut werden kann.

Auch Gehirne sind Beweismaschinen, die auf physikalischen Gesetzen beruhen

So muss gefragt werden, ob die Konstruktion mächtigerer Rechenmaschinen tatsächlich unmöglich ist. Oder kann es Welten geben, deren universelle Beweismaschinen mächtiger oder weniger mächtig wären als unsere? Notabene: Auch Gehirne sind auf physikalischen Gesetzen beruhende Beweismaschinen. Penrose erkennt eine Grauzone zwischen Logik und Mathematik an. Sein Beispiel stammt aus der Mengenlehre und betrifft das berühmte »Auswahlaxiom«. (Vermöge dieses Axioms soll es möglich sein, aus einer beliebigen Menge von nichtleeren, aber durchschnittsfreien – eine wichtige Voraussetzung, die Penrose zu erwähnen vergessen hat – Untermengen eine Menge zu bilden, die aus jeder Untermenge genau ein Element enthält.)

Penrose vermag diese mathematische Annahme weder der Logik noch der Mathematik zuzurechnen. Gehört es der platonischen Welt der wahren Sätze an? Oder muss es als Voraussetzung mathematischer Sätze angeführt werden, deren Beweise es benutzt? Konstituiert das Auswahlaxiom also eine spezielle Sparte der Mathematik, wie etwa die Zahlentheorie, der es zu Grunde liegt?

Das Buch von Penrose ist nicht zuletzt ein faszinierender Versuch, die Früchte eines Mathematikerlebens darzustellen. Mit Penrose glaube ich an die Realität von Naturgesetzen, auch wenn ich ihrem Wirken in der körperlichen Welt eine fundamentalere Realität zuschreibe als ihrer Verankerung in einer platonischen. Der geistigen Welt vermag ich keine Existenz zuzusprechen, die von der körperlichen unabhängig ist; mir gilt sie als deren emergentes Produkt.

Mit Penrose halte ich es für möglich, dass die Quantenmechanik die Konfrontation mit der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht unbeschädigt überstehen wird. Kosmische Inflation und alles, was heute zu den Theorien des frühen Universums gehört, sind mir weniger suspekt als dem großen Mathematiker aus Oxford. ◀

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Isaac Newton postulierte einst den »absoluten Raum«. Doch der ist nur eindeutig bis auf konstante Relativgeschwindigkeiten.



Henning Genz

ist emeritierter Professor für Theoretische Physik der Universität/TH Karlsruhe. Sein Arbeitsgebiet ist

die Theorie der Elementarteilchen.

The road to reality – a complete guide to the laws of the universe. Von Roger Penrose. Knopf, New York 2005

Wie die Naturgesetze Wirklichkeit schaffen. Von Henning Genz. Rowohlt, Reinbeck 2004

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.