



Von Strings, Branen, Extradimensionen und der Theorie von Allem

von Kurt Bangert

Eine der großen ungeklärten Fragen bleibt die nach der Vereinheitlichung der Kräfte. Wird es den Forschern je gelingen, eine Theorie von allem zu entwickeln (*Theory of Everything*), die unser Weltbild abrunden würde? Wie weit können wir der Natur die Geheimnisse entreißen und ihre Rätsel entschlüsseln? Und wie passt das alles philosophisch zusammen?

Die Suche nach der Theorie von allem

Die Physik der letzten 200 Jahre war weitgehend getrieben von dem Bemühen, ein einheitliches Verständnis der physikalischen Naturkräfte zu erhalten. Im Mittelalter war man etwa vom Magnetismus fasziniert, und ab dem 18. Jahrhundert begannen die Gelehrten, sich mit der Elektrizität zu beschäftigen. Sie bemühten sich darum, diese Phänomene besser zu verstehen und miteinander in Einklang zu bringen. Erst im 19. Jahrhunderts gelang es, die Elektrizität und den Magnetismus zur Theorie des Elektromagnetismus zu vereinen. Diese Vereinheitlichung verdanken wir solch berühmten Namen wie Volta, Ampère, Maxwell und Hertz. Bis etwa 1935 kannte man neben dem Elektromagnetismus nur noch die Schwerkraft. Erst der Japaner Hideki Yukawa entwickelte 1935 eine Theorie der Kernkraft. Seither unterscheiden wir die schwache Kernkraft, die mit radioaktiver Strahlung und dem radioaktiven Zerfall zu tun hat, und die starke Kernkraft, die Neutronen und Protonen zusammenschweißt.

Noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelang es Kernphysikern, den Elektromagnetismus und die schwache Kernkraft zu einer einheitlichen Theorie zu verbinden. Dies lies darauf hoffen, dass man über kurz oder lang auch eine vereinheitlichende Theorie finden würde, die noch die starke Kernkraft und die Gravitation einschließen würde. Diese „Theorie von allem“ gilt als das vielleicht größte wissenschaftliche Problem überhaupt. Viele großen Physiker des 20. Jahrhunderts hofften darauf, dieses Problem endlich lösen zu können. Albert Einstein widmete der Fahndung nach der einheitlichen Feldtheorie die letzten Jahrzehnte seines Lebens – vergebens.

Verkompliziert und verzögert wurde die Suche nach der physikalischen Einheit durch die neu entdeckte Quantenphysik. Die Quantenmechanik ließ aber auch auf den ersehnten Durchbruch hoffen. Werner Heisenberg, einer der Väter der Quantentheorie, ließ 1958 in einer Radiosendung verlauten, er und sein Kollege Wolfgang Pauli hätten endlich eine einheitliche Feldtheorie gefunden; es fehlten nur noch einige technische Details. Als Pauli davon hörte, war er wütend und schickte Heisenberg einen Brief mit einem weitgehend leeren Blatt Papier, auf dem oben zu lesen war: „Das soll der Welt zeigen, dass ich wie Titian malen kann. Es fehlen nur noch einige technische Details.“¹

¹ Zitiert nach Michio Kaku, *Hyperspace*, S. 137.



1974 erkannten Howard Georgi und Sheldon Glashow, dass die beiden Kernkräfte und die elektromagnetische Kraft bei hoher Energie zu einer einzigen Kraft vereinen. Sie nannten ihre Theorie *Grand Unified Theory* (GUT).² Man hat die drei Kräfte mit eineiigen Drillingen verglichen, die zwar aus einem einzigen Ei hervorgingen, sich aber zu sehr unterschiedlichen Individuen entwickelten. Das Problem mit der GUT ist, dass sie vom letztendlichen radioaktiven Zerfall aller Protonen ausgeht, was jedoch der derzeitigen Theorie von den Elementarteilchen, dem so genannten Standardmodell, völlig widerspricht. Außerdem hat man noch keinen Protonenzerfall empirisch nachweisen können, obwohl man intensiv danach gesucht hat. Außerdem hat sich das Standardmodell inzwischen viele Male bewährt, vor allem durch das Auffinden von Teilchen, deren Existenz das Modell vorhersagte. Insofern scheint die GUT noch nicht der Weisheit letzter Schluss zu sein. Die Vereinheitlichung der Physik bleibt ein flüchtiges Unterfangen.

Heutzutage ist die Suche nach der Einheitstheorie vor allem durch die Unvereinbarkeit der Quantenphysik mit der Relativitätstheorie (bzw. der Raumzeitkrümmung der Gravitation) geprägt, deren Gültigkeiten jeweils nur für unterschiedliche Bereiche zutreffen – die Relativitätstheorie für den großen Raum und die Quantenmechanik für subatomaren Raum. Wer diese beiden großen Theorien des 20. Jahrhunderts zusammenbringt, dürfte auch den Schlüssel für die Theorie von allem in der Hand halten. Es ist die große physikalische Herausforderung der Gegenwart.

Eines der Rätsel in diesem Zusammenhang ist übrigens die Frage, warum die Schwerkraft eigentlich so schwach ist. Ein kleiner Magnet kann eine Büroklammer hochheben, obwohl die gesamte Erdmasse sie in die entgegengesetzte Richtung zieht. Die Schwerkraft ist weit schwächer als die elektromagnetische Kraft. Keiner weiß, warum das so ist.

Die Weg ins Innere der Materie

Bei der Suche nach einer Theorie von allem haben die Wissenschaftler sich in erster Linie von der Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie neue Erkenntnisse versprochen, denn der Stoff, aus dem die Atome gemacht sind, birgt, so glauben viele, das Geheimnis zum Weltverständnis. Wir wollen diese Suche nach den kleinsten Bausteinen hier einmal im Zeitraffer nachvollziehen, indem wir folgendes gedankliche Experiment machen:

Nehmen wir an, wir entnehmen unserem Kühlschrank einen Eiswürfel und erhitzen ihn, zunächst auf der Herdplatte, später in eigens dafür geschaffenen Hochdrucköfen und anderen geeigneten Verbrennungsmaschinen. Der Eiswürfel durchläuft, je nach Erhitzungsgrad, folgende Phasen oder Zustände:

1. Zunächst ist der Eiswürfel ein *Festkörper* unterhalb von 0 Grad Celsius.
2. Erhitzen wir ihn auf mindestens 0 Grad, so wird er zu einer *Flüssigkeit*, die wir Wasser nennen.
3. Erhitzen wir ihn auf 100 Grad, bis das Wasser kocht, so trennen sich die Wassermoleküle in ihre elementaren Bestandteile von Wasserstoff und Sauerstoff und der ehemalige Eiswürfel wird er zu einem *Gas*, nämlich Wasserdampf.
4. Erhitzen wir dieses Gas weiter auf eine Temperatur von 3000 Grad, so lösen sich die Elektronen von der Atomschale und wir haben ein ionisiertes Gas, auch *Plasma* genannt,

² Howard Georgi und S.L.Glashow, „Unity of all elementary-particle forces“, Physical Review Letters, Bd. 32, S. 438-441 (1974).



wie innerhalb der Sonne. Dieser Zustand dürfte der im Universum am häufigsten vorkommende sein.

5. Erhitzen wir dieses Plasma, dieses ionisierte Gas weiter auf eine Temperatur von 1 Milliarde Grad, so brechen die Atomkerne auf, so dass sich Protonen und Neutronen voneinander lösen, und wir haben ein *Nukleonengas* oder eine *Neutronenflüssigkeit* wie in einem Neutronenstern.
6. Erhitzen wir dieses Neutronengas weiter auf eine Temperatur von 10 Billionen Grad auf, so werden die Nukleonen aufgebrochen in Quarks und Leptonen, und wir haben eine Art *Quarkflüssigkeit*, wie in einem Schwarzen Loch.
7. Erhitzen wir diese Quarkflüssigkeit weiter auf eine Temperatur von einer Billion Grad, so vereinigen sich die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft miteinander, und wir haben eine *elektroschwache Flüssigkeit*.
8. Erhitzen wir diese elektroschwache Flüssigkeit weiter auf eine Temperatur von 10^{28} Grad, so vereinigen sich die elektroschwache Kraft und die starke Kernkraft miteinander, und wir haben ein Kraftfeld nach Art der *Grand Unified Theory* (GUT), bei der alle physikalischen Kräfte außer der Gravitation vereint sind.
9. Erhitzen wir diese vereinheitlichte Kraft GUT weiter auf eine Temperatur von 10^{32} Grad, so vereinigt sich die GUT mit der Gravitation und wir haben auf der so genannten Planck-Ebene – ja, was denn? – ein *Gas von Superstrings*, das so energiegeladen ist, dass die Raumzeit völlig zusammenbricht, das Universum, wie wir es kennen, sich gänzlich auflöst und die uns bekannten Dimensionen in eine Dimensionsvielfalt zerlaufen. Spätestens wenn das passiert, sollten wir die Küche verlassen.

Dieses Gedankenexperiment³ zeigt nicht nur, dass die Forscher heute erstaunlich viel über die „Bausteine“ der Materie wissen, sondern auch, dass wir es auf der kleinsten Ebene (also der Plancklänge⁴) nicht mehr mit Materieteilchen zu tun haben, sondern mit einem ganz eigenen, merkwürdigen Mikrokosmos.

Die Fäden des Universums ziehen

Auf dem Weg zu einer Einheitstheorie haben theoretische Physiker in den letzten Jahren die so genannte „Stringtheorie“ entwickelt, die darauf hoffen lässt, Quantenmechanik und Relativitätstheorie zu einem einheitlichen Ganzen zusammenzubringen. Der Stringtheorie zufolge sind die grundlegenden Einheiten der Natur keine Teilchen, sondern vibrierende, oszillierende Fäden oder „Strings“. Jedes Teilchen entspringt und entspricht den Vibrationen von Strings, und die Charakteristik unterschiedlicher Vibrationen entspricht den Eigenschaften unterschiedlicher Teilchen. Weil ein String wie die Saite einer Geige auf unterschiedliche Weise oszillieren kann, vermag es unterschiedliche Teilchen mit ihren jeweiligen Eigenschaften (Masse, Ladung, Spin usw.) hervorzubringen. Man unterscheidet heute offene Strings und geschlossene Strings, je nachdem, ob sie zwei Enden haben, oder ob es kreisähnliche Gebilde ohne Enden sind.

Ursprünglich hielt man Strings für eindimensionale Phänomene, also strichförmige Fäden, die in eine Richtung ausgerichtet sind. Doch mit dem Auftauchen der so genannten

³ Ich verdanke dieses Gedankenexperiment Michio Kaku, *Hyperspace*, S. 212f.

⁴ Auf der Planck-Ebene sprechen wir von einer Größenordnung von 10^{-35} , das sind 0,0000000000000000000000000000001 cm.



„Superstringtheorie“ erkannte man, dass Strings sich auch in mehreren Dimensionen bewegen können. Berechnungen ergaben, dass es sogar zehn oder elf Dimensionen sein müssten (einschließlich der Zeitdimension).

Aber gerade die hohe Anzahl von Dimensionen, mit denen die Stringtheoretiker umgingen, sorgte lange Zeit für eine gehörige Portion Skepsis unter den Forschern, vor allem unter den an empirischen Experimenten ausgerichteten Elementarteilchenphysikern.

Es waren jedoch die erstaunlichen mathematischen Symmetrien der Stringtheorie, die inzwischen dazu geführt haben, dass die Skeptiker unter den Physikern immer weniger wurden und nahezu alle namhaften Physiker die Stringtheorie ernst zu nehmen beginnen. Zumindest scheint die Stringtheorie Lösungen aufzuzeigen, die keine andere Theorie anzubieten hat. Das führte dazu, dass an einigen Universitäten die Elementarteilchenphysik sogar zugunsten der Stringtheorie aufgegeben wurde.

Symmetrien

Symmetrien haben die Physiker schon immer fasziniert; sie spielen sowohl in der Physik als auch in der Mathematik eine wichtige Rolle. Symmetrien gelten als Möglichkeit, die Dinge zu verallgemeinern und zu vereinfachen. Die Gelehrten haben schon immer nach Symmetrien gesucht – gerade auch bei der Erforschung der kleinsten Materieteilchen. Die Annahme von Symmetrien hat beim so genannten Standard-Modell zu erstaunlichen theoretischen Vorhersagen für die Existenz kleinster Teilchen geführt, die hernach in den riesigen Linear- und Ringbeschleunigern auch tatsächlich aufgespürt wurden. Je mehr die Physik auf ihre allgemeinen und grundlegenden Gesetze reduziert werden soll, desto mehr halten Physiker und Mathematiker nach Symmetrien und Dualitäten Ausschau. Symmetrien sind schön, und Schönheit hat gerade in der Mathematik und in der Physik so etwas wie einen Wahrheitscharakter. Symmetrien sind Indikatoren, dass die Forscher sich auf dem richtigen Weg befinden könnten.

Doch „perfekte Symmetrie ist oft langweilig“, sagt die Stringforscherin Lisa Randall, eine der ganz wenigen Frauen, die sich auf diesem Gebiet einen Namen gemacht haben. „Mit einem symmetrischen Lächeln wäre die Mona Lisa einfach nicht dieselbe.“ Symmetrien sind wichtig, aber in der Regel weist unsere Welt keine vollkommenen Symmetrien auf. „Leicht unperfekte Symmetrien machen die Welt interessant.“⁵ Symmetrien sind meist instabil und zerbrechen darum leicht in Asymmetrien.

Um zu verdeutlichen, wie leicht Symmetrien gebrochen werden können, wird gerne das Bild eines Gala-Diners herangezogen, bei dem alle Gäste um einen runden Tisch sitzen, mit je einem Wasserglas zur Linken und zur Rechten. Es ist die perfekte Symmetrie. Der erste, der Durst verspürt, hat nun die Möglichkeit, entweder das Glas zu seiner Linken oder zu seiner Rechten zu ergreifen. Indem er das Glas zu seiner Rechten an die Lippen führt, bricht er die vollkommene Symmetrie und sorgt dafür, dass alle anderen Gäste ebenfalls nach rechts greifen müssen. (Ein noch größerer Symmetriebruch wäre es allerdings, wenn einer der Gäste entgegen dem stillschweigenden Konsens der anderen beschlösse, aus dem Glas zu seiner Linken zu trinken. Dann nämlich entstünde ein doppelter Symmetriebruch, der chaotische Züge annähme: einer der Gäste könnte auf einmal zwei Gläser für sich in

⁵ Lisa Randall, *Verborgene Universen. Eine Reise in den extradimensionalen Raum*, S. Fischer Verlag, Frankfurt/Main, 2006, S. 238.



Anspruch nehmen, ein anderer wäre verstimmt, weil ihm gar keines mehr zur Verfügung stünde.)

Obwohl die Stringtheorie durch Symmetrie und Schönheit und vor allem durch die Aussicht besticht, Quantenmechanik und Gravitation in Einklang zu bringen, hielt man sie jedoch insofern für unrealistisch, als sie zusätzliche Dimensionen und sogar zusätzliche Universen voraussetzte. Stringtheoretiker gehen nämlich davon aus, dass sich Multidimensionen oder multiple Universen anfangs in einem symmetrischen, aber deshalb auch instabilen Zustand befanden, weshalb sie zusammenbrachen, um unsere asymmetrische Welt mit ihren drei bzw. vier Dimensionen (je nachdem, ob man die Zeit hinzurechnet) zu ermöglichen. Dabei, so rechnen sie vor, hätten sich sechs weitere Dimensionen (manche sprechen sogar von 20) aufgerollt und weggerollt. Das hörte sich so weit hergeholt an, dass sich die meisten Physiker lange Zeit weigerten, die Stringtheorie ernst zu nehmen. „Ich muss bekennen, dass ich mich bislang schwer getan habe, an zusätzliche Dimensionen zu glauben“, schreibt beispielsweise Stephen Hawking in „Das Universum in der Nussschale“.⁶ Was ist dran an den zusätzlichen Dimensionen?

Der Vater der höheren Dimensionen

Der erste Wissenschaftler, der über zusätzliche Dimensionen nachdachte, war der deutsche Georg Bernhard Riemann, ein Pfarrerssohn, der zeit seines Lebens unter der Armut und seinem labilen Gesundheitszustand litt. Riemann räumte 1854 mit der euklidischen Geometrie von zwei und drei Dimensionen auf. Der junge Riemann schwankte zwischen seinem Interesse an Theologie und Mathematik hin und her, doch behielt die Mathematik die Oberhand. Seine Frühbegabung überforderte seinen Mathelehrer, der ihm, um ihn zu beschäftigen, das Buch „Theorie der Zahlen“ von Adrien-Marie Legendre auslieh, ein monumentales Meisterwerk von 859 Seiten. Als er seinen Schützling eine Woche später fragte, ob er schon mal reingeschaut hätte, antwortete dieser: „Es ist ein wunderbares Buch. Ich hab’s gemeistert.“ Wochen später stellte sein Lehrer ihm einige subtile Fragen zum Buch, um zu prüfen, ob sein Schüler es tatsächlich verstanden hätte. Riemann antwortete ohne zu zögern und vollkommen richtig.⁷

Riemann’s Vater, das Talent seines Sohnes erkennend, kratzte seine letzten Reserven zusammen, damit sein begabter Sohn bei Carl Friedrich Gauss in Göttingen studieren könne, einem der größten Mathematiker aller Zeiten. Gauss bat seinen Studenten eines Tages, eine Vorlesung über die „Grundlagen der Geometrie“ zu halten. Riemann war entsetzt. Öffentliches Reden war dem schüchternen jungen Mann verhasst. Und die Geometrie auf ihre Grundlagen zu untersuchen, erschien ihm als eine Herkules-Aufgabe, der er sich nicht gewachsen sah. Doch die nächsten Wochen verbrachte er mit intensivster Forschung, bei der er sich nicht scheute, seine Gesundheit aufs Spiel zu setzen.

Riemann kannte den Satz des Pythagoras, der besagt (wissen Sie’s noch?), dass die Summe des Quadrats der beiden Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks gleich sei dem Quadrat der Hypotenuse dieses Dreiecks ($a^2+b^2=c^2$). Er erkannte auch, dass man dieses Prinzip des zweidimensionalen Dreiecks auf den dreidimensionalen Raum übertragen kann: Multipliziert man beispielsweise die drei Seiten (Länge a , Breite b und Höhe c) eines Würfels

⁶ Stephen Hawking, Das Universum in der Nussschale, Hoffmann und Campe, S. 62.

⁷ Nach Michio Kaku, Hyperspace, S. 32.



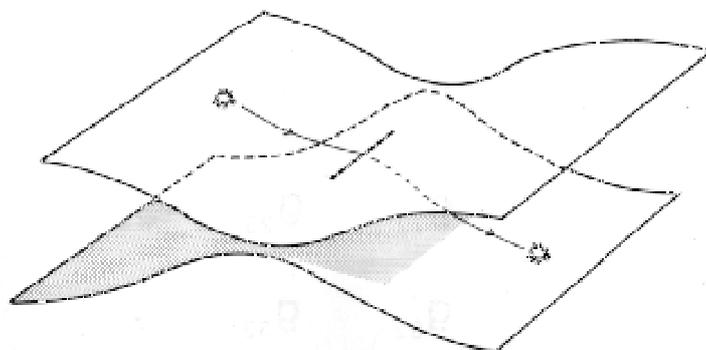
mit sich selbst und addiert sie, so ist dies gleich dem Quadrat der Diagonalen d dieses Würfels (also: $a^2+b^2+c^2=d^2$).

Nun konnte Riemann problemlos noch einen Schritt weiter gehen und das pythagoreische Prinzip auf einen Hyperkubus von vier oder sogar beliebig vielen Dimensionen anwenden, indem er die Seiten des Hyperkubus als a, b, c, d usw. bezeichnete und die vier- oder mehrdimensionale Diagonale des Hyperkubus als z . Auch hier gilt, dass die Summe der Quadrate der Seiten des Hyperkubus gleich dem Quadrat der Diagonalen des Hyperkubus ist (also: $a^2+b^2+c^2+d^2+\dots=z^2$).

Nun muss man hier die Frage stellen dürfen, ob diese mathematische Ausweitung des pythagoreischen Satzes auf zusätzliche Raumdimensionen nur eine Rechenspielerei ist oder irgendeiner Wirklichkeit entspricht. Eine ähnliche Frage könnten wir heutzutage an die Adresse der Stringtheoretiker richten.

Für Riemann immerhin waren diese Überlegungen nicht nur eine Zahlenspielerei, weil für ihn sich dadurch nicht nur sein Verständnis von Geometrie erweiterte, sondern auch von den physikalischen Kräften, denen er auf der Spur zu sein glaubte. Seit Isaak Newton war man davon ausgegangen, dass die Gravitation zwischen zwei Körpern über große Distanzen „fernwirke“. Riemann vermutete damals schon, dass es sich bei der Schwerkraft möglicherweise nicht um eine Fernwirkung handele, sondern um eine Verzerrung der Geometrie. Er stellte sich vor, was ein zweidimensionaler Käfer empfinden würde, wenn er sich auf einem zweidimensionalen Blatt, das nicht glatt, sondern gewellt oder zerknittert wäre, fortbewegen würde. Er würde, so schlussfolgerte Riemann, je nach Hügel und Tal, eine „Kraft“ verspüren, die ihm das Fortbewegen mal schwerer, mal leichter machen würde. Diese „Kraft“ würde nicht auf einer Fernwirkung beruhen, sondern hätte ihre Ursache in der Krümmung der Geometrie.

Riemann ging noch einen Schritt weiter. Er nahm in Gedanken zwei Blatt Papier, klebte sie in der Mitte zusammen, machte dort, wo sie zusammenklebten, einen kleinen Einschnitt und ließ seinen Käfer wieder darauf herumwandern. Würde der Käfer den Einschnitt ignorieren, so bliebe er auf seinem ihm vertrauten Blatt Papier. Würde er jedoch durch den Einschnitt hindurch auf das untere Blatt Papier krabbeln, fände er sich plötzlich in einer ihm nicht vertrauten Welt wieder – nämlich auf einem völlig anderen Blatt. Er wäre gleichsam durch ein Wurmloch in eine andere Dimension und damit in ein (für ihn) fremdes Universum eingetaucht. Damit nahm Riemann holzschnittartig vorweg, worüber die heutigen Stringtheoretiker sich ernsthafte Gedanken machen.



Als Riemann, nach intensiver Vorbereitung und zwischenzeitlicher Krankheit am 20. Juni 1854 endlich seine Vorlesung hielt, wurde diese enthusiastisch aufgenommen. Im Nachhinein gilt sie als eine der bedeutendsten Vorlesungen der Mathematik. Schnell sprach



es sich herum, dass Riemann mit einer 2000 Jahre alten euklidischen Geometrie aufgeräumt hatte. Riemanns revolutionäre Erkenntnisse ließen ihn selbst werden, bald die Einheit der Physik finden zu können. Doch dazu sollte es nicht kommen, da er aufgrund seines angeschlagenen Gesundheitszustands noch im Alter von 39 Jahren verstarb.

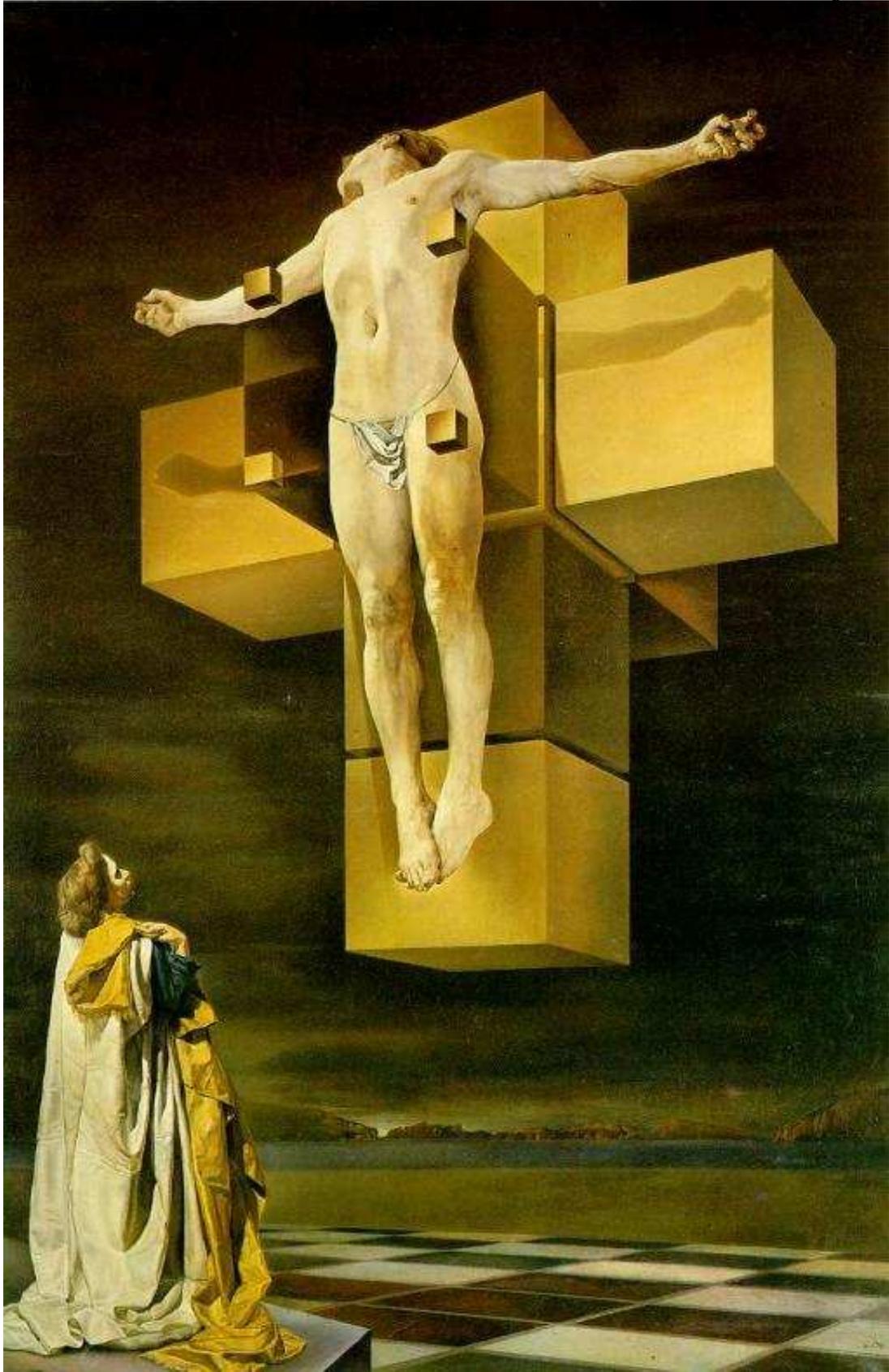
Riemanns Beitrag zu unserem Weltbild war von erstaunlicher Tragweite: Er erkannte erstens, was heute ein beherrschendes Thema der theoretischen Physik ist, dass sich nämlich die Naturgesetze vereinfachen, wenn höhere Dimensionen vorausgesetzt werden. Er erkannte zweitens, dass sich die Schwerkraft als ein geometrisches Feld deuten lässt – ähnlich wie Elektrizität und Magnetismus – und nahm damit in gewisser Weise bereits die Erkenntnisse Einsteins vom gekrümmten Raum vorweg. Und überdies bot Riemann schon einen Vorgeschmack auf Wurmlöcher, mit deren Hilfe man (wenn auch bisher nur theoretisch) von unserer dreidimensionalen Welt in eine höherdimensionierte Welt hinüberwechseln kann.

Zwar dauerte es noch viele Jahrzehnte, bis die extradimensionalen Überlegungen des Mathematikers Riemann von ernsthaften Physikern aufgegriffen wurden, doch inspirierte er schon bald Science-Fiction-Autoren und andere Künstler, die begannen, höhere Dimensionen zu popularisieren.

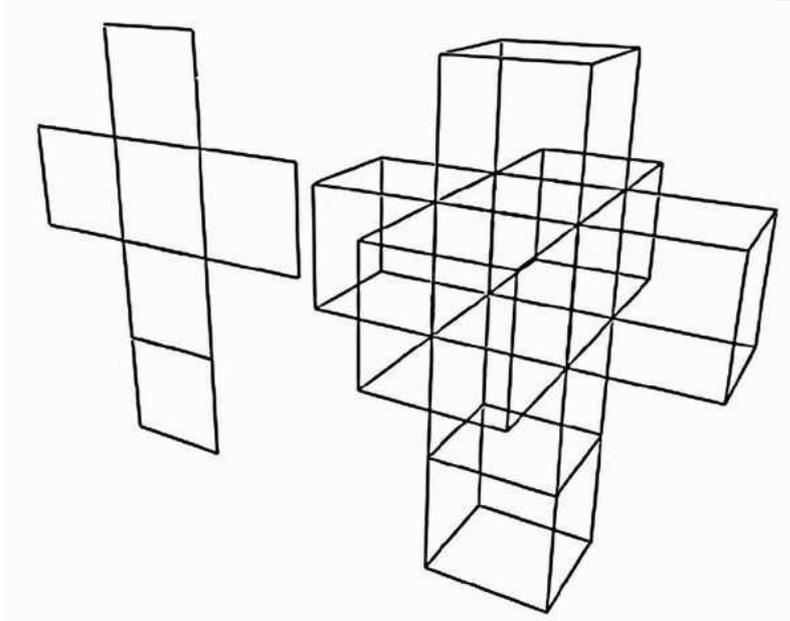
In seinem berühmten Gemälde *Christus Hypercubus* hing Surrealist Salvador Dali seinen gekreuzigten Jesus an einen „Tesseract“, ein aus acht Würfeln bestehendes dreidimensionales Kreuz. Ein Tesseract ist ein auf drei Dimensionen aufgeklappter vierdimensionaler Würfel, auch Hyperkubus genannt. Das ist ähnlich, wie wenn man einen normalen dreidimensionalen Würfel aufklappt und sich daraus ein zweidimensionales Kreuz ergibt. Ähnlich kann man mit einem vierdimensionalen Würfel verfahren, den man ja nicht sehen, sondern nur in seiner aufgeklappten, dreidimensionalen Form visualisieren kann. Mit *Christus Hypercubus* wollte Dali offenbar die Kreuzigung Christi als Durchgangsportal zur vierten Dimension deuten.

Im Jahr 1919, als Albert Einstein durch den experimentellen Nachweis der von ihm postulierten Raumkrümmung erst richtig berühmt wurde, erhielt er den Brief eines noch unbekanntem Mathematiker, Theodor Kaluza, der an der Universität Königsberg – heute Kaliningrad – wirkte und der Einstein bat, seine mathematische Arbeit zu prüfen und zur Veröffentlichung zu empfehlen. Kaluza legte ihm Berechnungen vor, wonach man Einsteins Theorie der Gravitation mit Maxwells Theorie vom Licht wunderbar verbinden konnte, indem man eine fünfte Dimension (bzw. eine vierte Raumdimension) annahm. Mit Hilfe einer zusätzlichen Dimension konnte Kaluza die beiden wichtigsten Feldtheorien seiner Zeit verschmelzen. Mathematisch verhielten sich Licht und Schwerkraft wie Öl und Wasser. Doch Kaluza zeigte, dass Licht als geometrische Raumverzerrung eines höherdimensionalen Raums erklärt werden konnte. Sollte sich der Traum von Riemann doch noch bewahrheiten, wonach man sich die Schwerkraft als ein verzerrtes Blatt Papier oder genauer: einen gekrümmten Raum, vorstellen kann? Einstein jedenfalls war beeindruckt. Er sann lange über Kaluzas Papier nach. Handelte es sich auch hier nur um einen Rechenspielertrick und um bloße theoretische Mathematik – oder um eine ernstzunehmende Theorie? Schließlich kam Einstein zu dem Schluss, dass es sich um eine ernstzunehmende These handele, und er schickte den Artikel zur Veröffentlichung an die Preußische Akademie der Wissenschaften.

Die Frage, die man sich angesichts einer fünften Dimension zwangsläufig stellt, ist: Wo befindet sich diese Dimension? Warum sehen wir sie nicht? Kaluza hatte darauf keine überzeugende Antwort. War die Theorie zum Scheitern verurteilt?



Das Kreuz in Salvadore Dalis *Christus Hypercubus* zeigt einen aufgeklappten Hyperkubus, also einen auf drei Dimensionen entfalteten vierdimensionen Würfel, womit Dali das Kreuz Christi zum Durchgangsportal zu einer höherdimensionierten Welt macht.



Ein aufgeklappter dreidimensionaler Würfel (links) und ein aufgeklappter vierdimensionaler Würfel oder Hyperkubus (rechts)

Der Deutsche Oskar Klein versuchte die Kaluza-Theorie zu retten, indem er vorschlug, die Quantentheorie könne dafür verantwortlich sein, dass sich Kaluzas fünfte Dimension in eine winzige Spule aufgerollt hätte. Klein berechnete, dass die fünfte Dimension nur eine Plancklänge (von 10^{-35}) betragen würde, also viel zu klein sei, um ihr irgendwie nachzuspüren oder sie experimentell nachzuweisen. Die Plancklänge gilt als die kleinste angenommene Größe innerhalb der Elementarteilchenphysik, um vielfache Zehnerpotenzen kleiner als Protonen oder Quarks. Kleins Argument war übrigens dasselbe, das auch moderne Stringtheoretiker heute verwenden, um die Nichtauffindbarkeit zusätzlicher Dimensionen zu erklären: Sie seien so winzig, sagen sie, dass man sie nicht wahrnehmen könne. Doch eine Theorie, die sich experimentell nicht verifizieren oder falsifizieren, nicht bewahrheiten oder als unrichtig erweisen lässt, taugt nicht viel unter Wissenschaftlern. „Sie ist noch nicht mal falsch“, beliebte der Quantenphysiker Wolfgang Pauli zu einer solch unüberprüfbar Theorie abfällig zu bemerken.

Das schien's denn vorerst gewesen zu sein mit der Kaluza-Klein-Theorie. Niemand nahm sie weiter ernst. Ein Dreiviertel Jahrhundert blieb sie in der Versenkung verschwunden. Eine fünfte Dimension war für die meisten Forscher zu weit hergeholt, als dass sie sich ernsthaft damit befassen wollten. Immerhin gibt es kein einziges Phänomen im von uns beobachteten Universum, das sich nur mittels zusätzlicher Dimensionen erklären ließe.

Die Auferstehung der Extradimensionen

Doch seit einigen Jahren feiern die Kaluza-Klein-Theorie und mit ihr die Extradimensionen wieder wissenschaftliche Urständ. Nicht nur Kaluzas fünf Dimensionen werden diskutiert, sondern Theorien mit einer je ganz unterschiedlichen Anzahl von Dimensionen – bis hin zu unendlich vielen Dimensionen. Am plausibelsten scheinen 26 oder 10 Dimensionen zu sein. Auch eine Theorie mit 11 Dimensionen wird ernsthaft diskutiert. Obwohl diese Theorien mathematisch divergieren und auf ganz unterschiedliche Realitäten hindeuten scheinen, weisen sie doch so erstaunliche Übereinstimmungen auf, dass, so



glauben viele Forscher, diese Theorien möglicherweise auf einer höheren Ebene identisch sind. (Diese „höhere“ Theorie wird „M-Theorie“ genannt.⁸) So hat Edward Witten, der wohl bekannteste Stringtheoretiker, beispielsweise gezeigt, dass die elfdimensionale Stringtheorie der zehndimensionalen praktisch äquivalent sei. Bei einer solchen Äquivalenz unterschiedlicher Theorien spricht man auch gerne von „Dualitäten“. Diese Dualitäten sind im Falle der Stringtheorien offenbar so frappierend, dass selbst ein Stephen Hawking seine Abneigung gegen Stringtheorien und höhere Dimensionen überwand und sich ihnen zuwandte. Er bekennt: „Das Geflecht von Dualitäten *nicht* als Zeichen zu werten, dass wir auf der richtigen Spur sind, wäre etwa so, als würden wir glauben, Gott habe Fossilien in die Gesteinsschichten geschmuggelt, um Darwin bezüglich der Evolution des Lebens irrezuführen.“⁹ Mit anderen Worten: Stringtheorien unterschiedlichster Dimensionen sind so auffallend übereinstimmend, dass es sinnvoller ist, sie ernst zu nehmen, selbst um den Preis der Anerkennung von Extradimensionen, als sie nur deshalb zu verwerfen, weil uns Extradimensionen bizarr und phantastisch anmuten.

In der Kosmologie ebenso wie in der Welt der kleinsten Teilchen ist das Bizarre eher die Regel denn die Ausnahme. Wenn wir allein auf die physikalischen und astronomischen Entdeckungen der letzten hundert Jahre zurückblicken, so können wir resümieren: Niemand hätte sich die Welt als so bizarr und grotesk vorstellen können, wie sie tatsächlich ist. Sie ist viel merkwürdiger als was der gesunde Menschenverstand uns glauben machen will. Gerade wenn es um die letzten Fragen nach dem Woher und Wohin unseres Universums, nach den Grenzen der Verstehbarkeit und unserer naturwissenschaftlichen Erkenntnis geht, zeigt sich die Wirklichkeit stets bizarrer und wunderlicher als unsere Phantasie. Unsere kühnsten Science-Fiction-Märchen werden von der Realität noch übertroffen. Deshalb kann der gesunde Menschenverstand an der Grenze des Wissens kein guter Ratgeber mehr sein.

Das heißt allerdings noch lange nicht, dass wir der Realität desto näher kommen, je bizarrer unsere Phantasien und Theorien sind. Letztlich werden sich auch diese Theorien empirisch überprüfen lassen müssen. Freilich: Eines der großen Dilemmas in Bezug auf Theorien an der Frontier unseres physikalischen Wissens ist der Umstand, dass die Bedingungen, unter denen solche Theorien getestet werden müssten, in unseren Labors kaum nachgestellt werden können. Dazu bedürfte es unvorstellbar großer Teilchenbeschleuniger, etwa von der Größe unseres Sonnensystems. Insofern wird man versuchen müssen, sich auf indirekte Nachweise (*circumstantial evidence*) zu beschränken. Um beispielsweise Hinweise auf Extradimensionen zu bekommen, müsste man nach Auskunft von Harvard-Professorin Lisa Randall im neuen *Large Hadron Collider* (LHC) in Genf so genannte „Kaluza-Klein-Moden“ aufzuspüren versuchen. Kaluza-Klein-Moden sind nach den Stringtheorien Teilchen in anderen Dimensionen, die aber ihre Spuren in der konventionellen Welt hinterlassen würden. „Kaluza-Klein-Moden wären Fingerabdrücke von Extradimensionen in unserer dreidimensionalen Welt.“¹⁰ Randall räumt ein, dass dies zwar nur indirekte Hinweise wären, erinnert aber daran, dass viele unserer heutigen Erkenntnisse ausschließlich auf indirekten Beweisen beruhen. „Quarks beispielsweise ... treten niemals isoliert auf; wir finden sie, indem wir den Beweisketten folgen, die sie hinterlassen, wenn sie auf andere Teilchen einwirken. Dasselbe gilt für so spannende Dinge wie die Dunkle Energie und die Dunkle Materie ... Wie Quarks oder Dunkle Materie und Dunkle Energie ... werden Extradimensionen sich uns nicht direkt offenbaren.

⁸ Keiner weiß, wofür das M steht.

⁹ Stephen Hawking, *Das Universum in der Nussschale*, S. 62-65.

¹⁰ Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 25.



Nichtsdestotrotz könnten Signaturen zusätzlicher Dimensionen, selbst wenn sie nur indirekt sind, letztlich deren Existenz bestätigen.“¹¹

Superstrings

In jüngster Zeit hat man begonnen, von der Superstringtheorie zu sprechen, einer supersymmetrischen Version der Stringtheorie. Ihr bekanntester Fürsprecher ist der Brite Michael Green. Es ist nicht nur von Superstrings und Supersymmetrien, sondern auch von Supergravitation, von Superraum und noch von anderen Superlativen die Rede. Der String erlebt derzeit wohl seine Blütezeit. Sollte die Superstringtheorie eine korrekte Beschreibung der Wirklichkeit sein, so dürfte es in der Tat 10 Dimensionen geben, neun Raumdimensionen und die Zeitdimension. Und die zusätzlichen Dimensionen müssten nicht einmal alle minutiös klein sein, sondern könnten irgendwo vor unser aller Augen versteckt sein. Gingen die meisten Wissenschaftler nämlich bisher davon aus, dass die zusätzlichen sechs Raumdimensionen sich in einen winzigen Raum aufgerollt oder „kompaktifiziert“ hätten, so dass wir ihre Existenz nicht wahrnehmen können, so haben Lisa Randall und ihr Kollege Raman Sundrum Argumente dafür geliefert, dass eine Dimension auch unendlich lang und dennoch unsichtbar sein kann, wenn nur die Raumzeit entsprechend verzerrt ist.¹²

Die heutige Stringtheorie zehrt nicht nur von zusätzlichen Dimensionen, sondern auch von so genannten „Branen“, die sich wie ein lang gesuchtes Teil in ein großes Puzzle einfügen.

Branwelten

Mitte der Neunziger Jahre führte der amerikanische Physiker Joe Polchinski die „Branen“ in die Stringdiskussion ein. Der Begriff „Brane“ rührt von „Membrane“ her, dünne Plättchen oder Häutchen, die eine Substanz, etwa eine Zelle, umhüllen oder zerteilen. Unter Branen versteht man niedrigdimensionierte Bereiche, die weniger Dimensionen haben als der umfassendere, höherdimensionierte Raum, der die Branen-Scheibchen umgibt oder an sie grenzt. 3-Branen sind Branen mit drei Dimensionen, 4-Branen sind Branen mit vier Dimensionen usw.

Stellen wir uns ein langes, dünnes Rohr vor oder einen Gartenschlauch. Wenn wir den Schlauch von ferne betrachten, käme er uns wie eine Linie vor, wie ein eindimensionaler Strich. Doch das wäre nur eine Illusion. Denn ein kleiner flacher Käfer im Innern des Schlauchs könnte munter darin umherwandern, immer an der Wand entlang. Er käme an keine Grenze und würde auf keinen Widerstand stoßen. Ihm erschiene es, als wäre der Schlauch zweidimensional. Doch auch das wäre eine Illusion, denn ein Schlauch hat drei Dimensionen. Zwei wären zwar nur sehr kurz (nämlich quer zum Schlauch), eine dritte Dimension wäre hingegen sehr lang (nämlich die ganze Länge des Schlauchs ausmachend). Flöge eine Fliege in den Schlauch hinein, so würde sie beim Hin- und Herfliegen ständig an die Grenze des Schlauches gelangen. Ihr würde die Begrenztheit der Dreidimensionalität schmerzhaft bewusst werden, nämlich jedes Mal, wenn sie ihren Kopf an den Innenschlauch stöße. Die Wahrnehmung zusätzlicher Dimensionen hängt offenbar von unserer Fähigkeit

¹¹ Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 26.

¹² Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 467-482.



ab, sich in diesen Dimensionen bewegen zu können. Wir irdischen Lebewesen sind dazu gemacht, uns in dreidimensionalen Räumen zu bewegen.

Dieses Buch ist dreidimensional. Die Seiten darin sind jedoch nur zweidimensional (wenn man einmal davon absieht, dass die Seiten eine kaum merkbare Dicke haben, die man fast nur unter dem Mikroskop sehen kann). Alle Seiten zusammen machen die Dreidimensionalität des Buches aus. Branen sind wie die Seiten dieses Buches. Unsere eigene Welt wäre eine solche Brane, allerdings mit drei Dimensionen. Wir wären Teil einer Welt mit vielen Dimensionen, könnten uns aber nur in den uns bekannten drei Dimensionen bewegen.

„Über Branen nachzudenken macht einem bewusst, wie wenig wir über den Raum wissen, in dem wir leben“, meint Lisa Randall. „Das Universum könnte eine großartige Konstruktion sein, in der intermittierende Branen miteinander verknüpft sind.“ Der Vielfalt der Branen entspräche eine Vielfalt von Raumgeometrien und Kräfteverteilungen. „Branenwelten führen zu neuen physikalischen Szenarien, die sowohl die Welt beschreiben könnten, die wir zu kennen glauben, als auch andere unbekannte Welten auf anderen unbekanntem Branen, die von unserer Welt durch unentdeckte Dimensionen getrennt sind“, meint Randall. „Andere Branen könnten parallel zu unserer liegen und Parallelwelten beherbergen ... Branen könnten unterschiedliche Dimensionen haben, Sie könnten sich krümmen. Sie könnten sich bewegen. Sie könnten sich um unentdeckte, unsichtbare Dimensionen wickeln.“¹³ Der Möglichkeiten scheinen keine Grenzen gesetzt zu sein. „Lassen wir unsere Phantasie spielen und jedes Bild entwerfen, das uns gefällt. Es ist nicht unmöglich, dass es im Kosmos eine solche Geometrie gibt.“¹⁴

Interessant ist, was Randall über mögliches Leben auf anderen Branen sagt: „Wenn es auf einer anderen Brane Leben gibt, würden diese in einer völlig anderen Umwelt gefangenen Wesen höchstwahrscheinlich völlig anderen Kräften ausgesetzt sein, die von anderen Sinnen wahrgenommen werden.“¹⁵

Branen eröffnen die Möglichkeit zahlreicher Universen oder „Multiversen“. Multiversen oder Parallelwelten bieten einen Ausweg aus einem Quantendilemma. Weil man in der Quantenwelt für Elementarteilchen nicht gleichzeitig den Ort und den Zeitpunkt voraussagen kann und dieses Teilchen seinen Aufenthaltsort erst dann festzulegen scheint, wenn wir es beobachten, spricht man in der Quantenphysik von der Unbestimmtheit oder Unschärfe. Nach der Multiversumstheorie indes könnte das Teilchen jeweils an mehreren Orten gleichzeitig auftreten – allerdings in unterschiedlichen Universen. (Oder, um Schrödingers Katze noch einmal zu bemühen: in dem einem Universum wäre sie tot, in dem anderen bliebe sie am leben.) „Wir sind nicht nur nicht das Zentrum des Universums, womit Kopernikus vor 500 Jahren die Welt schockierte, wir leben“, meint Lisa Randall, „vielleicht bloß in einem abgelegenen Winkel mit drei Raumdimensionen, der Teil eines höherdimensionalen Kosmos ist.“¹⁶

Randall hält es für möglich, dass „mit etwas Glück“ sehr bald bei Experimenten der Elementarteilchenphysik Hinweise auf Branenwelten auftauchen. „Wir könnten wirklich auf einer Brane leben – und es im Lauf eines Jahrzehnts wissen.“¹⁷ Auch wenn ich das für ausgesprochen optimistisch halte, so scheint doch die Stringtheorie ungewöhnliche

¹³ Randall, *Verborgene Universen*, S. 81.

¹⁴ Randall, *Verborgene Universen*, S. 81.

¹⁵ Randall, *Verborgene Universen*, S. 82.

¹⁶ Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 24.

¹⁷ Randall, *Verborgene Universen*, S. 83.



Möglichkeiten zu bieten, die Welt neu zu verstehen – zumindest für theoretische Physiker. Immerhin sind wir heute an einem Punkt angelangt, an dem die Stringtheorie sich auch mit der Inflationstheorie eines Alan Guth oder Andrei Linde vereinbaren lässt.¹⁸

Wir wollen jetzt aber nicht so tun, als seien Multidimensionen und Parallelwelten bereits gesicherte Tatbestände. Wir bewegen uns hier immer noch im Bereich der unüberprüften und vielleicht unüberprüfbareren Theorien. Die „Theorie von allem“ wird weiter auf sich warten lassen. An der Stringtheorie wird noch eifrig gebastelt werden, bis sie vielleicht einer ganz neuen Theorie Platz macht. Zu viele ungelöste Probleme verbleiben. „Es ist, als wäre die Stringtheorie eine wunderschöne Robe, die nicht ganz passt“, meint Randall.¹⁹ Und „solange es noch nicht gelungen ist, die Quantentheorie und die allgemeine Relativitätstheorie der Gravitation in Einklang zu bringen“, meint der Bonner Physiker Eugen Willerding, „bleibt unsere Wissenschaft moderne Mythologie.“²⁰

¹⁸ Wie Linde und Zelnikov gezeigt haben (1988), „kann die chaotische Inflation nahe der Planck-Dichte zu lokalen Veränderungen in der Zahl der kompaktifizierten Dimensionen führen, so dass das Universum [Multiversum] sich in exponentiell große Teile mit unterschiedlichen Dimensionen aufteilt.“ (Siehe Andrei Linde, Inflation, Quantum Cosmology and the Anthropic Principle, S. 9.)

¹⁹ Lisa Randall, Verborgene Universen, S. 342.

²⁰ Eugen Willerding in einem Vortrag über den Kosmos am 28. November 2007 in Mühlentahmede.