

Instinktsicherheit und überzeitliche Werte im Teilchenzoo: Erhaltungsgrößen und Symmetrien

(Paul Natterer)

Aus der Schulmathematik ist die Unveränderlichkeit oder **Invarianz** einer spiegelsymmetrischen Figur (Quadrat, Dreieck, Kreis) gegenüber **Spiegelung** an Spiegelachsen bekannt. Ebenso die Invarianz solcher Figuren gegenüber **Drehung** (Rotationssymmetrie). Symmetrie hat also mit der Erhaltung von Merkmalen von Gegenständen bei Bewegungen oder Änderungen zu tun, hier der Merkmale einer bestimmten geometrischen Figur.

In der modernen Physik wird der Begriff Symmetrie daher auf sogenannte **Erhaltungssätze** in der Natur angewandt. Die mathematische Berechenbarkeit des konkreten Gewimmels von Kraftfeldern, Teilchen und ruheloser Quantenaktivität des realen Raums kommt sehr schnell an ihre Grenzen. Daher interessieren sich die Physiker für unveränderliche Werte in diesem Gewimmel, auf die man sich gewissermaßen verlassen und auf die man Theorien und Gesetze gründen kann. Diese unveränderlichen Werte nennen sie **Symmetrien**.

- Dabei werden drei Klassen unterschieden. Die erste Klasse umfasst **geometrische Symmetrien des Raumes und der Zeit**. Hier geht es schlicht darum, dass Raum und Zeit physikalisch neutral, invariant sind und das Verhalten materieller Körper von sich aus nicht aktiv beeinflussen oder ändern. Hierher gehört das Gesetz von der **Erhaltung des Impulses** (bei Verschiebungen materieller Objekte im Raum), das Gesetz der **Erhaltung des Drehimpulses** (bei Drehung materieller Objekte im Raum), das Gesetz der **Erhaltung der Energie** (bei Verschiebung materieller Objekte in der Zeit). Hierher gehört auch die Symmetrie des Raumes oder **Raumspiegelung**, die **Parität** genannt wird (abgekürzt: P). Ferner die Spiegelsymmetrie der Zeit, die **Zeitspiegelung** oder Zeitumkehr (abgekürzt: T). Beide bedeuten die Neutralität von Raum und Zeit gegenüber der Umkehr einer Bewegung von der Zukunftsgerichtetheit in die Vergangenheit und umgekehrt. Dazu kommt die Symmetrie der elektrischen Ladungsumkehr bei den Elementarteilchen: **Ladungsspiegelung** (abgekürzt:C). Sie tritt z.B. zwischen elektrisch negativ geladenen Elektronen und ihren positiv geladenen Spiegelbildern, den Positronen auf.
- Eine große Rolle in der Physik spielt nun die Kombination von P, T und C, das sogenannte **C-P-T-Theorem**. Es besagt, dass die Gesetze der Physik unverändert über räumliche, zeitliche und Ladungsänderungen dieselben sind. Das C-P-T-Theorem gilt allerdings nicht ohne Ausnahme: P, d.h. die

Spiegelsymmetrie des Raumes wird von der schwachen Kernkraft nicht respektiert. Denn diese bevorzugt – im leeren Raum! – eine Drehrichtung. Es ist also Händigkeit (Rechts-Links-Orientierung) gegeben: ein Phänomen, was sonst erst bei komplexen Strukturen auftritt.

- Die zweite Klasse sind sogenannte **abstrakte** oder **Eichsymmetrien**. Hier geht es nicht um Neutralität gegenüber räumlichen, zeitlichen oder Ladungsveränderungen. Es geht jetzt vielmehr um Größen von Gegenständen, die unverändert bleiben, d.h. fest geeicht sind, auch wenn sich die Größen anderer Eigenschaften von Gegenständen ändern. Diese abstrakten Eichsymmetrien sind nicht nur Basis für elementare Gesetze wie den Ladungserhaltungssatz, sondern spielen eine zentrale Rolle in der Formulierung der Quantentheorie. Sie sind die Grundlage für die partiellen Vereinheitlichungen der Grundkräfte mit der speziellen Relativitätstheorie, welche **Quantenfeldtheorien** genannt werden. Die Vereinheitlichung der speziellen Relativitätstheorie mit dem Elektromagnetismus [und der Schwachen Kernkraft] ergibt die **Quantenelektrodynamik (QED)**. Die Vereinheitlichung der speziellen Relativitätstheorie mit der Starken Kernkraft ergibt die **Quantenchromodynamik (QCD)**. Die angestrebte Vereinheitlichung der speziellen Relativitätstheorie mit der QED und der QCD wird die **Große Vereinheitlichte Theorie (GVT)** genannt.
- Die dritte Klasse ist die **Supersymmetrie**, die seit Anfang der 70er Jahre des 20. Jh. erörtert wird. Diese zielt auf eine vereinfachte Theorie für die geometrische Beschreibung beider grundlegender Elementarteilchenklassen, die wir kennengelernt haben: Bosonen und Fermionen. Voraussetzung hierfür ist die besondere geometrische Figur des Fermionenraums: Ein Fermion muss nicht um 360° , sondern um 720° gedreht werden, bis es sich wieder in seiner Anfangsstellung befindet. Man kann diese **Fermionengeometrie** durch die Einführung zusätzlicher vier Dimensionen – über die 4-dimensionale Raumzeit hinaus – mathematisch in den Griff bekommen. Was man erhält, ist ein 8-dimensionaler **Hyper-Raum**. In diesem geometrischen Hyperraum ist es möglich, Gegenstände unserer gewöhnlichen Raumzeit in die zusätzlichen fermionischen Dimensionen „hineinzudrehen“ oder auszufalten. Konkret: Es lassen sich Bosonen in Fermionen verwandeln und umgekehrt. Mit anderen Worten: Fermionen und Bosonen können als zwei verschiedene Projektionen ein und derselben geometrischen Grundeinheit behandelt werden.
- Die Supersymmetrie ist also ein **Versuch zur Vereinheitlichung der Elementarteilchen**. Solche Versuche gibt es auch für den Bereich der Grundkräfte. Wir werden sehen, dass auch diese Versuche schließlich zur Supersymmetrie gelangen. Den Anfang machte der deutsche Mathematiker Theodor Kaluza. Er stellte 1921 fest, dass die damals bekannten Grundkräfte: Schwerkraft und Elektromagnetismus vereinheitlicht werden können, wenn die Allgemeine Relativitätstheorie statt auf die 4-dimensionale Raumzeit auf insgesamt 5 Dimensionen angewandt wird. Ein schwedischer Physiker, Oskar Klein, stellte 1926 die Vermutung auf, dass die Nichtbeob-

achtbarkeit einer solchen fünften Dimension nichts gegen diese Hypothese besagt, da die zusätzliche Dimension mikroskopisch klein zusammengerollt sein könne. So sieht ein Schlauch aus der Ferne wie eine Linie aus und sein Umfang nicht wie ein Kreis, sondern wie ein Punkt. Ein 4-dimensionaler Punkt der Raumzeit wäre also in Wirklichkeit in der fünften Raumdimension ein winziger Kreis mit dem Umfang 10^{-30} cm. Das ist die sogenannte **Kaluza-Klein-Theorie**. Sie trat in den 30er Jahren des 20. Jh in den Hintergrund, als man zwei weitere Grundkräfte entdeckte: die schwache und die starke Kernkraft oder starke Wechselwirkung. Jetzt ging es nicht mehr nur um die Vereinheitlichung von zwei, sondern von vier Kräften. Noch komplizierter wurde dieses Unternehmen durch die Entdeckung immer neuer Elementarteilchen und Austauscheteilchen in den 1950er Jahren.

- Ein zweiter Ansatz der Vereinheitlichung der Grundkräfte geht von der Quantenmechanik aus: Die Welt der Elementarteilchen und Austauscheteilchen ist das uneingeschränkte Reich der Quantentheorie. Also müssen sich auch die Grundkräfte der Gesetzgebung der Quantenmechanik fügen. Diese quantenmechanische Formulierung der Grundkräfte ist seit den 50er Jahren des 20. Jh. durch die sogenannte Quantenfeldtheorie in Angriff genommen und leidlich zum Abschluss gebracht worden. Es wurde oben gesagt:

Die einschlägige Theorie heißt im Fall des Elektromagnetismus die Quantenelektrodynamik (QED). Sie erstreckt sich seit der Verschmelzung des Elektromagnetismus mit der schwachen Kernkraft zur sogenannten elektroschwachen Kraft in den 60er Jahren (Glashow-Weinberg-Salam-Theorie) auch auf diese Kraft. Im Fall der starken Kernkraft heißt die entsprechende Feldtheorie die Quantenchromodynamik (QCD). Bei der späteren Verschmelzung der Quantenelektrodynamik mit der schwachen Kernkraft spielten nun die schon bekannten abstrakten Eichsymmetrien eine entscheidende Rolle. Gegenwärtig wird mit derselben Strategie auf eine Verschmelzung der QED und QCD in einer großen vereinheitlichten Theorie (GVT oder engl.: GUT) hingearbeitet.

- Angesichts dieser Entwicklungen präsentiert sich die Theorie der Schwerkraft, die Allgemeine Relativitätstheorie, als ein hartnäckiges Widerstandsnest, als bisher uneinnehmbare Festung für die quantenmechanische Interpretation und Vereinheitlichung. Versuche in die Richtung werden als **Quantengeometrodynamik (QGD)** bezeichnet.

„Die Relativitätstheorie und die Quantentheorie bilden ohne Zweifel die Grundlage der Physik des 20. Jahrhunderts. Die erste ist von hohem ästhetischem Reiz und großer Überzeugungskraft, hat aber nur eine begrenzte Anwendungsmöglichkeit. Die zweite ist zwar weniger ansehnlich, kann aber auf eine in der Wissenschaft einmalige Erfolgsbilanz zurückblicken. Die Tatsache, daß diese beiden Theorien nicht miteinander vereinbar sind, bedeutet eine tiefe und schwerwiegende Spaltung in der Physik.“ (Davis/Brown: *Der Geist im Atom. Eine Diskussion der Geheimnisse der Quantenphysik*, Basel / Boston / Berlin 1988, 71)

- Eine neue Offensive zur Wiedervereinigung der beiden getrennten physikalischen Staaten stellt die Theorie der **Supergravitation** dar. Die Idee und Strategie dabei ist wiederum die der Suche nach einem in beiden „Staaten“ gültigen Grundgesetz. Da gleichbleibende Größen oder Gesetze

von Grundlagenforschern als Symmetrien bezeichnet werden, sucht man nach einer gemeinsamen Symmetrie. Diese soll diesmal jedoch eine unveränderliche Größe und Ausgangsbasis so weit über aller bisherigen Physik sein, dass sie als Supersymmetrie bezeichnet wird. Und es handelt sich genau um die Supersymmetrie, die wir bereits kennengelernt haben, als Symmetrie mit 11 Dimensionen: 10 Raumdimensionen und 1 Zeitdimension. Diese Supergravitations-Theorie zielt einerseits darauf ab, **alle vier Grundkräfte bzw. alle Träger- oder Austauscheteilchen dieser vier Kräfte in einer Superkraft zu vereinen**. Das ist jedoch nicht alles. Sie bezweckt darüber hinaus auch die **Vereinheitlichung der Grundkräfte mit den Grundbausteinen** (Elementarteilchen), so dass Materie und Kräfte eins werden. Wir haben schon früher gesehen, dass die Supersymmetrie darauf abzielt, die beiden Klassen von Elementarteilchen, Bosonen (als Träger der Grundkräfte) und Fermionen (als Träger der Materie), zu vereinheitlichen. Dies ist der Sache nach eine Quantengeometrodynamik (QGD), d.h. eine Verschmelzung der Quantentheorie, näherhin QED und QCD, mit der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie. Denn die quantenmechanische Erklärung der elektromagnetischen Kraft und der schwachen Kernkraft (QED) sowie der starken Kernkraft (QCD) berücksichtigt jeweils nur die spezielle Relativitätstheorie. Eine zentrale Rolle bei dieser QGD spielt die Plancklänge (10^{-35} cm), die das einzige gemeinsame Grundmaß, der einzige gemeinsame Nenner gewissermaßen, von Quantentheorie und spezieller und allgemeiner Relativitätstheorie ist.

„Man nimmt an, in Abständen von der Größenordnung l_p (= Planck) sei die Geometrie der Raumzeit nicht mehr klar definiert und 'glatt', sondern durch Quantenfluktuationen wild zerzaust. So sieht ja auch die Meeresoberfläche nur aus großer Höhe glatt aus; wenn man sehr nahe kommt, löst sich in ein Gewirr von Spritzern, Schaumblasen usw. auf, die sich nur statistisch, nicht in Einzelheiten vorher-sagen lassen. Die QGD versucht nun die Elementarteilchen als typische Strukturen dieses ‚Schaums‘ zu deuten.“ (Gerthsen *Physik*, Berlin / Heidelberg / New York et al. ²¹2002, 876)

- Flankenhilfe erhielt diese Offensive, als andere Forscher die schon bekannte Kaluza-Klein-Theorie wieder aufgriffen. Sie war nämlich neuerdings interessant geworden, als sich herausstellte, dass die beiden inzwischen neu entdeckten Kräfte, die starke und die schwache Kernkraft, dem Elektromagnetismus sehr ähnlich waren. Sie laden also geradezu dazu ein, sie in einer gemeinsamen Theorie zu beschreiben: Damit wäre neben der Schwerkraft nur noch eine weitere (im weiten Sinne) elektromagnetische Grundkraft im Spiel, so dass wieder die Ausgangslage der Kaluza-Klein-Theorie erreicht ist. Denn diese rechnet bekanntlich nur mit zwei Grundkräften: Schwerkraft und Elektromagnetismus.
- Die moderne, erweiterte Kaluza-Klein-Theorie musste allerdings nicht nur die Austauscheteilchen einer einzigen Kraft, nämlich die Photonen des Elektromagnetismus, zu einem mikroskopischen Schlauch zusammenrollen und wegpacken. Sondern es mussten auch die inzwischen entdeckten Austauscheteilchen der starken und schwachen Wechselwirkung gewisser-

maßen in unsichtbare Dimensionen der Realität „weggepackt“ werden. Interessanter Weise ergeben sich auch hier insgesamt 11 Dimensionen der Raumzeit – wie bei der Supergravitation! Und: Auch hier gibt es schließlich nur noch eine einzige Kraft: die Schwerkraft. Die anderen drei Kräfte sind untergeordnete Gesichtspunkte (Symmetriebrechungen) dieser einen Kraft. Die in der Quantentheorie mit Hilfe der abstrakten Eichsymmetrie beschriebenen drei Grundkräfte der Natur (Elektromagnetismus – schwache Wechselwirkung – starke Wechselwirkung) würden auf einer höheren Ebene vieldimensionalen geometrischen Symmetrien entsprechen. Letztlich würde eine rein geometrische Gesamtheorie der Naturkräfte entstehen.

- Man könnte dies auch so auslegen, dass die Wiedervereinigung der o.g. zwei physikalischen Staaten dann so aussähe, dass die abstrakte Quantentheorie in die geometrische Relativitätstheorie eingemeindet würde ..., wenn die Theorie nicht einen verhängnisvollen Mangel hätte. Wir erinnern uns: Die schwache Wechselwirkung ist nicht paritätisch, d.h. nicht spiegelsymmetrisch im Raum. Die von ihr bestimmten Teilchen sind mit einer Rechts-Links-Händigkeit ausgestattet. Diese Händigkeit ist aber eine Eigenschaft nur und genau ungeradzahlig vieler Raumdimensionen, wie z.B. des dreidimensionalen Raums. Um die schwache Wechselwirkung einbauen zu können, muss der Raum eine ungerade Anzahl von Dimensionen besitzen und die Raumzeit folglich eine gerade Anzahl. Die Supergravitation und die erweiterte Kaluza-Klein-Theorie kommen jedoch auf eine gerade Anzahl von Raumdimensionen: 10.
- Zwei solcher Stolpersteine oder Sackgassen gibt es auch bei dem Versuch der Eingemeindung der klassischen Physik des Elektromagnetismus, der schwachen Wechselwirkung und der Allgemeinen Relativitätstheorie (Quantengravitation) in die Quantentheorie. Der eine Stolperstein sind sogenannte **unendliche Terme**. Gemeint ist, dass dabei bestimmte Eigenschaften wie z.B. die Masse und/oder Energie und/oder Ladung eines Elektrons oder Photons einen unendlich großen Wert annehmen können, der die Terme sprengt. Die dagegen angewandte Technik (die sogenannte Renormierung), auf die wir in diesem Rahmen nicht eingehen können, greift nicht in allen Zusammenhängen.
- Der zweite Stolperstein sind sogenannte **Anomalien**. Dahinter wird der Zusammenbruch einer Symmetrie in der Physik verstanden, wenn eine klassische physikalische Theorie quantentheoretisch umformuliert werden soll. Symmetrie hat, wie wir gesehen haben, mit den Erhaltungssätzen der Physik zu tun; und was hier zur Debatte steht, sind Dinge wie der Energieerhaltungssatz, der zum Eisernen Kern der Physik gehört. Einen möglichen Ausweg aus diesen Sackgassen ist die sog. **Stringtheorie** (engl. string = Saite). Sie wurde Ende der 60er Jahre des 20. Jh. vorgeschlagen, um experimentelle Befunde an den Elementarteilchen und Grundkräften zu erklären, die diese eher wie schwingende Saiten oder Fäden denn als Zusammenspiel von Punktteilchen und Austauscheteilchen von Kräften erschei-

nen ließen. Die Punktteilchen werden also in dieser Theorie durch Objekte begrenzter Ausdehnung ersetzt, in der Größenordnung der Plancklänge (10^{-33} cm).

- In den 80er Jahren des 20. Jh. wurde der Ansatz zur **Superstringtheorie** ausgebaut, als man erkannte, dass sie Platz bot für die von der Quantentheorie theoretisch geforderten Gravitonen, die Austauscheteilchen der Schwerkraft. Man musste dazu nur die String-Theorie mit der 11-dimensionalen Welt der Supergravitation verknüpfen und es bot sich die verlockende Perspektive einer allumfassenden Theorie auf dem Boden der Quantenmechanik – und der gleichzeitigen Vermeidung der beschriebenen Sackgassen. Jeder Raumpunkt wäre dann in Wahrheit eine kleine sechsdimensionale Kugel von etwa 10^{-33} cm Durchmesser. Die verschiedenen Schwingungs- und Rotationsarten dieser Strings beschreiben jeweils eine bestimmte Teilchenart wie Elektron, Quark oder Graviton. Dies ist augenblicklich die vorgeschobenste Grenze der Physik vor dem Niemandsland der Phantasie und Spekulation. Die Superstringtheorie ist so sehr eine spekulative mathematische Möglichkeit, dass viele glauben, dass sie schon im Niemandsland liegt. Sie wird folglich sehr gegensätzlich beurteilt und findet unter den führenden Vordenkern der Physik ebenso viele Gegner wie Anhänger.
- Weitere neue spekulative Lösungswege durch Rückgang von atomaren Größenordnungen (10^{-13} m) auf noch kleinere Dimensionen bis zur sog. Plancklänge (10^{-35} m) sind neben der **Superstringtheorie** einmal die **Membrantheorie**: Vereinheitlichung der Kräfte und Teilchen in der Dimension von 10^{-14} bis 10^{-19} m durch ein Mikromembranmodell des Kosmos und der Realität. Zum anderen die **Loop-Gravitationstheorie**: Vereinheitlichung der Grundkräfte und Elementarteilchen in der Planckdimension durch ein Mikronetzwerk-Modell (Spin-Netzwerke) der ultimativen physikalischen Realität