

Über die Bedeutung des “Verstehens” in der modernen Physik

Dr. Carsten Reese, Hasenkamp 4, 28790 Schwanewede

Zusammenfassung

Seit nahezu 100 Jahren versuchen Physiker die Quantenmechanik zu “verstehen”. Bis heute konnte aber trotz einer vollständigen mathematischen Beherrschung keine zufriedenstellende Antwort auf das seltsame Verhalten der Natur gegeben werden, wenn man sich in mikroskopische Größenordnungen begibt. Dieser Artikel versucht einen Ansatz aufzuzeigen, wie man sich Antworten auf den Fragen, die sich aus den dem natürlichen Menschenverstand widersprechenden Quanteneffekten ergeben, nähern könnte. Dazu gehe ich zunächst einen Schritt zurück: “Verstehen” als Terminus benötigt eine Definition, ebenso die Begriffe “Analogie”, “Modell”, “Konzept” und “Theorie”. Zusätzlich wird auch die Rolle der Mathematik im Zusammenhang mit dem Verstehen in der Physik angesprochen. Damit ergibt sich eine klare Basis für die Diskussion. Die Einschränkungen unserer Wahrnehmung und unseres Geistes, die sich aufgrund unserer Evolution in der mesoskopischen Welt ergeben, werden berücksichtigt. Dies könnte dazu führen, prinzipielle Grenzen unserer Erkenntnisfähigkeit zu identifizieren. Im Ergebnis scheint es mir vielversprechend, das, was man gemeinhin als “Theorie” in der Physik bezeichnet, durch “Konzepte” zu ersetzen, um deutlich zu machen, dass wir z.B. im Bereich der Quantenmechanik eine andere Art des “Verstehens” etablieren müssen als wir es aus der klassischen Physik gewohnt sind.

1. Einführung

Verglichen mit der klassischen Physik bis zum Ende des 19. Jahrhunderts hat sich der Begriff des “Verstehens” in der Physik drastisch geändert. Klassische Physik war in einem sehr direkten und intuitiven Weg zu verstehen. Unsere direkte sensorische Erfahrung erlaubte es, Modelle zu etablieren, die nicht in Frage gestellt werden mussten. Lediglich die richtige mathematische Beschreibung musste gefunden werden. Dies blieb auch noch richtig für komplexere Phänomene wie z.B. elektromagnetische Wellen – das Modell der “Wellen” und seine mathematische Beschreibung konnte als Analogie aus der Flüssigkeitslehre übernommen werden. Solche Vergleiche führten zu richtigen Ergebnissen, daher konnten auch (teilweise) die mathematischen Verfahren übernommen werden. Dies ist der Grund, warum “Modelle” weithin akzeptiert wurden und als Beispiele herangezogen werden, wenn es darum geht, die Natur zu verstehen und physikalisch zu beschreiben. Tatsächlich hat die moderne Physik aber gezeigt, dass die Dinge nicht so einfach sind.

Eigentlich gut bekannt, aber nicht immer wirklich wahrgenommen ist der Wandel der Nutzung von Modellen in der Physik im Bereich atomarer Größenordnungen. Offensichtlich führt eine simple Extrapolation unserer Erfahrung und unserer Sinneseindrücke auf die mikroskopische Skala nicht einfach zu einer korrekten Beschreibung der Natur. Das simple Planetenmodell eines Atoms mit Elektronen auf definierten Umlaufbahnen erklärt einige sehr fundamentale Eigenschaften und Messungen nicht. Das beginnt schon mit der Stabilität des Atoms. Beschleunigte Elektronen emittieren Synchrotronstrahlung und geben daher Energie ab. Also, wie kann ein Atom stabil sein? Schaut man sich Streuexperimente an, dann sieht man einen kleinen, harten, positiv geladenen Kern und eine große “Wolke”, die die Präsenz der Elektronen zeigt. Daraus könnte man schließen, dass es einem Planetensystem ähnlich ist. Allerdings verhält sich das Ganze nicht so, wie wir es entsprechend unserer Erfahrung und den klassischen physikalischen Gesetzen erwarten würden.

Im Beginn der Entwicklung der Quantenmechanik wurde der Ausweg aus diesem Dilemma folgendermaßen gesucht: man führte Postulate ein. Elektronen emittieren keine

Synchrotronstrahlung, wenn sie sich auf bestimmten Umlaufbahnen befinden [1]. Das ist es. Das ist ein Fakt, er ist als solcher akzeptiert, es gibt (vorläufig) keine Erklärung dafür. Aber wenn wir es akzeptieren, dann können wir rechnen und die richtigen Resultate erhalten. Das Problem dabei ist, dass wir offensichtlich nichts verstanden haben.

Gab es hinsichtlich dieses Vorgehens nun Fortschritte seit dem frühen 20. Jahrhundert? Natürlich, eine ganze Menge. Und zwar mit absolut erstaunlichen Antworten. Aber ich behaupte, dass wir bis heute nicht vollständig verstanden haben, warum Atome eigentlich stabil sind. Wir haben uns eher damit abgefunden, dass es so ist, als dass wir es verstanden hätten.

Bevor ich nun zur Diskussion des Begriffes "Verstehen" in der modernen Physik komme, möchte ich noch versuchen, die Antwort aus heutiger Sicht auf die Frage nach der Stabilität von Atomen zu geben – es ist den Exkurs wert.

Der erste Schritt auf dem Weg zu einem Verstehen ist zu akzeptieren, dass die Physik nicht skaleninvariant ist. Das bedeutet, dass die physikalische Beschreibung von Phänomenen sich mit dem Maßstab ändern muss, was gleichzeitig bedeutet, dass es einen absoluten Maßstab im Universum gibt. Das ist keine Vermutung oder eine Annahme, sondern offensichtlich. Die größtmögliche Länge im Universum ist sein Durchmesser – etwa 90 Milliarden Lichtjahre oder 8.5×10^{26} m. Als kleinstmögliche Länge können wir die Plancklänge nehmen – $1,616 \cdot 10^{-35}$ m. Bewegen wir uns auf den großen Skalenlängen, dann sind die Gravitation sowie die Struktur des Raumes und der Zeit die dominanten Effekte der Physik. Im mesoskopischen Bereich ist die klassische Physik mit ihrem emergenten Phänomenen die beste Art, um die Natur zu beschreiben, und auf den kleinen Skalenlängen unter 10^{-6} m ist die Quantenmechanik die Methode, um Berechnungen und Vorhersagen zu machen. Diese verschiedenen Theorien sind notwendig aufgrund der unterschiedlichen Kräfte und ihrem Dominanzbereich - aufgrund der unterschiedlichen Reichweite

Ein weiterer klarer Hinweis auf die nicht-Existenz einer Skaleninvarianz in der Natur (bzw. Physik) ist die Gültigkeit der Heisenbergschen Unschärferelation [2]. Der erste Schritt hierhin, gut bekannt, als die Planck-Konstante waren Plancks Untersuchungen zur Strahlung des schwarzen Körpers, die zu der Einführung der "Hilfskonstante" h , besser bekannt als die Planck'sche Konstante. Tatsächlich führte diese Naturkonstante auf der einen Seite zur "ersten Quantisierung" und damit zur Quantenmechanik, auf der anderen Seite wurde damit aber klar, dass das Universum eine absolute Skala hat. Deren fundamentaler Wert ergibt sich aus der Heisenbergschen Unschärferelation:

$$\Delta x \times \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Es ist interessant anzumerken, dass zwischen der Entdeckung der Planck'schen Konstanten [3] und Heisenbergs Unschärferelation 1927, Bohr im Jahr 1913 seine Postulate machte, um das vorhin erwähnte Atommodell zu entwickeln, das abgesehen von diesen Postulaten auf der klassischen Physik beruhte. Das Modell war in der Lage, das Spektrum des Wasserstoffatoms sehr gut zu beschreiben. Die verwendete Mathematik ist sehr einfach und ungemein überzeugend. Tatsächlich aber ist dieses Modell, verglichen mit der "wahren Realität", komplett falsch. Wir behalten das für die spätere Diskussion im Hinterkopf.

Die Unschärferelation gibt eine erstaunliche Antwort auf die Frage nach dem Grund der Stabilität der Atome: die Frage ist falsch. Etwas detaillierter lautet die Antwort, dass man keine klassische Frage stellen darf, wenn die Quantenmechanik zur Anwendung kommt. Aufgrund der Kopplung zwischen Position und Impuls gibt es einfach keine Möglichkeit, ein Elektron, das auf einen Atomdurchmesser genau lokalisiert ist, wie ein Teilchen zu behandeln. Leider ist das Problem, nur weil ich weiß, dass die

Frage falsch ist, weiß ich noch lange nicht, wie die richtige Frage und die gesuchte befriedigende Antwort darauf lauten.

Die folgenden Entwicklungen waren die mathematische Beschreibung der Quantenmechanik durch Heisenberg, Jordan and Born [4] und Schrödinger [5,6] auf zwei verschiedenen, aber betreffend die Resultate äquivalenten mathematischen Wegen. Eines der wesentlichen Erkenntnisse hieraus ist, entgegen der klassischen deterministischen Sichtweise, das die Quantenphysik nur Wahrscheinlichkeitsvorhersagen für Messergebnisse machen kann. Später wurde durch Bells geniale Ungleichung [7] und den nachfolgenden Experimenten bewiesen, dass die Quantenmechanik die korrekte mathematische Beschreibung der Natur liefert (auch wenn sie keine lokale realistische Theorie ist!!), verglichen mit einer Theorie, die versteckte Variable erfordern würde, um den Determinismus wieder herzustellen. Daher gilt also: es gibt keinen klassischen Pfad für ein Elektron im Atom, deshalb sind die Maxwell'schen Gleichungen nicht anwendbar und daraus folgend haben wir keine elektromagnetische Abstrahlung. Damit ist das Atom stabil. Das ist es in komprimierter Form.

Sicher ist das richtig. Aber irgendo unterwegs, denke ich, haben wir den Punkt verloren, die Natur der Atome und die Quantenphysik verstehen zu wollen. Was wir haben ist eine gültige und vielfach geprüfte mathematische Beschreibung und die erstaunliche Erkenntnis, dass die Grundlagen der Physik dem gesunden Menschenverstand widersprechen. Die Theorie der Quantenelektrodynamik liefert absolut und vollständig korrekte Resultate (innerhalb der heutigen Messgenauigkeit). Das ist die heutige Situation. Das, was man als Ontologie der Quantenmechanik bezeichnet, liegt dagegen weiterhin im Dunkeln. Frage: gibt es irgendeine Möglichkeit um an den Punkt zu gelangen, an dem wir im klassischen Sinn sagen würden: "ja, ich habe die Quantenmechanik verstanden"? Was bedeuten würde, wir hätten einige fundamentale und grundlegende Ideen, die klar und eindeutig die Messergebnisse erklären? Oder gibt es Gründe, die prinzipiell dagegen sprechen, dass wir diesen Punkt erreichen können? Ich werde das im folgenden besprechen, aber es mag sein, dass wir uns in letzterer Situation befinden, zumindest war sich der begnadete Physiker Feynman da ziemlich sicher: "I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics." [8]. Zu deutsch: Ich denke ich kann mit Sicherheit sagen, dass niemand die Quantenmechanik versteht.

2. Definition von Verstehen

Der Begriff "Verstehen" wird innerhalb der philosophischen Gemeinschaft ausführlich diskutiert. Als Beispiele möchte ich nur zwei Referenzen anführen: "Explaining Understanding", eine Sammlung zu diesem Thema von verschiedenen Autoren [9], und im Sinne dieses Essays eher relevant, da es sich speziell mit dem Thema Quantenphysik, dem Realismusproblem und der unzulässigen Verwendung klassischer Analogien beschäftigt: "Realism vs. Constructivism in Contemporary Physics: The Impact of the Debate on the Understanding of Quantum Theory and its Instructional Process." [10].

Natürlich gehören die philosophischen Aspekte zum Thema "Verstehen" zur Diskussion dazu, jedoch muss ich mich in diesem Artikel auf einen kurzen und praktikableren Ansatz beschränken. Ich bitte um Entschuldigung – ich bringe hier auf zwei Seiten etwas unter, über das viele Bücher geschrieben wurden. Ich kratze daher nur an der Oberfläche, hoffentlich aber tief genug für diesen Zweck.

Ich beginne mit dem Ziel der Physik:

"Physik ist eine Wissenschaft mit dem Ziel, die nicht-lebendige Natur zu verstehen" - Wenn Sie diesem Satz zustimmen, dann muss offensichtlich geklärt werden, was "Verstehen" bedeutet. "Physik ist eine Wissenschaft mit dem Ziel, die mathematischen Gesetze zu finden, die die Natur in korrekter Art und Weise beschreiben, und dies für unsere Zwecke zu nutzen." - Wenn Sie dies als Ziel der Physik sehen, dann lesen Sie den falschen Artikel, denn Sie haben das Problem gar nicht, das hier

diskutiert wird. Im übrigen: beide Definitionen sind in meinen Augen valide. Sie ziehen den Trennstrich zwischen der Grundlagenphysik und der angewandten Physik.

Bevor wir entscheiden können, ob wir etwas verstanden haben oder nicht, müssen wir definieren, was "Verstehen" bedeutet. Und das ist, wie ich unter Hinweis auf die Quellen oben schon andeutete, nicht ganz einfach.

"Verstehen" ist weder ein physikalischer Begriff noch ein Begriff irgendeiner anderen exakten Wissenschaft. Der Begriff kann nicht gemessen werden, es gibt keine prozentuale Einteilung zwischen "ich denke, ich habe eine vage Idee über die grundlegenden Prinzipien" und "ich habe es komplett verstanden". Dennoch, wenn wir entscheiden wollen, ob wir etwas verstanden haben oder nicht, dann müssen wir diesen Begriff wenigstens näherungsweise in der Art einer exakten Wissenschaft formulieren. Anders gesagt, wir müssen den Begriff objektivieren.

Einen Schritt vorwärts können wir machen, indem wir "erklären" in die Definition mit einbeziehen. Ernest Rutherford sagte: "An alleged scientific discovery has no merit unless it can be explained to a barmaid." [11]. Das kann man so lesen, dass man eine physikalische Theorie so lange nicht verstanden hat, wie man die grundlegenden Ideen nicht jemand anderem in seinen eigenen Worten erklären kann. Auch wenn "erklären" kein wissenschaftlicher Begriff ist, wird es offensichtlich, dass Verstehen ein Prozess ist, der es einem ermöglicht, eine Theorie in eigenen Worten widerzugeben statt sie nur zu wiederholen. Man sollte das Zitat nicht in der Weise lesen, dass es möglich sein muss, die Theorie jedem anderen verständlich zu machen – das klingt zwar ganz nett in einigen vermutlich falsch zugewiesenen Zitaten, aber man kann einfach nicht erwarten, dass ein sechsjähriges Kind die Theorie der elektromagnetischen Felder begreift. Und, wenn man das erwarten würde, dann müsste es das beweisen, indem es die Theorie einem anderen Sechsjährigen erklärt.

"Das Vermögen zu erklären" ist nur ein Teil der Definition des Verstehens physikalischer Theorien. Das ist die subjektive, sehr persönliche Entscheidung, die jedes Individuum für sich selbst treffen muss. Habe ich es verstanden? Diesen subjektiven Teil können wir aus dem Begriff nicht entfernen, aber wir können eine Unterstützung geben, die persönliche Entscheidung zu treffen, indem man sich folgende Fragen stellt: "Bin ich in der Lage, diese Theorie oder diesen Aspekt der Theorie jemand anderem zu erklären, und bin ich der Meinung, was ich da sage ist völlig korrekt?" Darüberhinaus: "Fühle ich mich in der Lage und vorbereitet, mögliche Fragen zu der Theorie zu beantworten?"

Glücklicherweise gibt es weitere, objektive Kriterien um zu beurteilen, ob eine physikalische Theorie von der (physikalischen) Gemeinschaft verstanden wurde oder nicht. Diese Aspekte sind:

- Verfügbarkeit einer mathematischen Basis für die Theorie (ein mathematisches Modell)
- Verfügbarkeit eines Satzes grundlegender Ideen, die in der Gemeinschaft geteilt, erklärt und diskutiert werden
- Verfügbarkeit von physikalischen Modellen und Analogien, die das Verständnis unterstützen
- Einigkeit in der physikalischen Gemeinschaft darüber, was verstanden wurde und wie es zu interpretieren ist.

Einige Bemerkungen:

1. Natürlich muss, bevor wir diskutieren, ob wir verstanden haben, zunächst der Beweis erbracht werden, dass eine Theorie die Anforderungen laut Popper [12] an eine wissenschaftliche Theorie überhaupt erfüllt. Als wesentlicher Aspekt muss eine Theorie Vorhersagen generieren, die überprüfbar sind, um sie prinzipiell widerlegen zu können. Ist das nicht der Fall, redet man bestenfalls von einer Möglichkeit, aber nicht von einer wissenschaftlichen Theorie.

2. Auf die Begriffe Modell und Analogie gehe ich weiter unten näher ein. Diese Begriffe werden derzeit in einer Art und Weise genutzt, die zu viel Verwirrung führt.

3. Die Einstimmigkeit in der physikalischen Gemeinschaft kann als Gradmesser für die erreichte Tiefe des Verständnisses einer Theorie genutzt werden. Je besser die Übereinstimmung, um so mehr endieren wir dazu, etwas als "verstanden" zu akzeptieren.

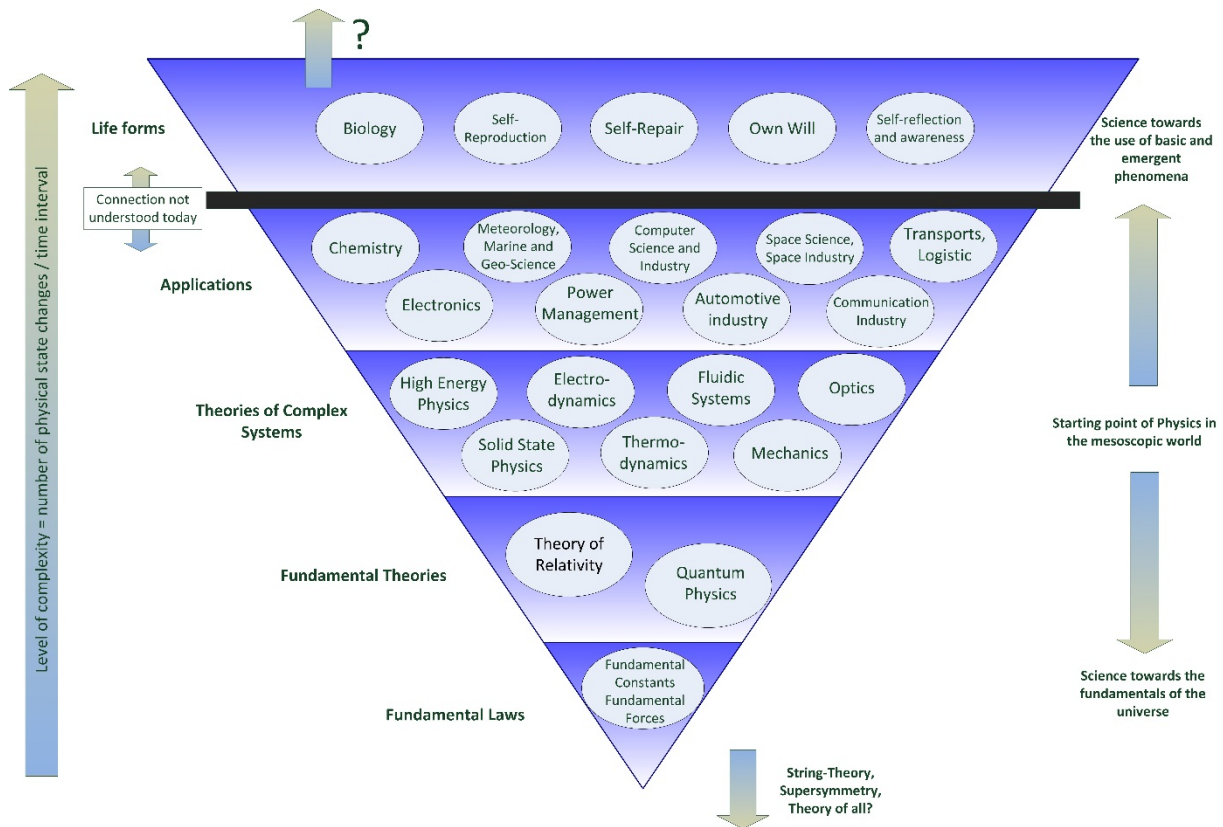


Fig. 1: Physik und Komplexität

4. Komplexität und Verstehen: Physikalische Gesetze lassen sich in einem auf dem Kopf stehenden Dreieck arrangieren (Fig. 1). Einige fundamentale Gesetze und Naturkonstanten beschreiben einfache und reine Systeme. Komplexere Systeme zeigen emergente Erscheinungen, die Vereinfachungen zur Beschreibung erfordern (z.B. Näherungsrechnungen). Stellt man die Frage "Warum ist das so?" auf einer Stufe höherer Komplexität, so kann dies unter Bezugnahme auf die weniger komplexe, darunter liegende Stufe erklärt werden. Ist das der Fall, so ist die Stufe höherer Komplexität verstanden. Interessanterweise können wir auf der komplexesten Stufe (Lebensformen) genau diesen Bezug zur darunter liegenden Stufe nicht erklären - "Leben" ist heute also nicht verstanden. Stellt man die Frage "Warum ist das so?" wiederholt, so landet man auf der untersten, der fundamentalen Stufe. Das Problem, "Verstehen" zu definieren, liegt nur auf dieser untersten Stufe, denn auf höheren Stufen kann ich immer die Erklärung über den Verweis auf die darunter liegende Stufe erreichen.

Mit dieser Definition oder vielleicht besser Klarstellung zum Verstehen, auch wenn sie nicht perfekt ist, kann man es nun auf die moderne Physik anwenden.

3. Analogien, Modelle, Konzepte und Theorien unter dem Aspekt "Verstehen"

Ich habe es schon einmal angemerkt: die Natur verhält sich nicht, wie wir es nach dem gesunden Menschenverstand erwarten würden. Aber ist das wirklich eine Überraschung? Tatsächlich ist es das nicht. Im Gegenteil, es wäre überraschend, wenn die Natur sich in allen Aspekten so verhalten würde, wie wir das aufgrund unserer limitierten Erfahrung erwarten würden. Limitiert meint dabei: mit unseren Sinnen ist es uns nur möglich, die mesoskopische Welt innerhalb bestimmter Größenordnungen direkt wahrzunehmen. Unsere Entwicklung gemäß Darwin benötigte nur diesen limitierten Ausschnitt der Wahrnehmung, um überleben zu können ("survival of the fittest"). Daher sind unsere Sinne und unsere Denkstrukturen nützlich in unserer mesoskopischen Welt, haben aber keine zwingende Verbindung zu den universalen Strukturen des Alls oder zu der mikroskopischen Welt [13]. Durch die Verwendung objektiver Messsysteme und Verfahren sind wir dennoch in der Lage, die mikroskopische und auch die Welt der großen Skalen unseren Sinnen zugänglich zu machen – durch eine Transformation der Messungen in den Messinstrumenten in unsere den Sinnen zugängliche Welt (durch "Zeigerausschläge"). Allerdings tendieren wir dazu, uns auch diese Dinge entsprechend unserer Fähigkeiten zu erklären. Wir erfinden Analogien und Modelle für diese Übersetzung und verlieren damit die Möglichkeit, die Natur so zu akzeptieren, "wie sie ist". Das ist ein ziemlich sicherer Weg, um "Verstehen" in der Physik im nebulösen entschwinden zu lassen und den Pfad zu verlieren, um wirkliche Erkenntnis zu gewinnen.

Analogien können hilfreich sein, daran besteht kein Zweifel. Aber sie sollten auch deutlich als solche kenntlich gemacht werden, wenn man sie benutzt. Wenn ich verschiedene physikalische Effekte in einigen Aspekten ähnlich finde, dann können Analogien dabei unterstützen, die richtigen mathematischen Methoden zur Beschreibung zu finden bzw. sie wiederzuverwenden. Oftmals, wenn eine gute Analogie gefunden wird, entsteht ein "Aha"-Effekt. Diese subjektive Empfindung sollte man allerdings nicht mit "Verstehen" verwechseln - im besten Fall ist dieser Prozess ein Schritt auf dem Weg zum Verstehen, aber der Beweis steht in dem Moment noch aus.

Um hier etwas akkurater vorzugehen werde ich nun die Begriffe Analogie, Modell, Konzept und Theorie so definieren, wie sie in diesem Artikel verwendet werden. Ich bitte um Entschuldigung, wenn ich damit womöglich in manchen Punkten von der üblichen Wikipedia-Definition abweichen muss.

Analogie:

Eine Analogie nimmt nicht für sich in Anspruch, etwas so zu beschreiben "wie es ist". Analogie meint: Ich kann dieses (in einigen Aspekten) so behandeln wie ein anderes Phänomen (eine physikalische Erscheinung), weil es sich ebenso oder zumindest ähnlich verhält. Eine Analogie verbindet mehrere Phänomene. Damit sind Analogien eine Hilfe, bestimmte Arten von Phänomenen zu klassifizieren, ohne das damit jedoch ohne weiteres gesagt werden könnte, dass man ein Phänomen verstanden hat. Wenn basierend auf Analogien Berechnungen durchgeführt werden und diese nicht mit den Messungen übereinstimmen, so verliert die Analogie nicht ihre Gültigkeit. In aller Regel wird man sagen: dieser Aspekt wird durch die Analogie nicht richtig wiedergegeben, die Analogie hat ihre Grenzen. Trotzdem kann man sie weiter nutzen.

Modell:

Erstelle ich in der Physik ein Modell, so ist die Absicht dahinter, das Phänomen zu verstehen. Ein Modell soll die Wirklichkeit so weit möglich reflektieren und darf keine Widersprüche aufweisen. Ein anerkanntes Modell bedeutet in der physikalischen Gemeinschaft die übereinstimmende Meinung, dass dieses Phänomen verstanden wurde. Ein Modell beschreibt ein physikalisches Phänomen. Zur Erinnerung: für emergente Phänomene ist das unzweifelhaft möglich, für die Grundlagen der Physik jedoch nicht – hier taucht plötzlich die ontologische Frage nach der „wahren Natur“ der Dinge auf. Auch für diese Grundlagen gilt allerdings: wenn Berechnungen auf der Grundlage eines Modells gemacht werden, die nicht den Messergebnissen entsprechen, dann muss das Modell falsch sein („es bildet die Wirklichkeit nicht ab“) oder kann im besten Fall korrigiert werden.

Ein Modell besteht aus einem Satz grundlegender Ideen, die ein physikalisches Phänomen beschreiben, und dem mathematischen Hintergrund, um Berechnungen und Vorhersagen machen zu können.

Konzept:

Der Unterschied zwischen einem Modell und einem Konzept ist grundsätzlich, dass ein Konzept keine Beschreibung eines Phänomens liefert. Es wird einfach darauf verzichtet, die grundlegenden Ideen der Sinneswelt im mesoskopischen Bereich begreiflich zu machen. Wie bei einem Modell auch, basiert ein Konzept auf Ideen in Bezug auf das physikalische Phänomen sowie dem mathematischen Hintergrund. Es bildet ein geschlossenes logisches System. Sofern ein Konzept existiert, können wir von einem „indirekten Verständnis“ sprechen. Wir haben alles Beschreibende richtig bei der Hand, erzeugen aber kein Abbild in unserem Kopf, das „der Realität entspricht“, weil wir davon ausgehen, dass das unmöglich ist.

Der Vorteil ist, dass man so das ontologische Problem ausklammert, auf Kosten allerdings des klassischen Begriffs „Verstehen“.

Theorie:

Eine Theorie ist eine gültige Beschreibung eines physikalischen Phänomens. Üblicherweise basiert eine Theorie auf Analogien, Konzepten oder Modellen. Berechnungen, die aufgrund einer Theorie gemacht werden, müssen in Übereinstimmung mit den Messungen sein, solange der (bekannte) Gültigkeitsbereich der Theorie nicht verlassen wird (Beispiel: Newtons Mechanik, solange Relativität zu vernachlässigen ist, Gasgleichungen in einem bestimmten Temperaturbereich usw.). Eine Theorie zielt vorwiegend darauf ab, erkannte physikalische Gesetzmäßigkeiten zu nutzen, nicht aber zwingend die Phänomene verstehen zu wollen. Die Bedingungen, unter denen eine physikalische

Theorie als solche bezeichnet werden darf, sind in hervorragender Weise von Popper (s. Zitat oben) beschrieben worden.

Wenden wir diese Definitionen nun auf die Quantenmechanik an, so sehen wir, dass wir bis heute kein Modell entwickelt haben, sondern nur Analogien und Konzepte. Das Bohr'sche Atommodell mag am Anfang tatsächlich als ein Modell verstanden worden sein, aber es änderte sich sehr schnell in eine Analogie zu einem Planetensystem. Akzeptieren wir, dass der Welle-Teilchen Dualismus kein Modell ist, sondern zwei verschiedene Analogien, dann wird sehr schnell klar, dass Feynman mit seinem Zitat von oben Recht hat: kein Mensch auf dieser Welt versteht bis heute die Quantenmechanik. Trotzdem haben wir ausgezeichnete Theorien für diesen Bereich.

Bleiben wir noch einen Moment beim Welle-Teilchen Dualismus. Wir wissen, dass Teilchen sich unter gewissen Umständen wie Wellen verhalten und umgekehrt. Tatsächlich sind Welle und Teilchen dasselbe, nur zeigen sie wie eine Münze einmal die eine und einmal die andere Seite (um eine Analogie zu benutzen). Indem wir beide Seiten kennen, haben wir offensichtlich aber noch keine Idee des Ganzen: es fehlt ein Modell, das uns mittels eines Satzes „anschaulicher“ Ideen das zugrunde liegende „Münze“ verstehen lässt, statt nur zwei Seiten von irgendetwas zu betrachten. Überraschenderweise war bis heute niemand in der Lage, ein solches Modell zu entwickeln. Der Grund dafür ist vermutlich, dass mesoskopische Phänomene emergente Phänomene sind und mikroskopische, fundamentale Phänomene sich hiervon komplett unterscheiden. Deshalb sind wir nicht in der Lage, in unserer mesoskopischen Welt eine geschlossene Analogie zu finden, die als Startpunkt hergenommen werden könnte, ein Modell zu entwickeln. Unsere Evolution hindert und daran, andere Denkansätze zu finden und unsere Gedanken so weit zu öffnen, dass wir radikal andere Ansätze suchen. Immerhin, wir haben Konzepte, nämlich die zweite Quantisierung und die Quantenfeldtheorie. Dieses Konzept entfernt die Widersprüche aus dem Welle-Teilchen Dualismus, ja sieht ihn sogar als zwingende Folgerung aus sehr grundsätzlichen Ideen. „Den Rest meines Lebens will ich damit zubringen, darüber nachzudenken, was Licht ist.“, sagte Einstein, ein Mann, der nun wirklich den Beweis geliefert hat, dass er seinen Blickwinkel komplett ändern konnte, um Physik zu verstehen. Offensichtlich war er der Meinung, dass das Konzept verbessert werden kann.

Wären wir präziser in der Nutzung der Bezeichnungen Analogie, Modell, Konzept und Theorie, so würde das vermutlich helfen, Missverständnisse in der Physik zu vermeiden. Insbesondere wenn versucht wird, komplexe Theorien wissenschaftlich nicht speziell ausgebildeten Personen zu erläutern, scheint die Nutzung von Analogien, die dann fälschlich als Modelle bezeichnet werden, ein inflationärer Trend. Es sieht nach einem Zusammenhang aus: je weniger wir über die Physik wissen, desto mehr werden (irreführende) Analogien benutzt. Unglücklicherweise hat dies auch eine Auswirkung auf das Denken der physikalischen Gemeinschaft. Wir haben die Quantenmechanik bis jetzt nicht wirklich verstanden, also kann es wirklich hilfreich sein, solche Analogien wie Saite (string), (Mem)brane (brane) usw. in physikalischen Grundlagenbereichen zu nutzen, als ob sie eine tatsächliche Entsprechung in der Natur hätten?

4. Mathematik und Verstehen

Nochmals, die Natur verhält sich anders, als es der gesunde Menschenverstand erwarten würde. Allerdings gibt es eine Grundlage, die über jeden Zweifel erhaben ist: Logik. Wenn die Natur nicht strikt logisch wäre, wäre die Mathematik nicht das richtige Werkzeug, um sie zu beschreiben. Tatsächlich gibt es bis heute nicht eine nachgewiesene Tatsache, dass die Natur sich entgegen mathematischer Logik verhalten würde. Sie verhält sich nicht immer so, wie eine mathematische Theorie es vorhersagt, aber in diesen Fällen ist die Theorie nicht geeignet, den entsprechenden Aspekt der Natur richtig zu beschreiben, und nicht etwa, weil es eine Verletzung einer logischen Kette gäbe.

Die Mathematik ist ein Werkzeug, um die Logik der Physik (der Natur) sichtbar und nutzbar zu machen. Sofern wir die Logik der Natur nicht verstanden haben, bleibt jede mathematische Theorie eines physikalischen Phänomens ein Versuch, oder, wenn die Resultate zu den Beobachtungen passen, eine Möglichkeit. Die Mathematik selbst kann nur eine mögliche Lösung anbieten, aber sie erlaubt nicht den Schluss, dass diese Lösung exakt die physikalische „Wirklichkeit“ wiedergibt. Trotzdem, das Finden einer mathematischen Lösung hilft oft dabei, Fortschritte auf dem Weg hin zu einem Verständnis der zugrunde liegenden Physik zu machen.

Mathematik ist beschreibend. Um ein Beispiel zu geben, die Kepler'sche Kinematik war eine empirische Anpassung zu den Messungen Tycho Brahes über die Bewegungen der Planeten. Die abgeleiteten mathematischen Regeln beschreiben diese Bewegungen sehr gut, aber es ergibt sich daraus kein Verständnis, warum diese Bewegungen so sind. Um diesen Schritt zu machen bedurfte es der Newtonschen Dynamik, die mit den Gravitationskräften zwischen Massen beginnt. Ausgehend hiervon war es möglich, die Keplerschen Gleichungen auf ganz natürliche Weise, basierend auf einem einfachen Modell, oder, wenn man es vorzieht, basierend auf wenigen Prinzipien, herzuleiten.

Daher gilt: die mathematische Beschreibung eines physikalischen Phänomens kann nie eine Erklärung für dieses Phänomen liefern! Dies scheint mir in der modernen Physik manchmal nicht präsent zu sein. Wenn also mathematische Theorien zur Physik entwickelt werden (ein notwendiger und willkommener Prozess!), so müssen sie von Zeit zu Zeit auf die Natur rückgekoppelt werden, um zu zeigen, dass das theoretische Konstrukt eine Entsprechung in der Natur hat. Mathematik ist das stärkste Werkzeug der Physik, aber eben ein Werkzeug. Ein bewiesenes mathematisches Konzept, dass das Verhalten der Natur richtig beschreibt, ist nur ein Schritt hin zum Verstehen der Natur. Es ist notwendig, aber nicht hinreichend für das Verstehen.

5. Ausblick

Werden wir in der Lage sein, die Grundlagen der Physik im Sinne von Modellen zu verstehen, wie sie in diesem Artikel beschrieben wurden?

Vermutlich nicht in vollem Umfang. Seit mehr als 100 Jahren sind Physiker nun in der Situation, dass die Anwendung von Theorien die klassische mesoskopische Welt verlassen hat. Seitdem wird versucht, Modelle zu finden, die einen klaren und direkten Zugang zur Quantenmechanik und der Relativitätstheorie ermöglichen und sie damit verständlich machen würden. Offensichtlich müssen wir akzeptieren, dass dieser klassische Weg zum Verstehen, nämlich durch Finden von Analogien und Modellen zu unserer direkt erfahrbaren mesoskopischen Welt, nicht funktioniert. Darüber hinaus zeigt sich, dass selbst die fundamental geglaubten Gegebenheiten wie Realismus und Lokalität nicht mehr gelten oder zumindest einer gründlichen Revision zu unterziehen sind. Für neue Entwicklungen wie die große vereinheitlichte Theorie, Dunkle Materie und Dunkle Energie, oder mathematische Annäherungen wie die String-Theorie und Supersymmetrie wird es ähnlich sein, wahrscheinlich noch komplexer. Aufgrund unserer Evolution sind wir weder an das Überleben in einer Quantenumgebung angepasst, noch sind wir ausgerüstet für ein Empfinden auf Skalen, die die Größe des Universums erreichen.

Trotzdem können wir Konzepte entwickeln. Ohne Rückgriff auf rein mathematische Beschreibungen wird es möglich sein, Ideen zu formulieren, die nicht mit der Alltagserfahrung übereinstimmen. Die Ideen, die gebraucht werden, werden überraschen, sie werden abseits der Erwartungen sein und eine neue Sicht auf die Physik eröffnen. Die reine Anzahl an aktuellen Rätseln in der Physik zeigt, dass wir weit entfernt von dem Punkt sind, an dem man die Physik für abgeschlossen erklären würde. Das Standardmodell ist nicht komplett, und mit jedem Jahr der Forschung werden die Löcher größer und offensichtlicher.

Dabei werden wir zu akzeptieren haben, dass Verstehen in Bezug auf die Grundlagen der Physik anders sein wird als das, was gemeinhin als Verstehen bezeichnet wird. Eine Diskussion auf rein mathematischer Ebene wird nicht helfen, die Natur zu verstehen, da diese nur eine Beschreibung des Naturverhaltens liefert. Darüber hinaus wird die Zahl der beteiligten Menschen reduziert, was einer Diskussion der Bedeutung entgegensteht. Wir sollten allerdings nicht versuchen, Analogien zu finden, die unserer Sinneserfahrung entsprechen – dies wäre irreführend und würde uns daran hindern, zumindest in eingeschränktem Umfang verstehen zu können. Der gesunde Menschenverstand ist tatsächlich kein guter Führer durch das Labyrinth der modernen Physik, vielmehr sind dies Logik und neue, unabhängige Ideen.

References:

- [1] Bohr, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I - III. Philosophical Magazine 26.
- [2] Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. Zeitschrift für Physik Volume 43, Issue 3-4, pp. 172-198.
- [3] Planck, M. (1899). Über irreversible Strahlungsvorgänge, fünfte Mitteilung. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1899 - Erster Halbband, pp. 440 - 480.
- [4] Born, M. H. (1926). Zur Quantenmechanik II. P. Z. Physik (1926) 35, pp. 557 - 617. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01379806>
- [5] Schrödinger, E. (1926 (1)). Quantisierung als Eigenwertproblem. Annalen der Physik, pp. 361, 489 (Bd. 79) und 109 (Bd. 81).
- [6] Schrödinger, E. (1926 (2)). Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen. Annalen der Physik, 79, p. 734.
- [7] Bell, J. S. (1964). On the Einstein Rosen Podolsky Paradox. Physics, Vol. 1 No. 3, p. 195.
- [8] Feynman, R. (1965). The Character of Physical Law. British Broadcasting Corporation.
- [9] Grimm, S. R., Baumberger, C., & Ammon, S. (2017). Explaining understanding – New Perspectives from Epistemology and Philosophy of Science. Routledge.
- [10] Karakostas, V., & Hadzidaki, P. (2005). Realism vs. Constructivism in Contemporary Physics: The Impact of the Debate on the Understanding of Quantum Theory and its Instructional Process. P. Sci Educ 14, p. 607. doi:<https://doi.org/10.1007/s11191-004-5156-1>
- [11] Whitrow, G. J. (1973). Einstein: The Man and His Achievement. Dover Publications.
- [12] Popper, K. (1934). Logik der Forschung. (H. Keuth, Ed.)
- [13] Vollmer, G. (1975). Evolutionäre Erkenntnistheorie. Stuttgart: Hirzel.