Quantenmechanik - Plan B

Stefan Freundt
Deutschland
stefan.freundt@web.de

Zusammenfassung

As Richard Feynman said roughly 50 years after discovering quantum mechanics: „On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.“[1]

And to this day, no one has yet found a good explanation for wave-particle duality, nonlocality or wave function collapse. The discussion seems rather to have been resolved and no longer to be so important. The success is too great, and the level of precision too high with which predictions can be made using quantum mechanics and subsequent theories (quantum electrodynamics and quantum chromodynamics).

This is absolutely sufficient for an engineer. He can use this knowledge to build laser diodes and make the world a better place.

Physicians, however, who want to know „what holds the world together in its inmost folds“, will seek an interpretation of the wave function. And these physicians have been puzzling their brains for approximately 100 years without any success.

The same mathematics which helps quantum mechanics make their precise predictions, however, also provide a way out of this dilemma. This approach frees us from interpreting wave-particle duality and explaining wave function collapse. In return, however, it questions all differential calculus approaches used as well as our continuous space. It calls for a search for a relativistic ether and for a structure of elementary particles.

„Auf der anderen Seite denke ich, es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik.“ [1] Dies äußert Richard Feynman ca. 50 Jahre nach ihrer Entdeckung. Und bis heute hat niemand eine gute Erklärung für den Welle-Teilchen-Dualismus, die Nichtlokalität, den Kollaps der Wellenfunktion... gefunden. Die Diskussion scheint eher beigelegt und nicht mehr so wichtig. Zu groß sind die Erfolge, zu hoch ist die Genauigkeit, mit der Vorhersagen in der Quantenmechanik und den Nachfolgetheorien (Quantenelektrodynamik und Quantenchromodynamik) gemacht werden können. Für einen Ingenieur ist dies vollkommen ausreichend. Er kann mit diesem Wissen Laserdioden bauen und die Welt verbessern. Aber ein Physiker, der wissen will, "was die Welt im Innersten zusammenhält", wird nach einer Interpretation der Wellenfunktion fragen. Und diese Physiker zerbrechen sich schon seit ca. 100 Jahren ergebnislos den Kopf. Dabei liefert die gleiche Mathematik, die der Quantenmechanik zu ihren genauen Vorhersagen verhilft, auch einen Ausweg aus obigem Dilemma. Dieser Ansatz befreit von einer Interpretation des Welle-Teilchen-Dualismus und einer Erklärung des Kollaps der Wellenfunktion. Er stellt im Gegenzug aber die gesamte verwendete Differentialrechnung und unseren kontinuierlichen Raum in Frage. Es wird zur Suche nach einem relativistischen Äther und einer Struktur der Elementarteilchen aufgefordert.

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation, Annahmen und Definition für Verständnis

1.1 Motivation

„Auf der anderen Seite denke ich, es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik.“ [1] Dies äußert Richard Feynman ca. 50 Jahre nach ihrer Entdeckung.
Und bis heute hat niemand eine gute Erklärung für den Welle-Teilchen-Dualismus, die Nichtlokalität, den Kollaps der Wellenfunktion . . . gefunden. Die Diskussion scheint eher

beigelegt und nicht mehr so wichtig. Zu groß sind die Erfolge, zu hoch ist die Genauigkeit, mit der Vorhersagen in der Quantenmechanik und den Nachfolgetheorien (Quantenelektrodynamik und Quantenchromodynamik) gemacht werden können.
Wir haben mit der Quantenmechanik einerseits eine Theorie, die sehr genaue Vorhersagen liefert. Andererseits können wir nicht erklären, wie die Objekte der Quantenmechanik, die Elementarteilchen, dies verwirklichen. Wir kennen beim Elektronen etwa ein halbes Dutzend Eigenschaften (Ladung, Masse, Spin,...). Aber keine dieser Eigenschaften deutet an, warum und wie die Elektronen die Schrödinger Gleichung lösen.

Der Formalismus läuft immer so ab:
1. Aus der Schrödinger Gleichung folgen Energiewerte und Wellenfunktion.
2. Aus der Wellenfunktion folgt deren Betragsquadrat, dem wir eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit zuordnen können.
3. Diese können wir durch Messungen bestätigen.

Für einen Ingenieur ist dies vollkommen ausreichend. Er kann mit diesem Wissen Laserdioden bauen und die Welt verbessern.

Aber ein Physiker, der wissen will, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, wird nach einer Interpretation der Wellenfunktion fragen. Und diese Physiker zerbrechen sich schon seit ca. 100 Jahren ergebnislos den Kopf.

Ich werde einen Weg aufzeigen, der einerseits den Formalismus der Quantenmechanik unangetastet lässt. Andererseits ist es danach vollkommen überflüssig nach Erklärungen für den Welle-Teilchen-Dualismus und den Kollaps der Wellenfunktion zu suchen.

Physiker, die wie Goethes „Faust“ denken, werden von ihren Kopfschmerzen befreit und erhalten zudem ein weites Betätigungsfeld.

1.2 Annahmen

1. Ich nehme im Folgenden an, dass Elektronen und die anderen Elementarteichen wirklich existieren und mit einander wechselwirken. Entsprechend ordne ich ihnen eine gewisse Lebendigkeit zu.

2. Ich nehme an, das es keine Unendlichkeiten gibt.
In den letzten 400 Jahren haben die Mathematiker ein System von Regeln geschaffen, mit dem wir widerspruchsfrei mit Unendlichkeiten rechnen können. Aber wenn wir Objekten Eigenschaften mit dem Messwert Unendlich zuordnen, dann machen wir es ihnen auch unendlich schwer, dies zu verwirklichen. Der interessierte Leser kann einmal einige Werte der unter dem Namen "Feldfrau"bekannten Funktion berechnen:

$F(0, m) = m + 1$
$F(n + 1, 0) = F(n, 1)$
$F(n + 1, m + 1) = F(n, F(n + 1, m))$

Es wird nur wenigen Lesern gelingen FF(9,9) zu berechnen. Und doch liegt dieser Wert weit unterhalb von Unendlich. (Auf eine Quelle wurde mit Absicht verzichtet, da der Leser die Funktion selber berechnen soll.)

1.3 Definition für Verständnis

Wir verstehen einen anderen Menschen, wenn wir uns in dessen Lage versetzen können. Ich werde diese Definition für Verständnis auf Elementarteilchen wie Elektronen, Photonen,... anwenden.

2 Mathematik und Aussagenlogik

2.1 Logische Schlussfolgerungen

In der Mathematik gibt es als ein Teilgebiet die Aussagenlogik. [2] Eine Aussage ist ein Satz, dem man einen Wahrheitswert zuweisen kann.
„Die Straße ist nass.“ - ist eine Aussage. Wenn die Straße nass ist, ist die Aussage wahr und wenn die Straße trocken ist, ist die Aussage falsch.
„Es gibt Außerirdische.“ ist noch keine Aussage, da man ihr zurzeit keinen Wahrheitswert zuweisen kann.
Neben Verknüpfungen mit „Und“ und „Oder“ werden in der Aussagenlogik auch Schlussfolgerungen (Implikationen) untersucht. Man geht von einer Voraussetzung aus und untersucht, wie sich der Wahrheitswert bei richtigem logischen Schließen ändern kann.
Es gibt 4 Fälle für die Wahrheitswerte von Voraussetzung und Schlussfolgerung:

Nr.	Voraussetzung	Schlussfolgerung
1.	wahr	wahr
2.	wahr	falsch
3.	falsch	wahr
4.	falsch	falsch

Die Aussagenlogik sagt: Aus etwas Wahrem kann man durch korrekte Umformungen nur zu etwas Wahrem kommen. Dies entspricht dem Fall 1. in obiger Tabelle.

Kommt man von etwas Wahrem zu etwas Falschem, ist die Umformung nicht korrekt. Im Fall 2. hat man somit bei seiner Umformung einen Fehler gemacht.

Man kann von etwas Falschem durch korrekte Umformungen zu etwas Wahrem aber auch zu etwas Falschem kommen (3. und 4.).

Für gewöhnlich behandelt die Aussagenlogik nur den 1. Fall.

Ich will hier aber auf den 3. Fall ausführlicher eingehen. Dieser besagt: Man kann von etwas „Falschem“ ausgehen und durch korrekte Umformungen zu etwas „Wahrem“ kommen. - Jeder Mathematiker weiß das. -

Beispiel aus dem Alltag: 1. Wenn es regnet ist die Straße nass. Daraus kann man aber nicht umgekehrt schließen: „wenn die Straße nass ist, hat es geregnet.“ Das mit dem Regen kann durchaus falsch sein. Kinder könnten mit Wasserspritzpistolen gespielt haben. Auch dann wäre die Straße nass und es hätte nicht regnen müssen. Oder jemand könnte einen Eimer Wasser auf die Straße gegossen haben. Auch dann ist die Straße nass, auch wenn es nicht geregnet hat.

2.2 Beispiele aus der Mathematik

1.

	$-1 = +1$	ist falsch
		jetzt beide Seiten quadrieren
	$+1 = +1$	ist wahr

Wir sind gerade von etwas Falschem ausgegangen, haben beide Seiten quadriert und sind zu etwas Wahrem gekommen. Dies wird später noch wichtig.

2.

	$+i = +1$	ist falsch
		bilde auf beiden Seiten den Betrag dieser komplexen Zahl
	$+1 = +1$	ist wahr

Man kann sich schnell von Folgendem überzeugen: Im Bereich der komplexen Zahlen haben unendlich viele den jeweils gleichen Betrag. Nimmt man zwei komplexe Zahlen z1 und z2 mit $|z1| = |z2|$ so konstruieren wir ganz allgemein folgende Schlussfolgerung:

	$z_1 = z_2$	ist im Allgemeinen falsch
		auf beiden Seiten den Betrag bilden
	$\|z_1\| = \|z_2\|$	ist richtig

Man kann durch Quadrieren somit sehr gut aus etwas Falschem etwas Wahres produzieren.

3.

	$\pi = 2\pi$	ist falsch
		berechne $sin(x)$ mit $x = pi$ bzw. $x = 2\pi$
	$0 = 0$	ist wahr

2.3 Beispiel aus der Physik

Für das wohl populärste Beispiel in der Physik möchte ich den Leser bitten, sich in eine Zeit zurück zu versetzen, in der es nachts noch so dunkel wurde, dass man seine Hand vor Augen nicht sehen konnte. Nehmen wir an, wir hätten das Jahr 1492. Columbus ist

gerade dabei Amerika mit Schiffen zu entdecken, die etwa so lang sind, wie ein Tennisfeld [3],[4].
Jetzt beobachten wir den Nachthimmel und berücksichtigen die Rotation der Erde um ihre eigene Achse. Dann sieht man sogenannte Fixsterne, die ihre Position zueinander nicht ändern. Nur einige Wandelsterne (Planeten) haben Nacht für Nacht eine etwas andere Position verglichen mit den Fixsternen. Um die Position dieser Wandelsterne für die nächste Nacht vorherzusagen, entwerfen wir folgendes Modell: Die Wandelsterne bewegen sich auf einer Kreisbahn um die Erde. Nacht für Nacht sind sie somit an einem anderen Punkt auf ihrer Kreisbahn sichtbar. Führt man diese Beobachtungen einige Jahre durch, kann man noch folgenden Effekt beobachten: Der Wandelstern bleibt stehen und bewegt sich auf seiner Kreisbahn für einige Wochen in die entgegengesetzte Richtung. Er bleibt dann abermals stehen und wechselt dann wieder in die ursprüngliche Richtung. Um diese Beobachtung zu erklären, fügen wir einen kleinen Kreis in den großen Kreis ein, auf dem sich der Wandelstern in seiner rückläufigen Phase bewegt. Man sehe sich nur einmal folgendes Bild an http://www.starobserver.org/ap100613.html [5]. Der Mars ist hier von Mitte Dezember 2009 bis Anfang März 2010 rückläufig.

Ein solches Modell hat viele Vorteile:
1. Es ist leicht vermittelbar. Man kann dieses Modell leicht einem anderen Menschen erklären. Dadurch erfährt es schnell eine hohe Verbreitung.
2. Das obige Modell verwendet als Grundbestandteil einfache Objekte, nämlich Kreise.
3. Auch die Korrekturen, die Rückläufigkeit der Wandelsterne, konnte leicht erklärt werden. Und auch hier werden Kreise verwendet.
4. Das Modell liefert Vorhersagen, die sehr gut mit den Beobachtungen übereinstimmen.

Heute wissen wir es besser: Die Planten bewegen sich auf ziemlich guten Kreisen um die Sonne und nicht um die Erde. Das bedeutet: Obwohl unser obiges Modell von falschen Voraussetzungen ausgeht, liefert es im Rahmen seiner Messgenauigkeit wahre Vorhersagen.

Es ist als geozentrisches Weltbild bekannt und wurde vor ca. 2000 Jahren von Claudius Ptolemäus [6], [7] entwickelt. Letztlich hat es 1500 Jahre die Sicht auf unsere Welt bestimmt.

Noch ein Wort zum heliozentrischen Weltsystem:
Das heliozentrische Planetenmodell des Kopernikus war in seinen Anfängen nicht genauer, als das des Ptolemäus [6]. Im heliozentrischen System ist es auch etwas schwieriger, die Rückläufigkeit zu erklären. Aber es war wesentlich einfacher - für die Planeten.

Die komplexe Bewegung der Planeten im Ptolemäischen System wird auf eine sehr einfache Bewegung im heliozentrischen Weltsystem zurückgeführt.

2.4 Zusammenfassung

Rückschlüsse auf die Voraussetzungen sind nur bei eineindeutigen Umformungen zulässig.

Die wenigsten mathematischen Umformungen sind eineindeutig.

Beim Betragsquadrat gibt es sogar unendlich viele komplexe Zahlen, die einen vorgegebenen Wert erfüllen. Dies wird im folgenden Abschnitt wichtig.

Auch in der Physik kann man von etwas sehr Falschem ausgehen und zu etwas sehr Wahrem kommen.

3 Quantenmechanik

3.1 Plan A und Plan B

Vorhersagen in der Quantenmechanik starten mit der Schrödinger-Gleichung:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi(x,t) = \hat{H}\Psi(x,t) \tag{1}$$

wobei $\hat{H}$ der Hamilton-Operator

$$\hat{H} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V(x,t)\right) \tag{2}$$

ist.
Im stationären Fall und einfachen Potentialen V kann man aus dieser Gleichung relativ leicht die Eigenfunktionen $\Psi_i(x,t)$ und Energieeigenwerte E_i bestimmen. Von diesem Ergebnis können die Differenzen der Energieeigenwerte durch spektroskopische Messungen, zum Beispiel beim Wasserstoffatom, bestätigt oder widerlegt werden. Sie wurden bestätigt.

Die komplexwertige Funktion $\Psi_i(x,t)$ kann aber nicht gemessen werden. Erst das Betragsquadrat $|\Psi_i(x,t)|^2$ von $\Psi_i(x,t)$ hat als Aufenthaltswahrscheinlichkeit eine messbare Bedeutung.

Da das Betragsquadrat aber keine eineindeutige Umformung ist, hat dies Konsequenzen für die Interpretation von $\Psi_i(x,t)$.

Plan A: $\Psi_i(x,t)$ hat sehr viel mit einem realen Elektron zu tun. Diese Betrachtungsweise ist von Vorteil, wenn man die Quantenmechanik weiter entwickeln will, zum Beispiel zur Quantenelektrodynamik. Der Nachteil dieser Betrachtungsweise sind der Welle-Teilchen-Dualismus und der Zusammenbruch der Wellenfunktion, die beide bisher nicht erklärt werden konnten.

Plan B: Man würdigt die Quantenmechanik ihrer hervorragenden Ergebnisse, nimmt aber an, dass die Wellenfunktion fast nichts mit einem realen Elektron gemein hat. Diese Herangehensweise entbindet von jeglicher Interpretation und den damit verbundenen Widersprüchen. Sie hat allerdings den Nachteil, dass man dann ohne Quantenmechanik, ohne Grundlage dasteht.

3.2 Zusammenfassung

Zur Quantenmechanik gibt es zurzeit keine Alternative. Und sie ist in ihren Ergebnissen sehr erfolgreich. Deshalb werden sich Physikstudenten weiterhin mit ihr beschäftigen müssen.

Die gleiche Mathematik, die der Quantenmechanik zu ihren Erfolgen verhilft, berechtigt auch dazu, alles über Bord zu werfen und nach einem ganz anderen Verfahren zu suchen.

4 Newtons Falle

Bei einer raffinierten Falle merkt das Opfer gar nicht, dass es in der Falle sitzt. Bei einer solchen Falle hat das Opfer es sich in der Falle bequem gemacht. Newton's Falle ist von dieser Art.

4.1 Geeignete und angemessene mathematische Mittel

Wir wollen der Frage nachgehen, wann mathematische Mittel geeignet und angemessen sind.

4.1.1 Extrapolation einer Zeitreihe

Ein Student erhält folgende Aufgabe:
Gegeben sind 5 Messpunkte einer Zeitreihe zu den Zeiten 1 sec, 2 sec, 3 sec, 4 sec und 5 sec: y(1), y(2), y(3), y(4) und y(5)

Gesucht ist y(6).

Lösung unseres Studenten:
Man lege ein Polynom 4. Grades durch die 5 Punkte. Dazu bestimme man die Koeffizienten dieses Polynoms und berechne dann den Wert des Polynoms an der Stelle t=6.
Der Vorteil dieses Verfahrens: Es ist immer anwendbar.
Der Nachteil dieses Verfahrens: Die Polynomextrapolation entstammt der Differentialrechnung und verwendet Voraussetzungen, die unter Umständen gar nicht gegeben sind. Es kann passieren, dass die obige Lösung gar nicht zur konkreten Zeitreihe passt.

Beispiel: Gegeben sei die Zeitreihe
y(1)=1
y(2)=1
y(3)=2
y(4)=2
y(5)=3

Jeder Fünftklässler würde für t=6 den Wert 3 vorhersagen, während unser Student nach langer Rechnung einen Wert weitab von 3 ermittelt.

Ein Polynom ist sinnvoll, wenn auch die Zwischenwerte wichtig sind und nach einer stetig differenzierbaren Lösung y(t) verlangt wird. Dies war hier aber gar nicht der Fall.

Für Diesen konkreten Fall ist das obige Verfahren ungeeignet, da es schlechte Vorhersagen liefert. Der Student würde es schnell ersetzen.

4.1.2 Die „John von Neumann" - Fliege

Zwei Züge sind 150km von einander entfernt und fahren aufeinander zu. Der eine fährt mit 100km/h der andere mit 50km/h. Eine Fliege fliegt mit 150km/h immer zwischen den beiden Zügen hin und her.

Wie viele km legt die Fliege zurück, bis die Züge sich treffen?

Um diese Aufgabe zu lösen, kann man den Weg s_1 berechnen, den die Fliege vom ersten Zug bis zum Treffen mit dem zweiten Zug zurücklegt. Dann berechnet man den Weg s_2, den die Fliege in umgekehrter Richtung zurücklegt. Und so fort. Zum Schluss summiert man die Reihe $s_1 + s_2 + s_3 + \ldots$ auf. Dies dürfte die meisten von uns überfordern, es im Kopf auszurechnen.

Es gibt aber auch einen viel einfacheren Weg.
Wie man leicht sieht, brauchen die Züge bis zu ihrem Zusammentreffen 1 Stunde. In einer Stunde fliegt die Fliege 150km. Fertig.

Damit besitzt diese Aufgabe schon einen gewissen Witz. Die eigentliche Pointe besteht aber folgender Anekdote:

Dem Mathematiker John von Neumann wurde diese Aufgabe gestellt. Nach kurzem Überlegen sagte er die richtige Lösung. „Wie sind Sie denn darauf gekommen?", wurde er gefragt. „Nun, ich habe die Reihe aufsummiert.", war seine Antwort [8].

Entscheidend ist deshalb die Frage: „Wie würde die Fliege eine solche Aufgabe beantworten?" Würde die Fliege eine Reihe aufsummieren oder an Hand ihrer Flugzeit die Strecke berechnen?

Da die Reihe das richtige Ergebnis liefert, wäre sie ein geeignetes mathematisches Mittel. Da es aber eine Lösung gibt, die der Fliege viel besser angemessen ist, ist die Summenbildung über die Reihe ein unangemessenes mathematisches Mittel.

4.1.3 Zusammenfassung

Bei der Kenntnis mächtiger mathematischer Mittel übersieht man unter Umständen mathematische Ansätze, die den Objekten der Aufgabe viel besser entsprechen.

Mittel sind geeignet, wenn sie zu einem richtigen Ergebnis führen.
Mittel sind angemessen, wenn sie der speziellen Situation entsprechen.

Den dauerhaften Gebrauch geeigneter aber unangemessener Mittel bezeichne ich als Newtons Falle. Es ist sicherlich schwer, dies zu erkennen. Aber gerade das macht Newtons Falle so raffiniert.

Dies ist auch in der Physik möglich. Wer es nicht glaubt, lese noch einmal in Ruhe Abschnitt 2.3.

4.2 Punktmasse und Bahnkurve

Beim Modell der Punktmasse geht man davon aus, dass die gesamte Masse des Körpers in einem mathematischen Punkt konzentriert werden kann. Die ursprüngliche Ausdehnung ist unwichtig. Damit verbunden ist die Bewegung einer solchen Punktmasse auf einer kontinuierlichen Bahnkurve [9].
Sehr erfolgreich wurde dieses Modell von Sir Isaac Newton bei der Entwicklung der Differential- und Integralrechung und der anschließenden Anwendung auf die Planetenbewegung, angewendet. Dieses Konzept war so erfolgreich, dass man aus den Abweichungen der berechneten und der beobachteten Planetenbahn des Uranus die Existenz eines weiteren Planeten (Neptun) vorhersagen konnte [10] Kapitel 3, [11].
Wenn man das Modell der Punktmasse auf die Planetenbewegung anwendet, weiß man sehr gut, was man tut:
1. Man kennt das Verhältnis aus Planetendurchmesser zum Abstand zur Sonne. Man weiß also, wie gut der Planet im Vergleich zur betrachteten Bahn einem Punkt entspricht.
2. Man sieht kein Ruckeln in der Bahn. Alle Planeten ziehen gleichmäßig am Himmel entlang. Ihre Bahn ist kontinuierlich.

Somit kann man aus s(t) durch Ableitung nach der Zeit t Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmen. Man weiß was man tut.
Dieses Modell der Punktmasse lässt sich sogar auf der Erde auf sehr ausgedehnte Körper, zum Beispiel Autos, anwenden. Man benötigt hier das Modell des starren Körpers und kann dann die gesamte Masse wieder in einen Punkt, z.B. den Schwerpunkt, konzentriert annehmen.
Auch hier beobachtet man eine Bahnkurve, die nicht ruckelt sondern kontinuierlich verläuft. Ist dies erfüllt, lässt sich wieder die Differential- und Integralrechnung anwenden. Und es lassen sich Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Bremswege und vieles mehr berechnen. Im Laufe der Jahrhunderte wurde aus der Differential- und Integralrechnung eines der mächtigsten und erfolgreichsten mathematischen Mittel [13].

Inzwischen wird die Infinitesimalrechnung auf sehr viele Teilgebiete der Physik, wenn nicht auf alle, sehr erfolgreich angewendet.

Aber im Bereich der Elementarteilchenphysik sind die Voraussetzungen nicht mehr erfüllt.

4.3 Doppelspaltexperiment

Bei diesem Experiment [14] werden einzelne Photon durch einen Doppelspalt geschickt und dahinter von einem Schirm aufgefangen. Führt man den Versuch nacheinander mit

vielen Photonen durch, erkennt man auf dem Schirm ein Interferenzmuster. Es sieht so aus, als würde ein einzelnes Photon beide Spalte ausleuchten, dahinter mit sich selbst interferieren und sich dann bei der Absorption auf einen kleinen Raumbereich zusammenziehen. So bald man anfängt, nachzusehen, ob das Photon durch den ersten oder zweiten Spalt fliegt, verschwindet das Interferenzmuster. Dieser Versuch kann mit allen Elementarteilchen durchgeführt werden. Selbst mit Fullerenen (C60-Fußbälle) ([16] S. 26f) wurde ein solches Experiment erfolgreich durchgeführt und entsprechende Interferenzen beobachtet. Eine akribisch genaue Darstellung des Doppelspalt-Experiments findet sich im Band 3 der Feynman Vorlesungen [17] und in [18] „Das Verhalten der Quanten".
Daraus folgen zwei Dinge:
1. Elementarteilchen sind keine Punkte, sonst könnten sie den Doppelspalt nicht ausleuchten.
2. Wir können für Elementarteilchen keine Bahn beobachten. Sobald wir versuchen eine Bahn zu beobachten, ändern sie ihr Verhalten.

Sehr deutlich wird dies auch bei Experimenten mit Mach-Zehnder-Interferometern mit und ohne Hindernis in einem Arm [15].

Bei der Beschreibung von Elementarteilchen durch die Mittel der Differential- und Integralrechnung, sind die physikalischen Voraussetzungen einer kontinuierlichen Bahn und einer punktförmigen Ausdehnung des betrachteten Objektes nicht mehr erfüllt.

Das wirft die Frage auf, ob die Theoretische Physik hier wirklich die adäquaten mathematischen Mittel verwendet. Ist die Differentialrechnung wirklich angemessen, um Elementarteilchen gut zu beschreiben?

Gibt es noch andere Hinweise, dass wir die verwendeten mathematischen Mittel überdenken sollten oder müssen?

4.4 Nichtlokalität in der Quantenmechanik

Was ist Lokalität und was ist Nichtlokalität?
Bei Lokalität und Nichtlokalität wird die Frage untersucht, welche Ereignisse sich beeinflussen können. In der Newtonschen Mechanik wird eine absolute Zeit und ein absoluter Raum und eine unendlich hohe Wirkungsgeschwindigkeit vorausgesetzt. Damit beeinflusst ein Ereignis am Ort X jeden anderen Ort Y ohne zeitlichen Versatz.

Die spezielle Relativitätstheorie (SRT) setzt dem ein Ende und rechnet mit einer maximalen Wirkungsausbreitung von c (Lichtgeschwindigkeit) [19]. In der SRT beeinflussen sich nur noch lokal stattfindende Ereignisse. Je weiter die Ereignisse entfernt sind, desto größer ist ihr zeitlicher Versatz.

Die Quantenmechanik ist wieder nichtlokal. Ereignisse, die beliebig weit entfernt sind, beeinflussen sich ohne Zeitversatz. Die Nichtlokalität in der Quantenmechanik wird an zwei Stellen sehr deutlich. Zum einen beim Kollaps der Wellenfunktion, zum anderen bei Experimenten mit verschränkten Photonen.

Kollaps der Wellenfunktion
Die in der QM berechneten Wellenfunktionen sind bis ins Unendliche ausgedehnt. Wird ein Elektron bei einer Orts-Messung absorbiert, so kollabiert die Wellenfunktion instantan. Dies hat ohne Zeitversatz Auswirkungen bis in beliebig weite Entfernungen, in denen die Wellenfunktion ungleich Null ist.

Verschränkte Photonen
Noch eindrucksvoller wird die Nichtlokalität bei Experimenten mit verschränkten Photonen [21], [22], [23] beobachtet. Hier werden zwei Photonen in entgegengesetzte Richtungen geschickt, die sich aber im gleichen Quantenzustand befinden. Solange man die Photonen unberührt lässt, ist auch die Polarisation unbestimmt. "Wackelt"man jetzt an dem einen und misst seine Polarisation, so ist auch die Polarisation des anderen Photon instantan festgelegt. Die Entfernung der Photonen kann bereits über 100 km betragen. Als Einführung in all diese Experimente empfiehlt es sich [20] ansehen.

Wenn aber eine Theorie sagt, die Welt ist lokal und eine andere gut bestätigte Theorie sagt, die Welt ist nichtlokal, dann haben wir den uns umgebenden Raum nicht wirklich verstanden.

4.5 Vergleich klassische Physik und Quantenmechanik

Klassische Physik

Mathematik		Klassische Physik
reelle Zahlen	$\Longleftrightarrow$	Massepunktmodell: Beobachtung kleiner Planeten im Vergleich zur Planetenbahn
stetig differenzierbare Funktionen	$\Longleftrightarrow$	Beobachtung einer kontinuierlichen Bewegung der Planeten
$\Downarrow$		$\Downarrow$
1. Ableitung	$\Longleftrightarrow$	Geschwindigkeit
2. Ableitung	$\Longleftrightarrow$	Beschleunigung

In der klassischen Physik kann man die mathematischen Grundlagen der Differentialrechnung an Hand von Beobachtungen rechtfertigen.

Quantenmechanik

Mathematik	Quantenmechanik
Schrödinger Gleichung	kein konsistentes Modell keine Beobachtungen
$\Downarrow$	
Eigenwertproblem	
$\Downarrow$	

Energie-Eigenwerte	$\Longleftrightarrow$	spektroskopische Messungen
Eigenfunktionen		
Wellenfunktion		
$\Downarrow$		
Betragsquadrat der Wellenfunktion	$\Longleftrightarrow$	Aufenthalts-wahrscheinlichkeit

In der Welt der Elementarteilchen können ein kontinuierlicher Raum, Punktmassen für die Elementarteilchen und eine Bahnkurve nicht mehr beobachtet werden. Damit fehlen der Differentialrechnung ihre physikalischen Voraussetzungen.

Wenn man trotzdem in seinen mathematischen Modellen und Rechnungen einen kontinuierlichen Raum voraussetzt, ist dies mindestens riskant. Und wenn es zu Widersprüchen führt, sollte dies nicht verwundern.

Die Quantenmechanik lässt sich nur noch durch ihre Ergebnisse rechtfertigen.

Wenn wir schon die Quantenmechanik nicht verstanden haben, haben wir dann wenigstens die spezielle Relativitätstheorie verstanden?

4.6 Das Myon und ein relativistischer Äther

In der Erdatmosphäre entstehen in ca. 20 km Höhe Myonen. Diese Elementarteilchen sind die großen Brüder der Elektronen. Sie haben die gleiche Ladung, sind ca. 200 mal schwerer als Elektronen und zerfallen nach etwa $2\mu s$ (Halbwertszeit) [24]. Bei ihrer Entstehung haben sie fast Lichtgeschwindigkeit ($300.000 km/s$). Damit müssten, nach einfacher Rechnung, die Myonen bereits nach ca. $600m$ zerfallen. Wir messen aber einen erheblichen Anteil, der in der Atmosphäre entstandenen Myonen hier unten auf der Erde.

Wie geht das?

Jeder an Physik interessierte Abiturient weiß: Hier hilft die spezielle Relativitätstheorie [19]. (Gute Herleitungen finden Sie hier [25], sehr schöne Animationen hier [26].)

Für das Myon sieht die Sache so aus:
Ich, Myon, ruhe und die Erde fliegt auf mich zu. Bewegte Maßstäbe verkürzen sich. Ich, Myon, messe die Erdatmosphäre zu einem Bruchteil von 20km aus. Und diesen Bruchteil schaffe ich locker.

Für den Erdbeobachter stellt sich die Sache so dar:
Das Myon bewegt sich auf uns zu. Die Zeit in bewegten Systemen vergeht langsamer. Da die Myon-Zeit langsamer vergeht, schafft es das Myon bis zur Erdoberfläche.

Soweit ist alles gut.

Aber wie macht das Myon das? Aus welchen Komponenten besteht ein Myon, die es in die Lage versetzen, die Erdatmosphäre so verkürzt auszumessen?

In der Galileischen Physik gab es eine einheitliche Zeit für das gesamte Universum. Und die Größe von Objekten hing nicht vom Bewegungszustand zu einander ab. Wenn etwas für das gesamte Universum einheitlich ist, kann man es als uninteressant abtun. Das ist in Ordnung. In der SRT verhalten sich die Dinge aber wesentlich komplexer. Hier hängen Größe von Objekten und Zeit vom Bewegungszustand der Objekte zueinander ab. Dies ist interessant und hier drängt sich die Frage auf, wie machen die Objekte (Myonen, Elektronen, ...) das? Die Antwort auf diese Frage nenne ich relativistischen Äther.

Dass niemand offensiv nach einem relativistischen Äther sucht, hat wahrscheinlich historische Gründe. Als die spezielle Relativitätstheorie zur Diskussion stand, waren ihre Vorhersagen so unvorstellbar, dass der Streit um ihre Richtigkeit sehr erbittert geführt wurde. Das eine Lager postulierte einen Äther und verdammte die Relativität. Das andere Lager, sagte, es gibt keinen solchen Äther, den ihr da postuliert. Die Experimente gaben letztlich der Relativität recht.

Äther wurde zum verbotenen Wort erklärt.

Das ist jetzt ca. 100 Jahre her. Inzwischen sind alle Protagonisten von damals tot.

Deshalb die Frage: Was habt ihr gegen einen Äther? Ein Äther würde erklären, wie die Elementarteilchen ihr Verhalten zustande bringen. Er muss nur relativistisch sein! Siehe auch [10] S. 184. Ein Äther würde der Relativitätstheorie auch ihre Mystik nehmen.

Wir rechnen in der SRT mit einer 4-dimensionalen Raum-Zeit, haben aber keinen relativistischen Äther. Ohne Äther wissen wir nicht, warum wir eine 4-dimensionale Raum-Zeit haben und unter welchen Bedingungen sie sich diese bildet.

4.7 Zusammenfassung

Sir Isaac Newton und Wilhelm Leibnitz [12] haben uns mit der Differentialrechnung ein sehr mächtiges und sehr nützliches Mittel in die Hand gegeben. Damit ist sie für viele Probleme ein geeignetes Mittel, da sie richtige Vorhersagen liefert.

Dies bedeutet aber nicht, dass die Differential-Rechnung in allen Bereichen der Physik das angemessene mathematische Mittel ist. Besonders riskant ist dies, wenn die physikalischen Voraussetzungen nicht mehr erfüllt sind. Dies ist in der Elementarteilchen-Physik der Fall.

Wenn Elementarteilchen nicht punktförmig sind und keine Bahnkurve haben, woran kann man dann eine Alternative testen? Wenn man die Elementarteilchen in Komponenten zerlegt und diesen Komponenten Eigenschaften zuordnet und mit einander wechselwirken lässt, woran kann man dann erkennen, ob diese Komponenten unserer Welt entsprechen?

Im Folgenden werden einige Experimente aufgezählt, an denen man eine Alternative testen kann.

5 Bemerkenswerte Eigenschaften der Elementarteilchen

Im Folgenden werden einige Eigenschaften von Elementarteilchen aufgeführt, an denen man eine alternative Theorie testen und weiter verfolgen oder verwerfen kann. Die meisten Eigenschaften sind allgemein bekannt und werden hier nur unter einem speziellen Licht betrachtet.

5.1 Paarerzeugung und Paarvernichtung

Ein Photon mit ca. 1 MeV Energie kann bei Wechselwirkung mit einem Kern ein Elektron-Positron-Paar erzeugen [28], [29], [30] . Und umgekehrt zerstrahlt ein Elektron-Positron-Paar in zwei Photonen, wenn sie zusammentreffen.

Gesucht sind somit Komponenten, die in der Konfiguration „B“ Photonen bilden und in der Konfiguration „F“ Elektronen bzw. Positronen.

Da die Atomspektren auch weit entfernter Sterne genauso aussehen, wie die auf unserer Erde, müsste das Verfahren im wahrsten Sinne des Wortes universell sein, das heißt, im gesamten Universum gleich ablaufen.

5.2 Gleichheit der Ladung

Nach der CODATA [33] haben alle Elektronen eine Ladung von $1.602176565 * 10^{-19}C$ mit einer Standardabweichung von $0.000000035 * 10^{-19}C$. Bis zu dieser Genauigkeit wird keine Streuung gemessen. Es sieht bis zu dieser Genauigkeit so aus, als wären alle Elektronen exakt gleich. Quantenmechanik und Folgetheorien sprechen von ununterscheidbaren Teilchen und setzen diese Gleichheit voraus.

Bei der Paarerzeugung wird ein Elektron-Positron-Paar erzeugt. Welcher Mechanismus sorgt eigentlich für so exakt gleich große Ladungen? Warum haben die Ladungen der einzelnen Elektronen keine größere Streuung?

Eine Plan_B-Theorie muss einen Algorithmus enthalten, der ununterscheidbare Objekte produzieren kann.

5.3 1/3 und 2/3 der Quarkladung

Proton und Neutron bestehen aus jeweils 3 Quarks. Diese Quarks haben drittelzahlige Ladung [32], [33]. Warum eigentlich? Mit 2 Quarks und halbzahliger Ladung kann man auch positiv und negativ geladene und neutrale Teilchen bauen. Wo kommt diese Drittelzahligkeit her?

Wer schon mal versucht hat ein Stück Torte in drei gleiche Teile zu teilen, weiß, dass dies gar nicht so einfach ist. Halbieren ist viel einfacher. Woher kommt die Notwendigkeit, Ladung in drei Teile zu teilen?

5.4 Spin

Dreht sich eine geladene Metallkugel um ihre eigene Achse, bildet sich ein magnetisches Moment. Fliegt eine solche Metallkugel durch ein inhomogenes Magnetfeld, wird sie in Richtung des Nord- oder Südpols abgelenkt, je nach Drehrichtung.

Elektronen zeigen ebenfalls eine solche Ablenkung. Entsprechend weist man ihnen einen Eigendrehimpuls zu. Diesen nennen wir Spin. Allerdings hat der Spin nur die beiden Werte $+\hbar/2$ oder $-\hbar/2$.

Leider sind Elektronen nicht mit rotierenden, geladenen Metallkugeln vergleichbar. Dieses Modell stößt sehr schnell an seine Grenzen und führt zu Widersprüchen. Stichwörter sind hier das ERP-Experiment und die Bellsche Ungleichung. Eine sehr gute Darstellung des Spin als quantenmechanische Eigenschaft von Elementarteilchen mit vielen Bildern und guten Erklärungen findet man hier [34] im Kapitel 2.

Alle Elementarteilchen haben einen Spin, halbzahlig oder ganzzahlig. Es gibt nur diese beiden Werte. Die Elementarteilchen mit halbzahligem Spin nennen wir Fermionen. Die mit ganzzahligem Spin nennen wir Bosonen. Sie genügen den gleichnamigen Statistiken.

Soweit so gut.

Aber warum gibt es den Spin? Welche Notwendigkeit haben die Elementarteilchen, einen Spin auszubilden?

Und warum gibt es nur diese ausgefallenen Werte?

5.5 Koideformel

Das Sahnehäubchen zum Schluss.

Das Elektron hat noch zwei instabile große Brüder, Myon und Tauon. Alle drei werden zur Gruppe der Leptonen zusammengefasst. Alle drei haben also die gleiche Ladung (!), wechselwirken elektromagnetisch und schwach, aber nicht stark. Ihr Spin beträgt 1/2. Die Massen der drei Elementarteilchen gehorchen nun folgender 1981 von Yoshio Koide gefundener Formel:

$$m_e = 0,510998928 \pm 0,000000011 MeV \tag{3}$$

$$m_\mu = 105,6583715 \pm 0,0000035 MeV \tag{4}$$

$$m_\tau = 1776,82 \pm 0,16 MeV \tag{5}$$

$$\frac{2}{3} = \frac{m_e + m_\mu + m_\tau}{\left(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau}\right)^2} \tag{6}$$

Nach neusten Messungen werden die 2/3 mit einer Genauigkeit von mindestens 5 Stellen erreicht [35], [36], [37].

Aber niemand weiß bis heute, ob die 2/3 Zufall und einfach eine Laune der Natur sind. Oder sind die 2/3 Notwendigkeit, verbergen die 2/3 eine tieferliegende Struktur, die einen solchen Wert erzwingt.

6 Zusammenfassung

Man kann von etwas Falschem ausgehen und durch korrekte Umformungen zu etwas Wahrem kommen. Eine Möglichkeit ist die Betragsbildung bei komplexen Zahlen.

Erst das Betragsquadrat der quantenmechanischen Wellenfunktion hat eine messbare Bedeutung. Damit ist die Möglichkeit eröffnet, dass die quantenmechanische Wellenfunktion nur sehr wenig mit einem Elektron gemeinsam hat.

Die gleiche Mathematik, die der Quantenmechanik zu ihren großen Erfolgen verholfen hat, liefert damit auch die Erlaubnis, nach einem Plan B zu suchen.

Für einen Plan B sind Objekte und Wechselwirkungen gesucht, die
- in großer Zahl einen relativistischen Äther aufspannen
- das Doppelspalt-Experiment reproduzieren
- stabile und instabile Elementarteilchen bilden können
- exakt gleiche Ladungen realisieren
- die Drittelzahligkeit bei der Quark-Ladung realisieren
- die Leptonenmassen entsprechend der Koide-Formel reproduzieren oder eine Abweichung erklären

7 Schlussbemerkung

Da der Artikel gut nachvollziehbar sein soll, wurden vor allem gut erreichbare Quellen aufgeführt. Dies sind online-Archive wie zum Beispiel arXiv und Lexika, wie die Wikipedia. Die Artikel der Wikipedia unterliegen sicherlich einer gewissen Dynamik, aber die

Sachverhalte sind sehr grundlegend. Und in diesen Bereichen erachte ich die Wikipedia-Artikel als ausreichend stabil.

Da mit Feynman begonnen wurde, soll mit Einstein geendet werden: „Probleme kann man niemals mit der selben Denkweise lösen, durch die sie entstanden sind.“

Literatur

[1] Feynman, R.: The Character of Physical Law, MIT-Press 1967, Kapitel 6

[2] http://de.wikipedia.org/wiki/Aussagenlogik

[3] http://de.wikipedia.org/wiki/Santa_Maria_(Schiff)

[4] http://www.tennisplanet.de/de_de/weiteres/information/tennisplatz-information.html

[5] http://www.starobserver.org/ap100613.html

[6] http://de.wikipedia.org/wiki/Claudius_Ptolemäus

[7] http://de.wikipedia.org/wiki/Geozentrisches_Weltbild

[8] http://diepresse.com/text/home/spectrum/spielundmehr/421650

[9] http://de.wikipedia.org/wiki/Massepunkt

[10] Laughlin, Robert B.: Abschied von der Weltformel. Piper Verlag 2009 ISBN 978-3-492-25372-7

[11] http://de.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton

[12] http://de.wikipedia.org/wiki/Gottfried_Wilhelm_Leibniz

[13] http://de.wikipedia.org/wiki/Differentialrechnung

[14] http://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment

[15] http://www.forphys.de/Website/qm/exp/v13.html

[16] Zeilinger, Anton: Einsteins Schleier. Goldmann 2005 ISBN 9 783 442 153 022

[17] Feynman, Richard P.: Vorlesungen über Physk. Band 3, Kapitel 1, Oldenbourg Verlag 2009 ISBN 978-3-486-58109-6

[18] Feynman, Richard P.: Sechs physikalische Fingerübungen. Piper Verlag 2007 ISBN 978 3 492 24999 7

[19] http://de.wikipedia.org/wiki/Spezielle_Relativitätstheorie

[20] http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/index.html?/quantumlab /Verschraenkung/Grundlagen/index.html

[21] http://arxiv.org/abs/quant-ph/0607182v2

[22] http://arxiv.org/abs/quant-ph/0607186

[23] http://arxiv.org/abs/quant-ph/0607129

[24] http://de.wikipedia.org/wiki/Myon

[25] http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/Rel

[26] http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/

[27] http://de.wikipedia.org/wiki/Lorentz-Transformation

[28] http://de.wikipedia.org/wiki/Paarbildung_(Physik)

[29] http://www.slac.stanford.edu/exp/e144/e144.html

[30] http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/Phys RevLett.79.1626

[31] http://physics.nist.gov

[32] http://de.wikipedia.org/wiki/Quark_(Physik)

[33] Particle Data Group - Daten http://pdg.lbl.gov/ J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012) and 2013 partial update for the 2014 edition.

[34] Resag, Jörg: Die Entdeckung des Unteilbaren: Quanten, Quarks und der LHC. Spektrum Akademischer Verlag 2010 ISBN-13: 978-3827424846

[35] http://en.wikipedia.org/wiki/Koide_formula

[36] http://arxiv.org/abs/hep-ph/9402242

[37] Koide: http://arxiv.org/abs/hep-ph/0506247