

Was ist Physik?

Horst Laschinsky

11. April 2001

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
2	Was ist Physik?	2
3	Theorien	2
4	Einige ausgewählte Theorien	3
4.1	Schrödingers Katze	3
4.2	Welle-Teilchen-Dualismus und Unschärferelation	4
4.2.1	Welle-Teilchen-Dualismus	4
4.2.2	Unschärferelation	4
4.3	Eine kurze Anmerkung zum Indeterminismus	5
5	Abschließende Bemerkung	6

1 Vorwort

In der NewsGroup de.sci.physik fallen in letzter Zeit verstärkt Leser auf, welche versuchen, gängige physikalische Prinzipien zu widerlegen oder für Unsinn zu erklären. Meist haben sie es dabei auf die theoretische Physik abgesehen, der sie vorwerfen, unlogische Erklärungen für die Natur zu geben. Gleichzeitig fordern sie eine „wahre“ Beschreibung von Phänomenen. Allem Anschein nach rühren diese Forderungen daher, daß viele überhaupt nicht wissen, was Physik „ist“, bzw. was ein Physiker „macht“. Dies ist nicht zuletzt wohl auch auf die wachsende Anzahl an populärwissenschaftlichen Sendungen zurückzuführen, die unter dem Druck der Quoten mehr und mehr auf spektakuläre Computeranimationen Wert legen, die wissenschaftlichen Tatsachen jedoch vernachlässigen. Natürlich sind nicht alle Wissenschaftssendungen von Grund auf schlecht, und es steht mit auch nicht zu, über die Sendungen zu urteilen. Entscheidend ist jedoch der Punkt, daß auch „seriöse“ Magazine versuchen, komplexe physikalische Tatsachen für den Laien verständlich aufzubereiten, meist anhand von Vergleichen mit makroskopischen, erfaßbaren Tatsachen. Dies ist freilich begrenzt möglich, größtenteils aber sind diese Vergleiche schlicht falsch. Jedoch findet dies leider nur allzuseiten in diesen Sendungen Erwähnung, was wiederum den Zuschauer dazu veranlaßt, zu glauben, daß z.B. ein Elektron eine kleine rotierende Kugel sei, oder daß die Unschärferelation meßtechnischer, nicht prinzipieller Natur ist.

Mit diesem Text versuche ich dem Abhilfe zu leisten, in dem ich aufzeigen werde, was Physik eigentlich ist, was man als „Theorie“ bezeichnet, und wie man einige populärwissenschaftliche

Erklärungen wirklich betrachten muß. Da dieser Text vor allem für den interessierten Laien gedacht ist, werde ich, so weit möglich, auf mathematische Formeln verzichten. Und dort, wo sie sein müssen, werde ich versuchen, genau zu erklären, was sie jeweils bedeuten.

2 Was ist Physik?

Als allererstes ist zu klären, was Physik eigentlich ist, bzw. was sie will. Vielfach verbreitet ist die Meinung, die Physik versucht die Natur zu erklären und Antworten auf alle Fragen zugeben. Dies ist jedoch eine völlig falsche Auffassung. Denn letztendlich ist es unmöglich, eine Erklärung für alles zu finden. Denn hat man für irgendein Phänomen eine Erklärung gefunden, so kann man ja auch diese Erklärung wieder hinterfragen, und eine Antwort suchen, warum es gerade so ist, und nicht anders. Dieses Spiel würde sich unendlich fortsetzen lassen. Darum ist man gezwungen, grundlegende Tatsachen als gegeben hinzunehmen - „es ist halt einfach so“. Und genau hier kommt die Physik, insbesondere der oft falsch Verstandene Begriff der „Theorie“ ins Spiel.

3 Theorien

Die Physik versucht, die Natur zu beschreiben, nicht zu erklären. Dies ist ein wesentlicher Unterschied, der insbesondere Physik und Philosophie voneinander trennt. Die Physik hinterfragt die Natur nicht, sie verwendet die gegebenen Tatsachen, versucht sie mit mathematischen Mitteln darzustellen und dann daraus mittels den Methoden der Logik weitere, beobachtbare Tatsachen abzuleiten. Also Voraussagen zu treffen, wie sich ein System unter gegebenen Bedingungen verhalten wird. Andererseits muß das mathematische Modell auch fähig sein, bereits bekannte Phänomene hinreichend gut (d.h. innerhalb der unvermeidbaren Meßtoleranz) beschreiben zu können. Ein solches mathematisches Modell, welches diese beiden Bedingungen erfüllt bezeichnet man als „Theorie“.

Besonders wichtig ist hierbei, daß sich eine Theorie niemals beweisen läßt. Denn man kann prinzipiell niemals alle möglichen Konfigurationen des Systems durchtesten. Dagegen kann man eine Theorie sehr leicht widerlegen. Hierfür benötigt man nur ein einziges Experiment, dessen Ergebnis den Voraussagen der Theorie widerspricht. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Newtonsche Mechanik. Deren Theorie beschreibt die Bewegung von Körpern unter Einwirkung von irgendwie gearteten Kräften. Lange Zeit galt diese Theorie als absolut richtig. Denn es war z.B. sofort einsehbar, daß sich die von außen beobachtbare Geschwindigkeit eines Körpers, der sich innerhalb eines bewegten Systems selbst wieder bewegt einfach daraus ergibt, daß man die Geschwindigkeiten des Körpers und des ihn enthaltenden Systems addiert. Das Michelson-Morley-Experiment jedoch zeigte, daß dies zumindest dann nicht mehr der Fall ist, wenn man die Geschwindigkeit eines Lichtstrahls mißt, der sich auf der bewegenden Erde ausbreitet. Damit war die Newtonsche Mechanik widerlegt, es mußte eine neue Theorie aufgestellt werden. Diese trägt den Namen „spezielle Relativitätstheorie“. Ihre Gleichungen beschreiben nicht nur jenes Phänomen, sondern sie machen auch Voraussagen, die sich experimentell überprüfen lassen. Bisher wurde kein einziges Experiment durchgeführt, dessen Ergebnis der Vorhersage der Relativitätstheorie widersprochen hätte. Dies bedeutet jedoch nicht, und ich betone dies ausdrücklich, daß die Relativitätstheorie absolut richtig und allgemeingültig ist. Solange sich jedoch keinen Hinweis auf irgendwelche Inkonsistenzen findet, bleibt sie eine akzeptable und daher „gute“ Beschreibung mechanischer Vorgänge.

Eins möchte ich nochmals besonders betonen: es kommt *absolut nicht* darauf an, ob eine Theorie anschaulich, leicht verständlich oder einfach nachvollziehbar ist. Was zählt ist einzig und allein, ob sie überprüfbare Aussagen macht, die mit Meßergebnissen übereinstimmen.

Ein weiteres Kriterium für eine „gute“ Theorie ist ein Auswahlverfahren, das als „Occam’s Razor“ bekannt geworden ist. Diese Rasierklinge bedeutet nichts anderes, als daß von zwei gleichwertigen Theorien immer diejenige zu wählen ist, die die wenigsten neuen Voraussetzungen bzw. Annahmen macht. Um beim Beispiel der Relativitätstheorie zu bleiben: Angenommen, es würde eine weitere Theorie geben, die exakt die gleichen Phänomene beschreibt wie Einsteins spezielle Relativitätstheorie, jedoch (um mal zu übertreiben) dafür mindestens 50 Raum- und 30 Zeitdimensionen benötigt, so wird dieser Theorie sicher nicht der Vorzug gegeben. Es sei denn natürlich, sie macht zusätzlich irgendwelche Voraussagen (die sich als richtig herausstellen), welche von der „normalen“ Relativitätstheorie nicht erklärt werden können.

Nachdem nun geklärt wäre, was eine Theorie ist, komme ich dazu, ein paar Theorien genauer unter die Lupe zu nehmen. Vorzugsweise natürlich solche, die in populärwissenschaftlichen Sendungen (oder auch Zeitschriften) gerne dargestellt werden. Ich werde versuchen zu erklären, was die verschiedenen Voraussagen bedeuten, und wie man die anschaulichen Darstellungen populärwissenschaftlicher Quellen verstehen muß.

4 Einige ausgewählte Theorien

4.1 Schrödingers Katze

Schrödingers Katze ist ein beliebtes Beispiel um ein Phänomen anschaulich darzustellen, das in der Quantenmechanik als „Überlagerung von Zuständen“ bekannt ist. Und zwar wird bei diesem Gedankenexperiment¹ eine Katze in eine undurchsichtige Kiste gesteckt, zusammen mit einer Apparatur, die, gesteuert durch radioaktiven Zerfall, die Katze innerhalb von einer Stunde mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% tötet. Die Frage ist nun, in welchem Zustand sich die Katze nach einer gewissen Zeit befindet, wenn man *nicht* in die Kiste hineinschaut - analog zur Frage nach dem quantenmechanischen Zustand eines Systems, solange man keine Messung an ihm vornimmt. Als Antwort auf diese Frage wird gegeben, daß die Katze sowohl gleichzeitig lebendig als auch tot ist. Erst wenn man die Kiste öffnet, manifestiert sich der Zustand in einer 100% lebendigen oder 100% toten Katze.

Nun muß man kein Mediziner sein, um zu erkennen, daß es keine halbtoten Katzen gibt. Der Fehler, der hier gemacht wird ist derjenige, daß man ohne Überlegung die quantenmechanischen Gesetze auf ein makroskopisches Objekt anwendet. Natürlich ist die Katze irgendwann tot, egal ob man in die Kiste guckt oder nicht.

Dies liegt daran, daß ein makroskopisches Objekt, wie z.B. eine Katze, vielfach mit seiner Umwelt wechselwirkt, beispielsweise wird die Katze immer wieder von Luftmolekülen getroffen. All dies trägt zu einem Effekt bei, der in der Fachsprache „Zerstörung der Kohärenz“ genannt wird. Dies bedeutet nun, theoretisch wäre es möglich, eine Katze in einen überlagerten Zustand zu bringen, praktisch ist es undenkbar, da sie wirklich vollständig von der Umwelt abgeschnitten werden müßte - was sich jedoch noch vor Eintritt des überlagerten Zustandes im Erstickungstod der Katze äußern würde.

Im mikroskopischen Bereich von Atomen dagegen gibt es tatsächlich solche „Zwischenstadien“ von zwei Zuständen, die sich „eigentlich“ gegenseitig ausschließen. So können Atome mehrere

¹Ich weise hier ausdrücklich darauf hin, daß es sich wirklich nur um ein Gedankenexperiment handelt!

verschiedene Anregungszustände quasi gleichzeitig besetzen, ja sie können sich sogar an zwei Orten gleichzeitig aufhalten - so lange niemand genau hinschaut. Leider sind auch dies wieder nur bildliche Darstellungen. Was da tatsächlich „passiert“, kann man sich meiner Meinung nach nicht veranschaulichen. Und dies ist wohl auch der Sinn von Schrödingers Katze: wissenschaftlich interessierten Laien vor Augen zu führen, wie paradox manche Situationen in der (damals neu entdeckten) Quantenmechanik erscheinen. Nur leider wird dieses Bild oft völlig falsch verstanden. Ich bin sicher, hätte Erwin Schrödinger gewußt, daß seine Katze mehr zum Unverständnis der Quantenmechanik beiträgt, als zu deren Verständnis, so hätte er diesen Vergleich niemals gemacht.

4.2 Welle-Teilchen-Dualismus und Unschärferelation

Dies sind wohl die „heißesten“ Themen in populärwissenschaftlichen Abhandlungen über Physik überhaupt. Keine andere physikalische Entdeckung hat wohl mehr Aufsehen erregt und zu philosophischen Debatten geführt, wie die Unschärferelation und der vermeintliche Indeterminismus der Quantenmechanik. Und wohl keine Entdeckung wird populärwissenschaftlich so oft falsch erklärt, wie diese beiden. Was steckt nun wirklich dahinter? Beginnen wir mit der seltsamen Dualität von Quantenobjekten.

4.2.1 Welle-Teilchen-Dualismus

Wohl kein Satz findet sich in populärwissenschaftlicher Literatur öfter, als: „Licht ist gleichzeitig Welle und Teilchen.“ Und kein Satz ist schwerer zu verstehen als dieser. Eine Welle ist nichts greifbares. Man kann eine Welle nicht in die Hand nehmen und mit sich herumtragen. Eine Welle ist kein „Ding“, sondern ein „(Bewegungs-)Zustand“. Ein Teilchen dagegen ist sehr wohl etwas greifbares, ein Stein beispielsweise, oder eine Murmel. Wie kann dann ein quantenmechanisches Objekt gleichzeitig (nichtgreifbare) Welle und (greifbares) Teilchen sein? Die Antwort der Physik darauf ist verblüffend einfach: überhaupt nicht.

Der „Welle-Teilchen-Dualismus“ ist ein Relikt aus den Anfängen der Quantenmechanik, welches (leider) immer noch nicht ganz in Vergessenheit geraten ist. Heute betrachtet man die Quantenwelt ganz anders. So geht man davon aus, daß ein quantenmechanisches Objekt überhaupt keinen definierten Ort hat, solange man nicht nachschaut, wo es ist. Solange man keine Ortsmessung vornimmt, kann man nur eine Wahrscheinlichkeit dafür angeben, mit der man das Objekt an einem bestimmten Ort vorfinden wird. Wenn man dann tatsächlich mißt, so findet man entweder ein Teilchen, oder man findet keines - der Ort des Teilchens „entsteht“ also quasi erst während der Messung. Die angegebene Wahrscheinlichkeit genügt dagegen der Lösung einer Wellengleichung, etwa der Schrödingergleichung oder der Diracgleichung. Dies bedeutet nun aber nicht, daß das Teilchen selbst eine Welle ist.

4.2.2 Unschärferelation

Eine andere, oft falsch verstandene Erklärung betrifft die Unschärferelation. Diese besagt beispielsweise, daß es unmöglich ist, Ort x und Impuls p eines Teilchens gleichzeitig beliebig genau zu bestimmen. Für die Unsicherheit in Ort (Δx) und Impuls (Δp) gilt immer:

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

Das bedeutet, je genauer man beispielsweise den Ort mißt (je kleiner also Δx wird), umso ungenauer wird die Information über den Impuls (umso größer wird Δp).

Zur Erklärung dieser Eigenheit wird oftmals angeführt, daß man zur Ortsmessung ja Licht, also Photonen auf das Teilchen schießen muß. Diese übertragen dem Teilchen aber auch einen (unbekannten) Impuls, so daß man über diesen schließlich nichts mehr aussagen kann. Ist die Unschärferelation also nur ein Ergebnis unserer meßtechnischen Unfähigkeit?

Daß dem nicht so ist, kann man eindrucksvoll dadurch zeigen, daß man die Unschärferelation mathematisch herleitet. Wie im Abschnitt über den Welle-Teilchen-Dualismus berichtet, genügt die Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine erfolgreiche Ortsmessung der Lösung einer Wellengleichung. Eine analoge Beziehung besteht auch für den Impuls. Dies bedeutet, daß auch der Impuls eines Teilchens vollkommen unbestimmt ist, solange man nicht nachmißt. Und wenn man dies tut, mißt man auch nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einen gewissen Impuls. Die Wahrscheinlichkeit für die Impulsverteilung ist nun ebenfalls die Lösung einer Wellengleichung. Vergleiche mit der Optik zeigen nun, daß die Ortswellenfunktion und die Impulswellenfunktion sogenannte „Fourier-Transformierte“ voneinander sind. Eine Fouriertransformation ist eine mathematische Operation, die grob gesagt eine bestimmte Funktion durch eine andere ausdrückt. Das besondere an einer Fouriertransformation ist nun, daß bestimmte Änderungen in der ursprünglichen Funktion im Resultat oftmals genau das Gegenteil bewirken. Betrachtet man als Ortswellenfunktion beispielsweise eine Funktion, die überall fast Null ist, und nur in einem sehr schmalen Intervall deutliche Werte annimmt, so ist deren Fourier-Transformierte eine sehr breite Funktion. Andererseits ergibt eine breite Eingangsfunktion eine Fouriertransformierte, die nur einen sehr schmalen „Peak“ aufweist.

Nun kann man die Ortswellenfunktion und ihre Fourier-Transformierte nehmen, und untersuchen, wann beide Funktionen die gleiche Breite aufweisen. (Achtung! Auch dies ist wiederum sehr grob formuliert. Die mathematische Herleitung ist weitaus komplizierter, und würde den Rahmen dieses Textes für Laien eindeutig sprengen). Dabei stellt man fest, daß es unmöglich ist, eine sehr schmale Ursprungsfunktion zu finden, deren Fouriertransformierte ebenfalls nur einen sehr schmalen Peak besitzt. Es gibt eine Mindestbreite, die beide Funktionen einhalten müssen. Da die Breite der Funktion aber die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Ort oder Impuls festlegt, bedeutet dies nun, daß für die Unsicherheit bei Messung von Ort und Impuls eben genau die oben angegebene Beziehung besteht. Man kommt also „von alleine“ auf die Unschärferelation, ohne auch nur eine einzige Messung durchzuführen, ja sogar, ohne auch nur den Einfluß der Messung auf das Resultat in die mathematische Rechnung einfließen zu lassen.

Die Unschärferelation ist also prinzipieller Natur. Sie folgt direkt aus der Struktur der für die erfolgreiche Beschreibung von Quantenphänomenen notwendigen Mathematik. Sie gilt insbesondere auch dann, wenn man keine Messung vornimmt - sie gründet also nicht auf den technischen Einschränkungen unserer Meßapparaturen.

4.3 Eine kurze Anmerkung zum Indeterminismus

Ein ebenfalls weit verbreitetes Gerücht besagt, daß die Quantenmechanik indeterministisch sei, d.h., daß sie keine exakten Vorhersagen macht, weil man aus gegebenen Anfangsbedingungen keine konkreten Werte beispielsweise für den Ort eines Teilchens machen kann. An einem einfachen Beispiel kann man jedoch bereits zeigen, daß die Quantenmechanik auch viel präzisere Lösungen bieten kann, als die vermeintlich „deterministischere“ klassische Mechanik.

Man betrachte dazu ein sog. Tivoli-Spiel. Dieses besteht aus einem Brett in welches in regelmäßigen, gitterförmigen Abständen Nägel geschlagen sind. Läßt man nun von oben eine Kugel in

das Nagelgitter fallen, so ist es unmöglich vorherzusagen, wie und wo die Kugel reflektiert wird, und wo sie schließlich unten aus dem Brett wieder austritt. Verwendet man mehrere Kugeln gleichzeitig, so wird es noch chaotischer, da dann auch noch Stöße der Kugeln untereinander beitragen.

Nun verkleinert man das Nagelbrett auf atomare Dimensionen (was z.B. durch ein Kristallgitter realisiert werden kann), und verwendet anstatt Kugeln beispielsweise Elektronen. Und plötzlich kann man exakt (d.h. innerhalb der Unschärferelation) sagen, welche Richtung der austretende Strahl einnehmen wird. Er genügt dann nämlich der *Bragg-Gleichung* $2d \sin \phi = n\lambda$, wobei d der Abstand der Gitterebenen, ϕ der Winkel und λ die dem Strahl durch die de Broglie-Beziehung zugeordnete Wellenlänge ist. n ist eine natürliche Zahl welche die Ordnung der Beugungsmaxima zählt.

Man sieht also: verkleinert man ein unberechenbares, klassisch-mechanisches System auf Dimensionen, in denen man quantenmechanisch rechnen muß, so kann es sein, daß das System plötzlich exakt berechenbar wird. Man kann also wirklich nicht behaupten, die Quantenmechanik sei indeterministisch.

5 Abschließende Bemerkung

Abschließend möchte ich noch auf einen häufig anzutreffenden Vorwurf eingehen. Und zwar lese ich immer wieder, die Physik sei total unanschaulich und die Physiker würden ihre Unwissenheit in komplizierten mathematischen Formeln verbergen, so daß kein Laie überprüfen könne, was jetzt richtig oder falsch sei.

Ich möchte jedem Leser der diese Meinung teilt einmal empfehlen, eine Arbeit aus der Physik mit einer Arbeit aus einem Ingenieurstudiengang zu vergleichen, beispielsweise aus der Elektrotechnik. Ich selbst schätze mich, was Physik und Mathematik betrifft, im Allgemeinen als recht gut ein. Aber ich muß zugeben, daß ich bei Drittsemester-Übungsaufgaben aus der Elektrotechnik gnadenlos versagen würde.

Dennoch habe ich seltsamerweise noch nie irgendwo gelesen, die Elektrotechnik sei unanschaulich, und die Elektrotechniker würden ihre Unwissenheit in ihren mathematischen Formeln verbergen.

Klar, daß die Elektrotechnik „richtig“ ist sieht jeder sofort, wenn er seinen Computer einschaltet oder mit seinem Handy telefoniert. Bei der Physik ist dies schwieriger. So erkennt beispielsweise kaum ein Laie, ob die bunten Linien und Spiralen auf den Monitoren eines Beschleunigers nun Elektronen oder Myonen oder sonstwas sind. Für einen Physiker haben diese Linien jedoch die gleiche Aussagekraft wie für den Laien das Funktionieren seiner Stereoanlage: er weiß, daß sich die dahinterstehende Theorie wieder einmal bestens bewährt hat - oder aber auch, daß sie falsch ist und modifiziert werden muß.

Und nur, weil die eine Wissenschaft besser „im Wohnzimmer“ überprüfbar ist, als die andere, soll erstere richtig, letztere falsch sein? Das, lieber Leser, ist ein sehr schwaches Argument.