

# Das Weltbild der modernen Physik

*Kurt Bräuer*

*Institut für Theoretische Physik, Universität Tübingen*

Sie finden:

Vortragsfolien und diesen Artikel auf [www.kbraeuer.de](http://www.kbraeuer.de) / Vortragsfolien / Kurt Bräuer: Weltbild (März 09)

Eine Ausführliche populärwissenschaftliche Darstellung dieser Inhalte in K.Bräuer: ‚Gewahrsein, Bewußtsein und Physik‘ Logos Verlag 2004

Die vollständige mathematische Ausarbeitung der Inhalte auf [www.kbraeuer.de](http://www.kbraeuer.de) / Skripte und Einführungen / Die einheitliche Begründung der physikalischen Gesetze und ihrer Phänomene (Buchtext 2008)

Alle Experimente werden in einer vereinfachten Form beschrieben.

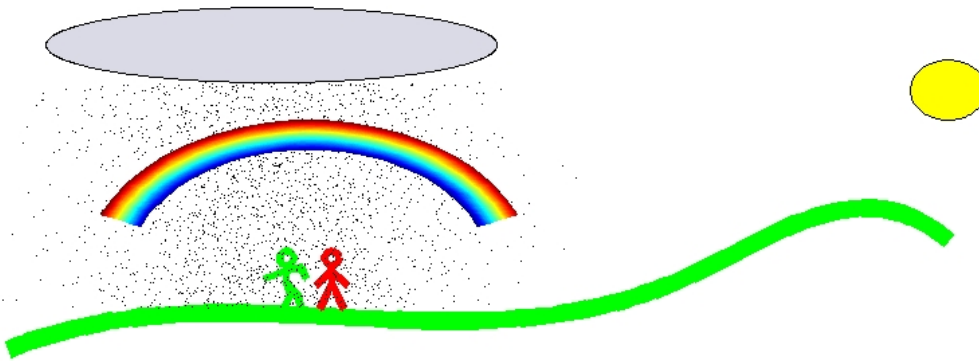


# 1. Relativität des Regenbogens

Die Sonne spickelt hinter einer Wolke hervor und ein feiner Nieselregen zieht übers Land. Das sind die Voraussetzungen für ein wundervolles Farbspektakel am Himmel, für einen Regenbogen.

Der Regenbogen ist sehr symbolträchtig. Kinderbücher zeigen, wie auf ihm die Babys auf die Erde rutschen und Judy Garland verspricht sich in ihrem Lied 'Over the rainbow' dort einen immerwährenden blauen Himmel. Im Alten Testament ist der Regenbogen ein Zeichen des Bundes, den Gott mit Noah und den Menschen schloss. Gott versprach nach dem Ende der Sintflut: 'Ich will hinfort nicht mehr die Erde verfluchen um der Menschen willen, denn das Dichten und Trachten des menschlichen Herzens ist böse von Jugend auf.' (1.Mose 8,21)

Auch physikalisch ist der Regenbogen etwas Besonderes. Er ist kein Objekt, das unabhängig vom Beobachter existiert. Er erscheint, wenn Sonne, Regen und Beobachter in einer geeigneten räumlichen Beziehung zueinander stehen. Wie und wo er erscheint, hängt von dieser Beziehung ab. Man kann nichts über einen Regenbogen sagen, ohne den Beobachter mit einzubeziehen.



*Ein Regenbogen erscheint, wenn Sonnenlicht eine Regenwand bescheint. Die Position des Regenbogens hängt von der Position des Betrachters ab. Der Regenbogen ist ein Phänomen, kein Objekt. Ohne Beobachtung gibt es keinen Regenbogen.*

*Abbildung 1-1*

Ein Regenbogen existiert relativ zum Beobachter. Und genau das findet die moderne Physik auch für Raum, Zeit und für die 'Grundbausteine' der Materie. Diese Relativität prägt die moderne Physik und ist Grundlage eines neuen Weltbildes. Raum, Zeit und Materie können nicht länger als unabhängig vom Beobachter angesehen werden. Sie haben keine vom Beobachter unabhängige Existenz und Bedeutung.

Im Bild der klassischen Physik ist die Welt ein Raum, der Materie erfüllt ist. Raum, Zeit und Materie sind absolut, sie existieren und entwickeln sich im Wesentlichen unabhängig vom menschlichen Beobachter. Die Materie bewegt sich auf Bahnkurven und dieser Bewegung wird beliebig genaue Berechenbarkeit und Vorhersagbarkeit unterstellt. Diese klassische Welt erscheint durch 'Maß und Zahl beherrschbar', wie es einst Laplace ausdrückte.

In diesem Bild gründet sich die menschliche Existenz auf einen Urknall, eine kosmologische Entwicklung und auf eine biologische Evolution. Aus der soll am Ende der Mensch hervorgegangen sein. Raum für Spiritualität gibt es kaum.

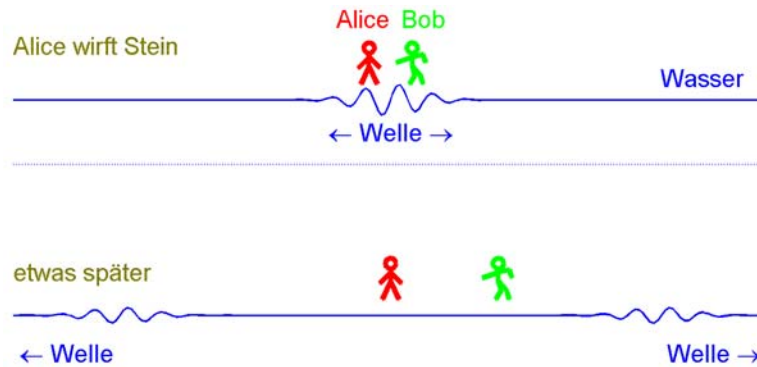
Eine Relativierung dieses klassischen Weltbildes ist sicher von Bedeutung. Der Regenbogen kann uns helfen, die wichtigen Aspekte der modernen Physik zu begreifen.



## 2. Relativität von Raum und Zeit

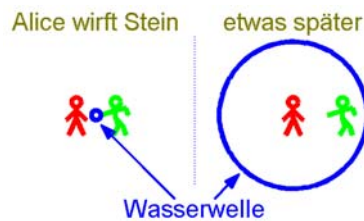
### Absolute Raumzeit

An einem sonnigen, windstillen Morgen steht Alice am See und wirft einen Stein. Dieser erzeugt eine Welle, die sich kreisförmig um Alice herum ausbreitet. Bob kommt in seinem Ruderboot vorbei. Auch er bewegt sich im Kreis der Welle, die Aliceens Stein ausgelöst hat. Aber weil er rudert, bewegt er sich aus dem Kreiszentrum heraus.



*Alice wirft zur Zeit  $t=0$  einen Stein ins ruhende Wasser. Die Wellen breiten sich nach allen Richtungen hin mit gleicher Geschwindigkeit aus. Bob rudert in seinem Boot vorbei. Er rudert hinter der einen Wellenfront her und lässt die andere weit hinter sich zurück.*

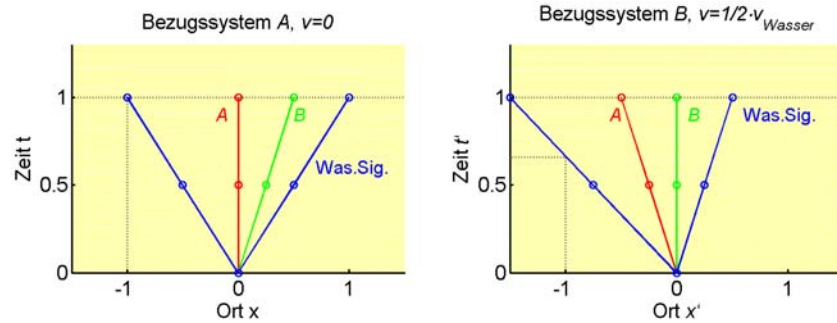
Abbildung 2-1



*Von oben betrachtet sieht man, wie Alice im Zentrum eines sich ausbreitenden Wellenkreises bleibt, während sich Bob aus dem Zentrum herausbewegt.*

Abbildung 2-2

Zur objektiven Betrachtung der raumzeitlichen Abläufe lässt man nun Sonne, Wind, Tageszeit, Stimmung und vieles mehr außer Acht. Man trägt relevante Zeiten und Positionen in ein Koordinatensystem ein. Wie man das macht, ist nicht eindeutig. Man kann sich auf Alice beziehen und die raumzeitlichen Beziehung so eintragen, dass Alice am Ort  $x=0$  verbleibt. Das erscheint nahe liegend, weil Sie ja tatsächlich ruht, wenigstens relativ zum Untergrund oder zum Wasser. Man kann aber auch irgendein anderes Bezugssystem wählen, etwa das in dem Bob eine feste Position  $x'=0$  behält.



Koordinatensysteme, in die der Ort und die Zeit des Steinwurfs und die Positionen von Alice (A), Bob (B) und des Wassersignals zu den Zeiten  $t=0.5$  und  $1$  als Krinkel eingetragen sind. Die Krinkel sind durch so genannte Weltlinien miteinander verbunden. Links wurde ein Bezugssystem gewählt, in dem Alice ruht und Bob seine  $x$ -Koordinate mit der Zeit ändert. Rechts ändert sich die  $x'$ -Koordinate von Alice mit der Zeit, Bob bleibt am selben Ort.

Abbildung 2-3

Die beiden Systeme oder auch Karten der raumzeitlichen Beziehung sind nicht identisch, die einzelnen Linien sind etwas verdreht. Aber alle räumlichen und zeitlichen Abstände, die man entnehmen kann, sind in beiden Karten gleich, etwa der Abstand zwischen Alice, Bob und den Wellenfronten nach einer Zeiteinheit ( $t=1$ ).

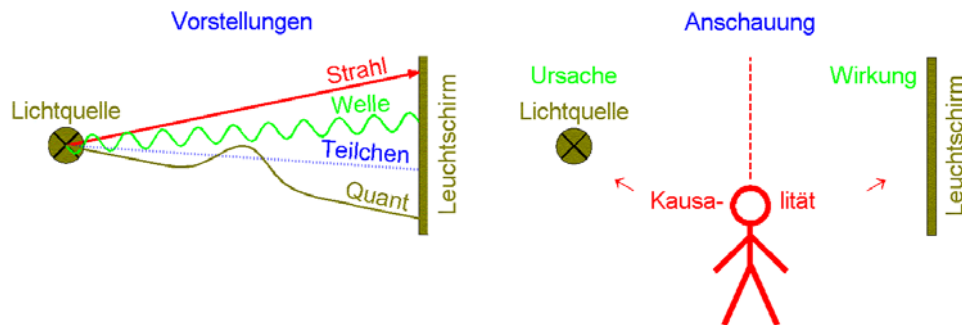
Insofern kann jeder jede Karte verwenden und findet die für ihn richtigen räumlichen und zeitlichen Abstände. Die Karten beschreiben sozusagen dieselbe Raumzeit. Der Raum ist hier unabhängig vom einzelnen Beobachter. Man bezeichnet ihn als absoluten Raum.

### Relative Raumzeit

Ein entsprechendes Experiment kann man auch mit Lichtsignalen machen. Alice schaltet eine Leuchte an und beobachtet, wie das Lichtsignal auf einen Gegenstand trifft und ihn beleuchtet.

Unsere Vorstellung darüber, wie es zur Beleuchtung des Gegenstandes kommt, ist ganz ähnlich wie beim Wassersignal. Die Leuchte löst eine Lichtwelle aus, die sich durch den Raum zum Gegenstand ausbreitet.

In der sorgfältigen Anschauung offenbaren sich jedoch gravierende Unterschiede. Beim Wassersignal nehmen wir das Wasser und dessen sich ausbreitende Wellenbewegung wahr. Beim Lichtsignal sehen wir außer der Lichtquelle und dem beleuchteten Objekt gar nichts. Da gibt es eine Ursache und eine Wirkung. Alles andere dazwischen ist reine Vorstellung.



Je nach Bedarf stellen wir uns die Ausbreitung von Lichtsignalen auf der Basis von Strahlen, Wellen, Teilchen (Photonen) oder Lichtquanten vor. In der Anschauung erscheint jedoch ausschließlich die Lichtquelle als Ursache des Signals und der beleuchtete Schirm als Wirkung. Wir stellen einen Kausalzusammenhang her.

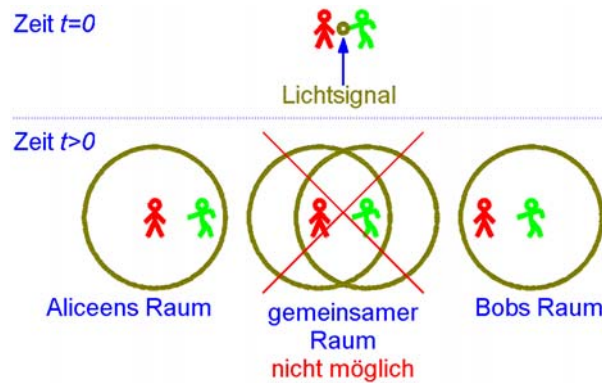
Abbildung 2-4

Es gibt keine objektive Grundlage, auf die sich die Ausbreitung des Lichtsignals beziehen könnte. Beim Wassersignal in Abbildung 2-1 war diese objektive Grundlage eben das Wasser. Die Ausbreitung des Signals fand in Bezug auf das ruhende Wasser statt. Alice und Bob waren im Grunde unbeteiligte Beobachter. Beim Licht unterstellte man lange Zeit einen Äther, der sehr fein sein sollte und daher nicht direkt beobachtbar war. Diese Annahme wurde aber widerlegt. Es stellte sich heraus, dass für die Ausbreitung von Lichtsignalen tatsächlich keine objektive Grundlage hat. Die Geschwindigkeit der Lichtsignale ist in jedem Bezugssystem dieselbe. Unabhängig vom Bezugssystem legt ein Lichtsignal etwa 300.000 Kilometer pro Sekunde zurück. Man sagt: die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtsignalen ist  $c \cong 300.000 \text{ km/s}$ .

Stellt Alice rechts und links von sich in 300 Metern Entfernung Leuchtschirme auf, dann leuchten diese 1 Mikrosekunde (0.000001 Sekunden) nach Einschalten der Leuchte auf.

Bob beobachtet dasselbe Lichtsignal wie Alice. Allerdings führt er zwei eigene Leuchtschirme mit, die sich im Abstand von 300 Metern vor und hinter ihm mit ihm bewegen. Dann stellt er fest, dass auch seine Leuchtschirme nach 1 Mikrosekunde aufleuchten. Aliceens Leuchtschirme sieht er zu anderen Zeiten aufleuchten.

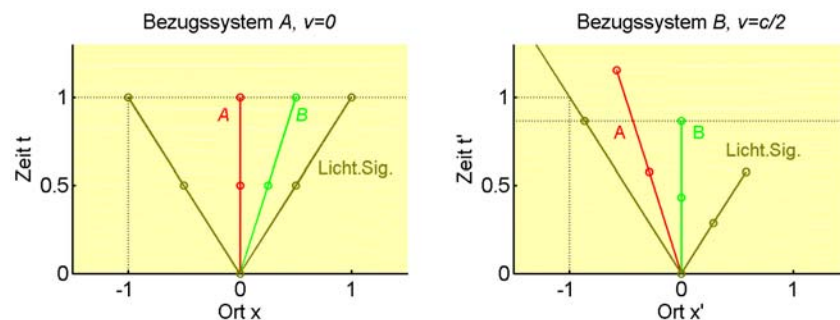
Dieses Ergebnis erschüttert unser Weltbild. Es widerspricht all unseren Erwartungen und unseren alltäglichen Erfahrung. Es ist nicht möglich, die Beobachtungen von Alice und Bob mit demselben Lichtsignal in einem gemeinsamen, von der einzelnen Beobachtung unabhängigen Raum unterzubringen.



Ein Lichtsignal breitet sich unabhängig vom Bezugssystem nach allen Seiten mit der Geschwindigkeit  $c$  aus. Nach der Zeit  $t$  leuchtet ein Schirm im Abstand  $r=ct$  auf. Jeder Beobachter finde sich sozusagen im Zentrum einer mit der Zeit größer werdenden Signalkugel vom Radius  $r$ . Das gilt für jeden Beobachter. Jedoch hat jede Kugel ein einziges, eindeutiges Zentrum. Anders als bei Wassersignalen können daher die raumzeitlichen Beziehungen verschiedener Beobachter nicht in eine einzige Karte richtig eingetragen werden. Alles Raumzeitliche bezieht sich auf den jeweiligen Beobachter.

Abbildung 2-5

Mathematisch ist es nicht schwer, die raumzeitlichen Beziehungen aus einem Bezugssystem auf ein anderes zu übertragen. Das leistet die so genannte Lorentz-Transformation. Raum-Zeit Punkte aus einem Bezugssystem werden dabei so in das andere Bezugssystem abgebildet, dass die Ausbreitung von Lichtsignalen immer denselben Geschwindigkeitswert  $c$  behält. Die Weltlinien des Lichtsignals sind in jedem Bezugssystem gleich.



Die raumzeitlichen Beziehungen der Lichtsignale können im Bezugssystem von Alice (A) ganz gleich wie die von Wassersignalen dargestellt werden. Im selben Zeitraum kommt das Lichtsignal halt sehr viel weiter als das Wassersignal. Die einzelnen Ereignisse (Kringel) und Weltlinien können mit der Lorentz-Transformation in Bobs Bezugssystem (B) übertragen werden. Die Weltlinien des Lichtsignals bleiben dabei gleich, aber die Einzelereignisse verschieben sich in Raum und Zeit. Es gibt keine gemeinsame Karte, aus der Alice und Bob ihre jeweils richtigen räumlichen und zeitlichen Abstände entnehmen können.

Abbildung 2-6

Die Größe eines Gegenstandes hängt damit genau genommen vom Bezugssystem des Beobachters ab. Genau genommen macht es keinen Sinn, über räumliche und zeitliche Abstände zu sprechen, ohne sich auf einen konkreten Beobachter zu beziehen. Raum und Zeit sind relativ in dem Sinn, in dem auch der Regenbogen relativ ist.



## Die Natur des Raumes

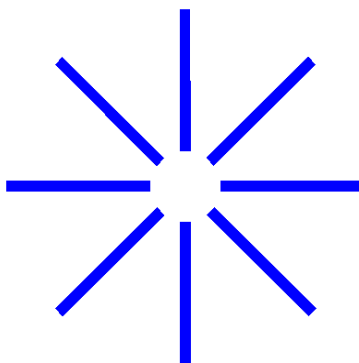
Wir erleben Raum, Zeit und Materie als äußere Welt und als Grundlage unserer Existenz. Diese Welt scheint unabhängig von uns, so wie sie ist, zu existieren. Die Auffassung, dass das tatsächlich so ist, nennt man in der Philosophie 'Naiven Realismus'. Wir erleben die Welt nicht direkt, wir erleben sie bewusst, wir erkennen einzelne Weltinhalte.

Grundlage dafür sind Dinge, die wir kennen, über die wir etwas wissen, die also in unserem Gedächtnis repräsentiert sind. Auf dieser Grundlage entwickelt sich im Bewusstsein das Bild, das wir als reale Welt erleben. Es besteht aus Einzelheiten, die nebeneinander, übereinander oder hintereinander angeordnet sind. Das ist die Grundstruktur des Raumes, das hintereinander, nebeneinander und übereinander der einzelnen Weltinhalte. Es ist die Grundlage unseres bewussten Welterlebens.

Die Welt selber besteht nicht aus einzelnen Objekten in räumlicher Beziehung. Ein Baum reicht mit seinen Wurzeln weit ins Erdinnere. Er besteht zum Teil aus Wasser, das unbegrenzt mit allem Wasser der Erde in Verbindung steht. Er besteht zum Teil aus Sauerstoff, der unbegrenzt mit allem Sauerstoff der Erde in Verbindung steht. Wir erkennen einen Baum als isoliertes Objekt, weil wir Bilder von Bäumen in uns tragen. Diese Bilder verleihen unseren Bewusstseinsinhalten kontextunabhängige Eigenschaften. Das Bewusstsein lässt die Welt objektiv erscheinen.

Raum entsteht nicht durch Urknall und Kosmologie, sondern durch Teilen der Welt in einzelne Inhalte. Wir nehmen ein leeres Blatt Papier und zeichnen eine vertikale Linie. So entsteht ein getrenntes Links und Rechts, eine räumliche Struktur. Wir haben Raum geschaffen.

Wie tief dieses Raumschaffen selbst in unserer Physiologie verankert ist, zeigt folgende Graphik.



*Das Bild zeigt acht Linien in sternförmiger Anordnung. Unter Umständen erkennen wir innerhalb der Linien auch einen hellen Kreis mit deutlichem Rand. Dies ist jedoch eine optische Täuschung. Der Kreis hat keine vom Beobachter unabhängige Existenz.*

*Abbildung 2-7*

Unser Welterleben unterscheidet eine subjektive Innenwelt und eine objektive Außenwelt. Diesen so genannten Kartesischen Schnitt hat unsere Kultur erst im Mittelalter vollständig vollzogen. Davor wurde auch die Außenwelt als geistig durchdrungen erlebt und Äußeres stand in unmittelbarer Verbindung mit Gedanken und Gefühlen. Wir sind heute gerne der Meinung, dass diese Trennung zwischen Innen und Außen schon immer bestand und der frühere Mensch halt noch nicht so klar im Kopf war. Dieser Kartesische Schnitt scheint aber doch eine recht moderne Kulturschöpfung zu sein.

## Die Natur der Zeit

Die Welt verändert sich ständig. Dass wir das als Zeit erleben, liegt daran, dass wir uns an Vergangenes erinnern und uns Zukünftiges vorstellen können. Wir stellen Bilder der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nebeneinander und erleben so Zeit eigentlich in einer räumlichen Ordnungsstruktur.

Zeit ist sicher nichts Objektives. Sie ist weder gegenständlich noch kontextunabhängig. Manchmal erscheint uns sehr wenig Zeit vergangen zu sein, bis sich der große Zeiger unserer Armbanduhr einmal im Kreis herumgedreht hat, manchmal erscheint uns, dass er dazu sehr viel Zeit braucht.

Die Zeit wird objektiviert durch Zeitmessung, etwa mit einer Sonnenuhr, Sanduhr, mit Pendelschlägen und Quarzoszillationen. Mit Koordinatensystemen machen wir uns Bilder zeitlicher Bezüge, wie etwa in Abbildung 2-3. In solchen Bildern können wir zeitliche Bezüge sehr gut gedanklich oder bewusst erfassen und verwenden. Diese Bilder sind Objekte, die uns helfen, die Zeit in der Welt zu erkennen. Wir projizieren diese Bilder in die Welt hinein und kommen so zum Erleben einer objektiven Zeit.

Diese Zeit ist eine kulturelle Errungenschaft der Menschheit. Unsere Existenz beruht dagegen auf einer immerwährenden, sich laufend wandelnden Gegenwart.

# 3. Relativität der Materie

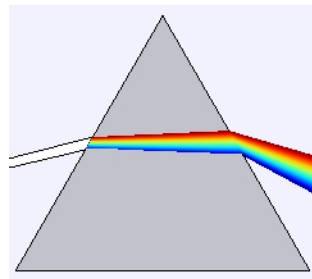
## Die Erforschung atomarer Strukturen

Atomare Strukturen sind unserer Wahrnehmung nicht unmittelbar zugänglich. Nur weil wir alle Gegenstände zumindest im Prinzip immer wieder zerteilen können, gehen wir davon aus, dass man am Ende zu kleinsten Bausteine der Materie kommt, zu den Atomen.

Zu diesen atomaren Strukturen findet man auf zwei Arten Zugang. Man kann das Licht analysieren, das von ihnen kommt und man kann sie mit Elektronen beschießen und aus deren Ablenkung auf die Struktur der Streuzentren schließen.

### *Spektralanalyse*

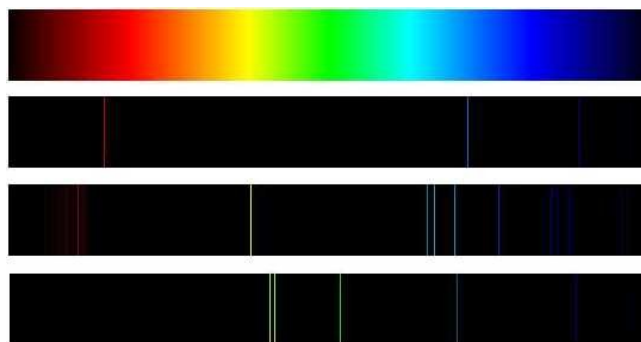
Licht kann man mit einem Prisma analysieren.



*Fällt weißes Licht auf ein Prisma, so erscheinen auf bekannte Weise die Farben des Regenbogens.*

*Abbildung 3-1*

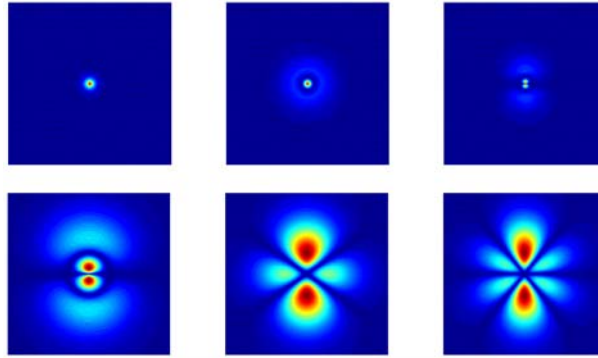
Fällt Licht von glühendem Gas, etwa von einer Quecksilberdampfampe so auf ein Prisma, findet man nicht das vollständige Farbspektrum des Regenbogens, sondern nur einige, sehr scharfe so genannte Spektrallinien an den entsprechenden Stellen des Regenbogenspektrums.



*Das Spektrum von weißem Licht oben zeigt alle Farben des Regenbogens, die Spektren verschiedener glühender Gase zeigen einige scharfen Spektrallinien..*

*Abbildung 3-2*

Scharfen Spektrallinien deuten darauf hin, dass die Lichtquelle eine mit der entsprechenden Frequenz schwingende Verteilung elektrischer Ladung ist. Wie eine Klaviersaite hat jeder durch Ränder begrenzte Schwingungsvorgang eine relativ scharfe Frequenz. Man kann die möglichen Schwingungsformen entsprechender elektrischer Ladungsverteilungen berechnen und findet genau die richtigen Frequenzen zu den Spektren in Abbildung 3-2.



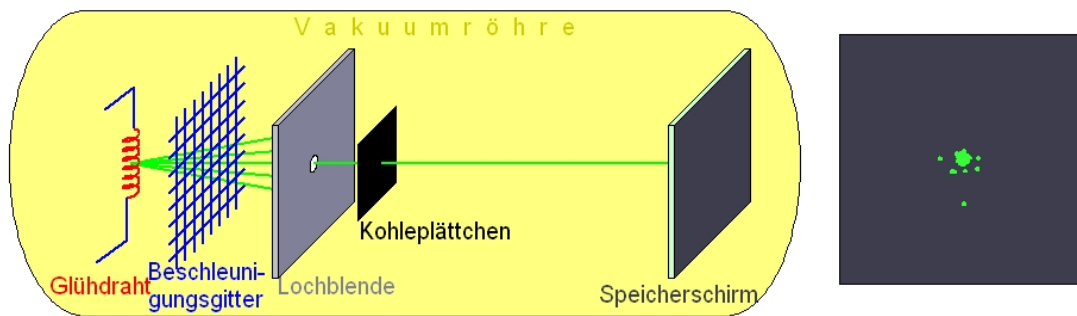
Schnitte durch mögliche Verteilungen der elektrischen Ladung im Atom. Die quantenmechanischen Schwingungsmöglichkeiten dieser Ladungsverteilungen führen exakt zu den Spektren in Abbildung 3-2

Abbildung 3-3

Atome erscheinen so als recht homogene Ladungsverteilungen mit vielfältigen Schwingungsmöglichkeiten.

### Elektronenstreuung

Ein anderes Experiment zur Untersuchung atomarer Strukturen geht auf Rutherford zurück. In einer Elektronenröhre wird die Ablenkung von Elektronen an dünnen Materieschichten untersucht.

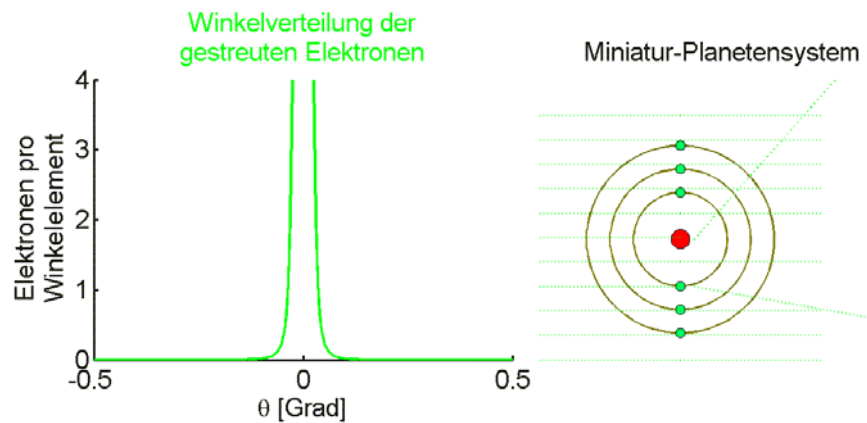


Eine Elektronenröhre besteht aus einer Vakuumröhre, einem Glühdraht, einem Beschleunigungsgitter, einer Lochblende und einem Leuchtschirm. Eine Fernsehrohr ist so aufgebaut. Zur Untersuchung atomarer Strukturen gibt es noch ein Kohleplättchen, durch das der Elektronenstrahl gelenkt wird. Auf dem Leuchtschirm rechts wird das Auftreffen der Elektronen beobachtet.

Abbildung 3-4

Man stellt fest, dass die meisten Elektronen unbeeinflusst das Kohleplättchen durchdringen und im Zentrum des Leuchtschirmes auftreffen. Nur ein kleiner Bruchteil wird auf sehr charakteristischer Weise abgelenkt und trifft dezentral auf den Schirm.

Daraus ergibt sich, dass die Materie aus sehr kleinen Streuzentren mit relativ großem Abstand besteht. Aus der Winkelverteilung der abgelenkten Elektronen kann die genaue Größe der Streuzentren berechnet werden. Die Anzahl der Atome pro Volumeneinheit kennt man aus chemischen Untersuchungen, so dass man insgesamt ein recht konkretes Bild der atomaren Struktur bekommt.



Die Winkelverteilung der gestreuten Elektronen konzentriert sich um den Winkel  $\theta=0$ . Aus der gesamten Verteilung ergibt sich die Größe der Streuzentren. Insgesamt erscheint hier das Atom als Kern, der fast die gesamte Atommasse in sich trägt. Er wird von noch wesentlich kleineren und leichteren Elektronen umkreist.

Abbildung 3-5

## Die Relativität der Atome

Atome sind nicht wahrnehmbar. Wir stellen uns vor, dass die Materie aus Grundbausteinen zusammengesetzt ist. Das spiegelt die wesentliche Art unseres Denkens und unseres Bewusstseins wieder. Im Bewusstsein wird das Bild, das wir als Welt erleben, aus einzelnen Objekten aufgebaut. Die so erscheinende Welt können wir bewusst begreifen und gedanklich fassen. Dieses Denken führt uns auch auf die Atome.

Diese erweisen sich nun aber nicht als so objektiv oder dinglich, wie es unser Denken gerne hätte. Die Struktur der Atome hängt von der Art ab, mit der man sie untersucht. Einmal findet man eine wellenartige Struktur, das andere mal eine teilchenartige. Ohne die Art der Beobachtung anzugeben, macht es keinen Sinn, über Atome zu reden. Wie der Regenbogen existieren sie nur im Zusammenhang mit der konkreten Beobachtung.

Zu begreifen ist das nicht. Begreifen können wir nur dingliche Weltinhalte. Den Regenbogen können wir auch nicht (be-)greifen. Wenn wir uns ihm nähern, weicht er zurück und verschwindet am Ende.

Wir können die logischen Zusammenhänge verstehen, so wie bei der Unabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtsignalen  $c$ . Und wir können so verstehen, dass unser Weltbild eben ein Bild der Welt ist und nicht die Welt selber.



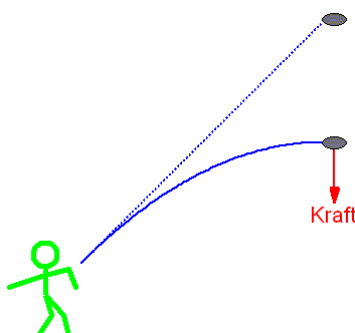
# 4. Relativität der physikalischen Grundgesetze

## Kontextunabhängigkeit oder Objektivität als Grundlage der physikalischen Grundgesetze

Die Grundgesetze der Physik ergeben sich eindeutig aus der Forderung nach Kontextunabhängigkeit oder Objektivität der physikalischen Phänomene. Nur das ist (wieder-)erkennbar oder bewusstseinsfähig, das immer wieder in derselben Weise in Erscheinung tritt. Wenn man das sehr genau nimmt und diese Forderung auf quantitativer Ebene stellt, kommt man zur mathematischen Naturbeschreibung, also zur Physik.

### *Trägheit und Masse*

Die Bewegung eines geworfenen Steins ist nur erkennbar und vorhersagbar, wenn sie keinerlei Willkür unterliegt, wenn sie unter gleichen Voraussetzungen auch gleich ist. Ohne Grund darf der Stein seinen Bewegungszustand oder Impuls nicht ändern, er fliegt gerade aus. Grund für eine Impulsänderung ist eine Kraft. Die Änderung der Geschwindigkeit des Steines ist proportional zu dieser Kraft. Die Proportionalitätskonstante bezeichnen wir als Masse. Die Impulsänderung ist Masse mal Geschwindigkeitsänderung und damit ist Masse mal Beschleunigung gleich Kraft.



*Ein Stein wird geworfen. Seine Flugbahn ist nur (wieder-)erkennbar oder gar vorhersagbar, wenn seine Bewegung keinerlei Willkür unterliegt. Ohne Grund für eine Änderung des Bewegungszustandes fliegt der Stein gerade aus. Grund für einen geänderten Bewegungszustand ist eine Kraft. Die Änderung des Bewegungszustandes oder Impulses ist gleich der Kraft. Idealisiert man die Bewegung des Steines zu einer Bahnkurve, kommt man so zu den Newtonschen Axiomen.*

Abbildung 4-1

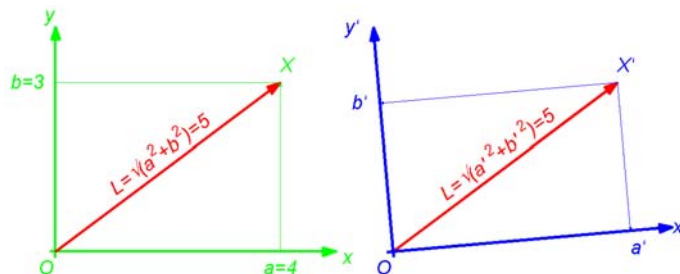
Die Bewusstseinsfähigkeit der Weltinhalte impliziert ihre träge Masse. Im Bewusstsein erscheint die Welt massiv.

## Länge von Vektoren als kontextunabhängige Größen der mathematischen Weltbeschreibung

Nur für reproduzierbare Messungen können mathematische Gesetzmäßigkeiten aufgestellt werden. Die Messgröße darf dafür nicht von speziellen räumlichen oder zeitlichen Umständen abhängen.

Das Koordinatensystem, in dem man die räumlichen und zeitlichen Beziehungen der einzelnen Weltinhalte, etwa des Steins, beschreibt, ist jedoch willkürlich. In Abbildung 2-3 etwa hat Alice ein anderes Bezugs- oder Koordinatensystem als Bob. Gemeinsam in Ihren beiden Bezugssystemen

men sind jedoch die räumlichen und zeitlichen Abstände der Ereignisse (Kringel). Mathematisch gibt man diese Ereignisse, also Raumpunkte oder auch Raumzeitpunkte, durch Vektoren an. Indem man Vektoren in geeigneter Weise miteinander multipliziert, bekommt man Zahlen, die Unabhängig vom Bezugssystem sind. Dies ist Grundlage für die Ableitung der physikalischen Naturgesetze.



Die Position des Punktes  $X$  wird links durch den Vektor  $X=(a,b)$  beschrieben. Der Abstand zwischen  $X$  und Ursprung  $O$  ergibt sich nach dem Lehrsatz des Pythagoras zu  $L=5$  Längeneinheiten. Man berechnet  $X \cdot X = a^2 + b^2 = L^2$ . Im Bild rechts wurde ein anderes Koordinatensystem gewählt. Hier ist  $X' \cdot X' = a'^2 + b'^2 = L^2$ . Die Länge des Vektors bzw. der Abstand des Punktes vom Ursprung ist jedoch in beiden Koordinatensystemen gleich.

Abbildung 4-2

## Die Lichtgeschwindigkeit $c$ und das Plancksche Wirkungsquantum $h$

Zwei Zahlen sind für die Physik ganz besonders wichtig, die Lichtgeschwindigkeit  $c$  und das Plancksche Wirkungsquantum  $h$ . Diese Zahlen sind unabhängig von räumlichen und zeitlichen Bezügen und man nennt sie daher Naturkonstanten. Neben den Massen und Ladungen der Elementarteilchen sind dies die einzigen fundamentalen Naturkonstanten.

### Vierer-Ort und Lichtausbreitung

Um die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtsignalen  $c$  mit der Länge eines Vektors in Verbindung zu bringen, könnte man schreiben

$$\begin{array}{ccc} \text{Bezugssystem A} & & \text{Bezugssystem B} \\ \hline \vec{x} \cdot \vec{x} & = & c^2 t^2 \\ \text{Abstandsquadrat des Leuchtschirms von der Lichtquelle} & & \text{Quadrat des Lichtwegs in der Zeit } t \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \vec{x}' \cdot \vec{x}' & = & c^2 t'^2 \\ \text{Abstandsquadrat des Leuchtschirms von der Lichtquelle} & & \text{Quadrat des Lichtwegs in der Zeit } t' \end{array} \quad (4-1)$$

$c$  erhält keinen Strich! Da beim Übergang zu einem anderen Koordinatensystem die Zeit so wie der Ort transformiert wird, ist es jedoch notwendig, die Zeitkoordinaten mit in den Vektor aufzunehmen und zu so genannten Vierervektoren überzugehen.

$$\begin{array}{ll} \text{Vierer-Ort:} & x_\mu \equiv (x, y, z, ct) \\ \text{Länge:} & x_\mu \cdot x_\mu \equiv x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \end{array} \quad (4-2)$$

Berechnet man die Länge des Vierervektors nach (4-2), so beschreiben Vektoren der Länge 0 gerade die Ausbreitung von Lichtsignalen, unabhängig vom Bezugssystem.

### Vierer-Impuls und Energieerhaltung

Die zeitliche Änderung des Ortsvektors führt auf den Geschwindigkeitsvektor, oder, mit der Masse multipliziert, auf den

$$\text{Vierer-Impuls: } p_\mu \equiv m_0 \underbrace{\frac{d}{d\tau} x_\mu}_{\text{zeitliche Änderung des Viererortes}} \quad (4-3)$$



Damit die Länge dieses Vierervektors unabhängig vom Bezugssystem ist, muss man der Definition die invariante Masse  $m_0$  und die invariante Zeit  $\tau$  zugrunde legen. Es ist die Masse und die Zeit im Ruhesystem eines Beobachters.

Aus der Unabhängigkeit der Länge dieses Vierervektors folgt mit ein klein wenig Mathematik, dass bei jeder Bewegung von Materie die Energie erhalten bleiben muss und dass Energie und Materie äquivalent sind, also ineinander überführt werden können. Das ist die Grundlage von Atomkraft und Atombomben.

### *Wirkung, Unschärfe und Plancksches Wirkungsquant*

Multipliziert man Vierer-Ort und Vierer-Impuls, so erhält man eine weitere Größe, die unabhängig vom Bezugssystem sein muss, die

$$\text{Wirkung } S \equiv p_\mu \cdot x_\mu \quad (4-4)$$

Da Impuls ja Kraft mal Zeit ist, fasst die Wirkung die drei Grundmessgrößen der Physik, nämlich Ort, Zeit und Kraft zu einer Größe zusammen. Sie ist unabhängig vom Bezugssystem und daher für das Verständnis der physikalischen Grundgesetze wesentlich.

Auf diese Größe bezieht sich daher auch das Maß der Genauigkeit, mit der raumzeitliche Veränderungen der Materie überhaupt erfasst werden können, nämlich das Plancksche Wirkungsquantum  $h$ .

Dem klassischen Weltbild entsprechend gehen wir ja eigentlich davon aus, dass sich Materie auf Bahnkurven bewegt. Jeder Masse sollte zu jedem genau festgelegten Zeitpunkt eine genaue Position im Raum zugeordnet werden können. Diese Bahnkurven sind jedoch rein gedanklicher Natur, sie sind nicht wirklich beobachtbar.

Für jede Ortsmessung braucht man einen Maßstab, etwa einen Meterstab, ein Geodreieck oder eine Schublehre. Man hat natürlich noch viel genauere Messverfahren entwickelt, jedoch ist jede Ortsmessung durch den ihr zugrunde gelegten Maßstab begrenzt. Jede Ortsmessung hat eine gewisse Unschärfe  $\Delta x$ . Für Messungen mit einem Geodreieck ist  $\Delta x$  etwa ein halber Millimeter.

Der Impuls einer Masse ist per Definition immer ein mittlerer Impuls. Man teilt eine Wegstrecke durch die Zeit, die eine Masse für diese Wegstrecke gebraucht hat. Geschwindigkeitsschwankungen innerhalb der Wegstrecke werden nicht erfasst. Man kann die Wegstrecke natürlich sehr klein wählen und die Zeit sehr genau messen. Aber das hat prinzipielle Grenzen. Der Grenzübergang zur unendlich kleinen Wegstrecke ist eine geniale mathematische Technik, entzieht sich jedoch den wirklichen Möglichkeiten. Jeder Impuls hat daher eine gewisse Unschärfe  $\Delta p$ . Die Bahnkurven der klassischen Mechanik existieren nicht wirklich.

Das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  gibt die natürliche Genauigkeitsgrenze für diese Messung an, in Form der

$$\text{Heisenbergschen Unschärferelation} \quad \underbrace{\Delta p}_{\substack{\text{Unschärfe} \\ \text{des Impulses}}} \cdot \underbrace{\Delta x}_{\substack{\text{Unschärfe} \\ \text{des Ortes}}} \geq \frac{h}{2\pi} \quad (4-5)$$

## **Ausbreitung von Wirkungen: Bahnkurven und Wahrscheinlichkeitsströme**

In den letzten Abschnitten haben wir gesehen, wie Raum, Zeit und Materie durch die moderne Physik relativiert werden. Sie sind nicht die Basis der physikalischen Phänomene, sondern treten immer nur in ganz konkreten Messungen in Erscheinung. Daraus ergibt sich eine neue Betrachtungsweise, die auch Quantenphänomene mit einschließt. Wir gehen von einer Ausbreitung von Wirkungen aus, nicht von einer Bewegung von Masse auf Bahnkurven.

Die Ausbreitung von Wirkungen unterliegt einer strengen Gesetzmäßigkeit. Die Energie bleibt erhalten, da die Länge des Vierer-Impulses unabhängig vom Bezugssystem sein muss. Nun gibt es zwei Möglichkeiten, diese Ausbreitung von Wirkungen mathematische zu beschreiben.

Im klassischen Fall geht man davon aus, dass sich die Wirkung über Massen auf Bahnkurven ausbreitet. Das führt unmittelbar auf die Newtonschen Bewegungsgleichungen, also auf Kraft gleich Masse mal Beschleunigung. Auf deren Basis werden Häuser und Maschinen gebaut, sie sind also sehr hilfreich. Allerdings hat das seine Grenzen. Chemie, Elektronik, LASER-Technik und noch einiges andere lässt sich in diesem Rahmen nicht begründen. Und sie führen uns auf ein sehr enges, materialistisches Weltbild.

Berücksichtigt man die allen Messungen zugrunde liegende Unschärfe, deren Mindestmaß durch das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  festliegt, so kommt man zu ganz anderem physikalischen Verhalten.

Die Unschärfe kann man nur statistisch Erfassen. An die Stelle der Bahnkurven der klassischen Mechanik tritt ein Wahrscheinlichkeitsstrom.

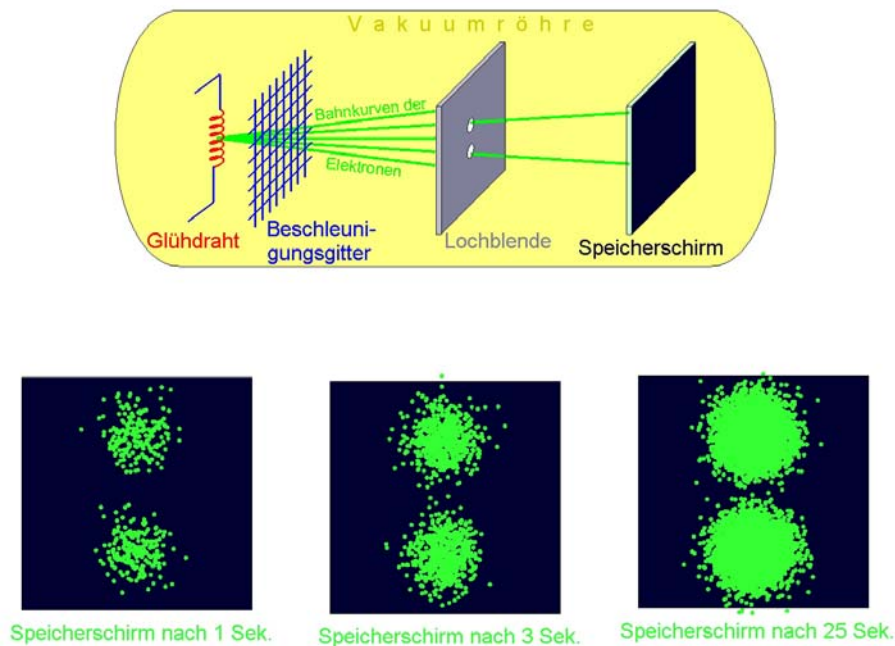
Ein Wasserstrom gibt an, wie viel Wasser pro Zeiteinheit durch eine bestimmte Fläche fließt, ein Wahrscheinlichkeitsstrom gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Detektor mit einer bestimmten Fläche pro Zeiteinheit anspricht. Man hält etwa einen Leuchtschirm wie in Abbildung 3-4 in einen 'Elektronenstrahl'. Der Wahrscheinlichkeitsstrom gibt an, wie viel Ereignisse pro Zeiteinheit zu erwarten sind.

Energieerhaltung für einen solchen Wahrscheinlichkeitsstrom führt auf die berühmte Schrödinger-Gleichung. Diese kann als Grundgleichung der Quantenmechanik angesehen werden, so wie die Newtonsche Bewegungsgleichung die Grundgleichung der klassischen Mechanik ist.

Sehr eigenartige Phänomene ergeben sich vor allem, weil diese Schrödinger-Gleichung Energieanteile enthält, die sich aus der Unschärfe und damit aus dem Wahrscheinlichkeitsstrom ergeben. Diese machen den eigentlichen Unterschied zwischen einer statistischen klassischer Mechanik und der Quantenmechanik aus.

## **Das Doppelspaltexperiment**

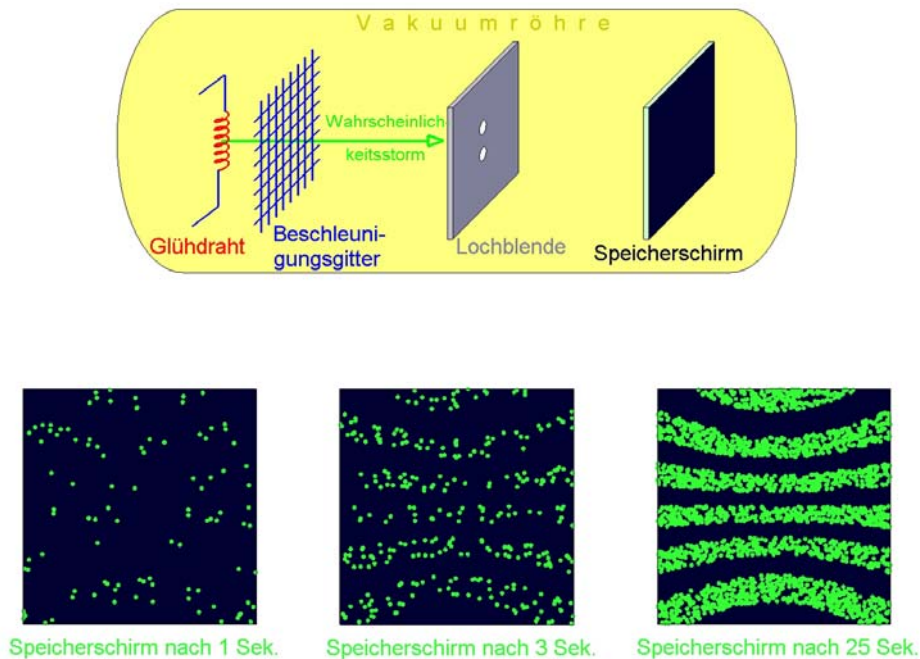
Die erstaunlichen Phänomene der Quantenmechanik lassen sich sehr gut am quantenmechanischen Doppelspaltexperiment studieren. Eine Elektronenröhre wird mit einer Doppelloch-Blende ausgestattet, die dem Elektronenstrahl zwei voneinander getrennte Durchgänge erlaubt. Man erwartet ganz selbstverständlich, dass sich die Elektronen entweder durch das eine Loch der Blende oder durch das andere bewegen und dass sie insgesamt ein Schattenbild der Lochblende auf dem Leuchtschirm erzeugen.



Nach unserer klassischen Vorstellung sollten sich die Elektronen auf Bahnkurven zur Blende hin bewegen. Einige sollte es durch das obere Loch schaffen, einige durch das untere. Nach einiger Zeit sollte sich auf dem Leuchtschirm das Schattenbild der Doppelspaltblende abzeichnen.

Abbildung 4-3

Man findet aber etwas ganz anderes, als man denkt. Zunächst erkennt man auf dem Leuchtschirm tatsächlich einzelne Ereignisse aufleuchten, die jedoch recht gleichmäßig über den Schirm verteilt sind. Mit der Zeit entwickelt sich ein Streifenmuster, wie es typisch ist für Wellen, die sich geeignet überlagern. Tatsächlich erzeugt eine Schallwelle oder eine Wasserwelle ein solches Muster, wenn man sie durch eine Doppelspaltblende aufspaltet und die einzelnen Komponenten wieder zusammenführt. Man bekommt genau das Muster wie in Abbildung 4-4. Aber dieses Muster prägt sich langsam und gleichmäßig aus. Einzelereignisse wie auf dem Schirm der Elektronenröhre treten beim Schall oder Wasser nicht auf.



*Auf dem Leuchtschirm der Elektronenröhre sind zunächst recht homogen verteilte Einzelereignisse beobachtbar. Mit der Zeit entwickelt sich daraus ein Streifenmuster, wie es ganz typisch ist für Interferenz von Wellen. Das Experiment zeigt gleichzeitig Wellen- und Teilchenaspekte der Elektronen.*

*Abbildung 4-4*

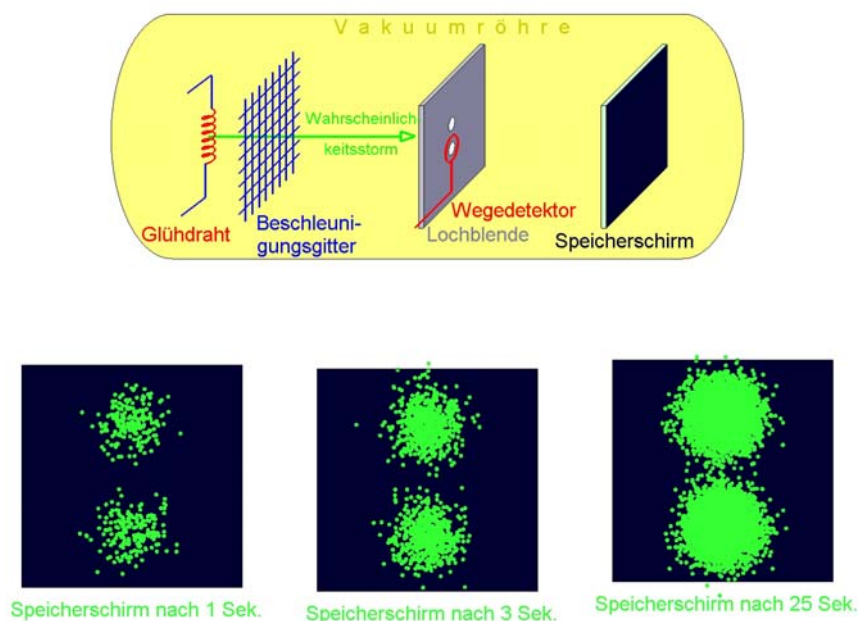
Wegen der prinzipiellen Unschärfe von Ort und Impuls betrachten wir die Ausbreitung der Wirkung als Wahrscheinlichkeitsstrom. Dieser breitet sich offensichtlich ganz so wie eine Welle aus und passiert beide Löcher der Blende. Es kommt zur Überlagerung der einzelnen Anteile und zur Interferenz. Darum ist die Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung eines Elektrons an manchen Stellen groß und an manchen Stellen fast null.

Das zeigt, dass dieser Wahrscheinlichkeitsstrom der Quantenmechanik nicht einfach die statistische Verteilung klassischer Bahnkurven beschreibt, sondern dass der Kausalzusammenhang zwischen Elektronenemission am Glühdraht und Beobachtung auf dem Schirm für jedes einzelne Ereignis über beide Löcher hergestellt wird. Mit klassischen Vorstellungen über Teilchen auf Bahnkurven ist das überhaupt nicht zu vereinbaren.

Die Wirkung breitet sich tatsächlich in einer Überlagerung von Möglichkeiten aus, die gleichzeitig vorhanden sind und sich gegenseitig deutlich beeinflussen. Erst bei der Beobachtung manifestiert sich eine der Möglichkeiten als konkretes Ereignis.

Dies ist im Wesentlichen die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik. Sie erklärt den Wellen-Teilchen-Dualismus und weist auf die Bedeutung des Beobachters hin. Zwischen Ursache und Beobachtung entwickelt sich die Wirkung als Überlagerung von Möglichkeiten. Erst in der Beobachtung manifestiert sich die reale, eindeutige Welt, die uns bewusst wird.

Das wird noch deutlicher, wenn man versucht, mit Hilfe eines Wegedetektors den Weg der Wirkung zu verfolgen.



Mit einem Wegedetektor wird gemessen, ob eine Wirkung das untere Loch der Blende passiert hat oder nicht. Das lässt sich praktisch verwirklichen, ohne dem Wahrscheinlichkeitsstrom merklich Energie oder Impuls zu entziehen. Trotzdem ist der Einfluss auf den Ausgang des Experiments dramatisch. Der Wegedetektor spricht in 50 % der Ereignisse auf dem Leuchtschirm an und das Muster auf dem Leuchtschirm entspricht nun ganz dem der klassischen Erwartung, nämlich einem Schattenbild der Lochblende.

Abbildung 4-5

Im Rahmen der Kopenhagener Interpretation wird dies wieder erklärt. Durch die Beobachtung des Weges wird die Überlagerung der Möglichkeiten an der Blende reduziert zu einer Tatsache. Die Wirkung nimmt nun eindeutig den oberen Weg oder den unteren. Sie hat nur noch eine Komponente, die kein Wellenmuster auf dem Schirm erzeugen kann.

Durch die Beobachtung manifestiert sich die eindeutige Wirklichkeit direkt an der Blende, obwohl das System im klassischen Sinne nicht beeinflusst wird. Ohne zu sagen, ob der Weg des Elektrons beobachtet wird oder nicht, kann über das Phänomen wieder nichts ausgesagt werden. Der Beobachter ist ein wesentlicher Teil des Phänomens. Er ist nicht wegzudenken. Die von uns erlebte klassische Welt existiert so nur in Zusammenhang mit dem Beobachter.

## Die Natur der physikalischen Gesetze

Ein bewusstes Welterleben führt zu einer dinglichen, massiven Welt. Alle zeitliche Entwicklung muss den strengen Gesetzen der Objektivität oder Kontextunabhängigkeit unterliegen. Das bedeutet Erhaltung von Energie und Impuls. Die Ausbreitung von Wirkungen ist streng geregelt.

Das gilt allerdings nur in dem Rahmen, der dem bewussten Welterleben auch prinzipiell zugänglich ist. Jede Wirkung ist mit einer prinzipiellen Unschärfe behaftet. Genauer als  $\hbar$  sind Wirkungen nicht beobachtbar und unter dieser Grenze gilt die Forderung nach Wiedererkennbarkeit nicht. In diesem Rahmen breiten sich Wirkungen in einer Überlagerung von Möglichkeiten aus. In dieser Überlagerung existieren auch die Atome, die Grundbausteine der Materie. Erst in der Beobachtung manifestiert sich die objektive, eindeutige, bewusstseinsfähige Wirklichkeit. Ohne bewusstseinsfähige Beobachtung ist diese Wirklichkeit nicht denkbar.



## 5. Abschließende Betrachtung

### *Anschauung und Vorstellung*

In unserer Vorstellung existieren Raum, Zeit und Materie unabhängig vom Menschen und unabhängig von der Art unseres Welterlebens. Das Weltgeschehen scheint beliebig genau erfassbar und berechenbar zu sein.

In unserer Anschauung erleben wir eine immerwährende Gegenwart. Dieselben Wege erscheinen uns manchmal lang und manchmal kurz. Unser Körper erscheint uns manchmal träge und schwer, manchmal leicht und beweglich. Das meiste in unserem Leben geschieht spontan. Plötzlich ist eine Idee da. Plötzlich treffen wir jemanden und unser gesamter Tagesablauf verändert sich. Manchmal verändert sich mit einem Schlag unser gesamtes Leben.

Die klassische Physik ist in Manchem sehr hilfreich und bereichernd. Ein Fehler ist, dass wir mathematische Modellvorstellung mit der Wirklichkeit verwechseln. Das schränkt unsere Existenz und die Möglichkeiten unserer Entfaltung dramatisch ein.

### *Die offene Welt*

Selbst die materielle Wirklichkeit entwickelt sich in einer Überlagerung von Möglichkeiten. Welche Möglichkeit sich warum manifestiert, ist in diesem materiellen Rahmen nicht zu begreifen. Ob sich unser Körper hin zur Krankheit oder zur Gesundheit entwickelt, ob sich in unseren Köpfen liebevolle Gedanken oder Hass entwickelt, Verständnis oder Missverständnis, wird durch das Materielle sicher mit beeinflusst, ist daraus letztendlich jedoch nicht festgelegt. Andere Wirklichkeitsbereiche drücken sich aus.

Unsere Existenz kann sich nicht auf das Materielle gründen. Die Materie ist ein Kulturerbe der menschlichen Entwicklungsgeschichte. Die Welt, die Odysseus als Held der griechischen Mythologie erlebte, war eine völlig andere als unsere heutige. Wie die Menschen die Welt in ein paar tausend Jahren erleben werden, entzieht sich völlig unserem heutigen Vorstellungsvermögen. Kosmologie oder Sciencefiction sind Projektionen unserer heutigen Bewusstseinsinhalte, wenn auch auf unterschiedlichem Niveau.

Mit unserem individuellen Tod verliert unser individuelles Gehirn die Fähigkeit, Sinneseindrücke aufzunehmen und zu Bewusstseinsbildern zu verarbeiten. Übrig bleibt von uns nur das, das sich heute in der Unschärfe von Wirkungen ausdrückt.