

## Kapitel 2

# Präparation dynamischer Eigenschaften

Physikalische Objekte, die in einem Experiment untersucht werden sollen, müssen vorher in einen vom Experimentator genau bestimmten Zustand gebracht werden. Es müssen kontrollierte *Anfangsbedingungen* hergestellt werden. Will man beispielsweise in der Mechanik das Gesetz für die Bahnkurve des horizontalen Wurfs überprüfen, muss eine Abschussvorrichtung hergestellt werden, die es erlaubt, Kugeln gleicher Masse mit möglichst identischen Anfangswerten von Ort und Geschwindigkeit abzuschießen (Abb. 2.1).

Ein Verfahren, mit dem Objekte in einen bestimmten Zustand gebracht werden, nennt man **Präparation**. Durch Präparation stellt man physikalische Systeme mit bestimmten **Eigenschaften** her. Die Abschussvorrichtung beim horizontalen Wurf präpariert z. B. Kugeln mit den beiden Eigenschaften „befindet sich am Abschussort  $(x_0, y_0)$ “ und „besitzt die Abschussgeschwindigkeit  $(v_{x0}, v_{y0})$ “.

Die durch Präparation hergestellten Eigenschaften sind nicht unveränderlich. Deshalb werden sie als „dynamische Eigenschaften“ bezeichnet. Im Gegensatz dazu sind z. B. Ladung und Ruhemasse eines Elektrons unveränderlich; es handelt sich um unveränderliche Eigenschaften.

In der klassischen Physik ist das Präparieren von Eigenschaften physikalischer Objekte so selbstverständlich, dass selten ausführlicher darauf eingegangen wird. Dagegen tauchen in der Quantenphysik neue Phänomene auf, die es nötig machen, den Begriff der dynamischen Eigenschaft neu zu überdenken. Daher sollen in diesem Abschnitt die begrifflichen Grundlagen behandelt werden, die es ermöglichen, einen Zugang zu den neuartigen Problemen der Quantenphysik zu finden.

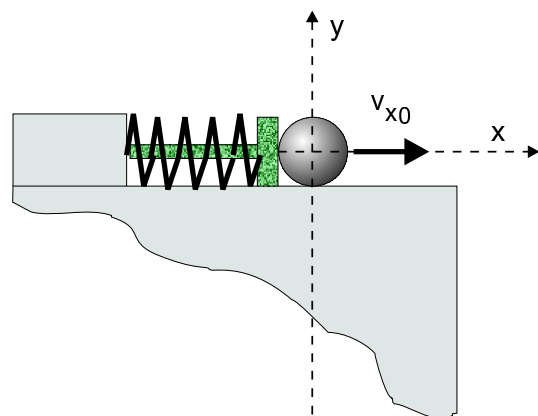


Abbildung 2.1: Präparation von Ort und Geschwindigkeit beim horizontalen Wurf

### 2.1 Prismenversuch mit Licht

**Experiment 2.1:** Leiten Sie in einem abgedunkelten Raum ein dünnes Lichtbündel weißen Lichts auf ein Prisma (Abb. 2.2 (a)). Auf dem Schirm sehen Sie das aus der elementaren Optik

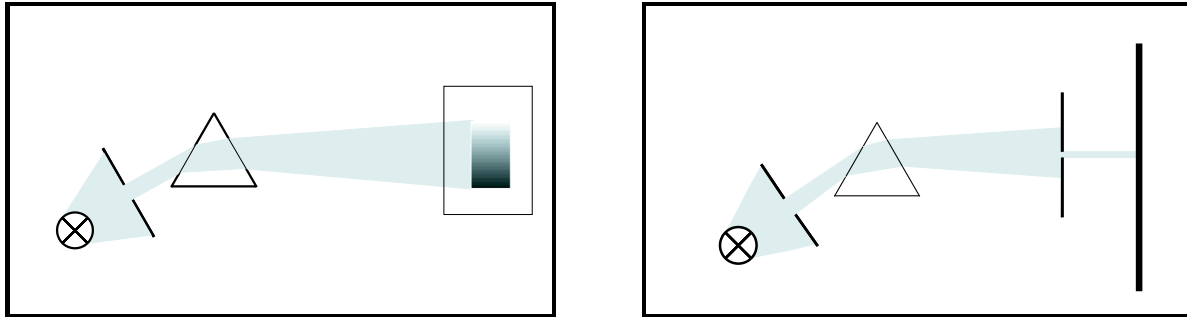


Abbildung 2.2: (a) Aufspaltung eines Lichtbündels im Prisma; (b) Ausblenden einer bestimmten Farbe

bekannte farbige Regenbogenspektrum. Sie können Licht einer bestimmten Farbe herstellen, indem Sie hinter das Prisma eine weitere Spaltblende stellen, die nur das Licht aus einem eng begrenzten Farbbereich (z. B. grün) durchlässt (Abb. 2.2 (b)).

Man kann vermuten, dass Licht einer bestimmten Farbe eine *Eigenschaft* besitzt, die dazu führt, dass es im Prisma um einen ganz bestimmten Winkel  $\alpha$  abgelenkt wird. Diese Vermutung kann man folgendermaßen testen:

**Experiment 2.2:** Lenken Sie das vorher erzeugte grüne Lichtbündel durch ein zweites Prisma auf den Schirm (Abb. 2.3). Sie werden sehen, dass es im zweiten Prisma nicht mehr aufgefächert wird. Wie vermutet wird es um den gleichen Winkel  $\alpha$  wie im ersten Prisma abgelenkt.<sup>1</sup>

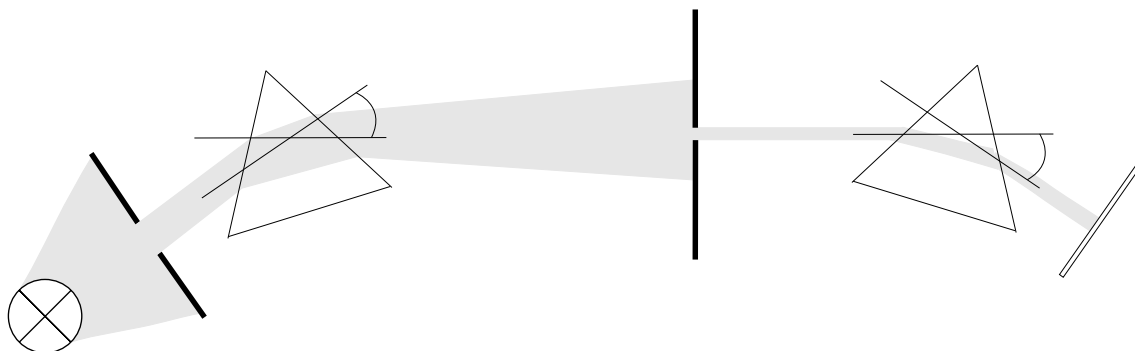


Abbildung 2.3: Test auf Präparation einer Eigenschaft

Das im Experiment erzeugte Licht einer bestimmten Spektralfarbe besitzt also tatsächlich die Eigenschaft „wird um einen bestimmten Winkel abgelenkt“. Dagegen besitzt das weiße Licht der Lampe diese Eigenschaft nicht; es wird aufgefächert. Wie wir wissen ist die in diesem Experiment gefundene Eigenschaft mit einer anderen identisch: „besitzt eine bestimmte Wellenlänge“. Die Eigenschaft „Wellenlänge“ bestimmt den Ablenkwinkel ebenso wie die Eigenschaft „Farbe“. Auch ohne dies zu wissen könnten wir durch das methodische Vorgehen bei dem Experiment Licht herstellen, das die Eigenschaft „Wellenlänge“ besitzt. Dadurch kann man auch in physikalisch unvertrauteren Situationen Eigenschaften analysieren, ohne die physikalischen Hintergründe im Detail kennen zu müssen.

Analysieren wir das Verfahren im Hinblick auf den Begriff der Präparation:

<sup>1</sup>Der Winkel, um den der Strahl abgelenkt wird, hängt natürlich vom Einfallswinkel auf das Prisma ab. Nur wenn dieser bei beiden Prismen der gleiche ist, wird der Strahl in beiden Prismen um den gleichen Winkel abgelenkt.

1. Die Blende hinter dem ersten Prisma lässt nur Licht durch, das um einen bestimmten Winkel abgelenkt wurde (vgl. Abb. 2.2 (b)). Das durchgelassene Licht besitzt die dynamische Eigenschaft „wird um einen bestimmten Winkel abgelenkt“. Prisma und Blende haben Licht mit dieser Eigenschaft *präpariert*.
2. Das zweite Prisma hat eine andere Funktion. Es dient als *Test*, um zu bestätigen, dass wirklich eine Präparation auf eine bestimmte Eigenschaft stattgefunden hat.

Das hier aufgezeigte Verfahren aus Präparation und Test kann ganz allgemein angewandt werden. Zunächst versucht man, an einem physikalischen Objekt (z. B. Licht oder Elektron) eine bestimmte dynamische Eigenschaft (z. B. Wellenlänge oder kinetische Energie) herzustellen. Um sicherzustellen, dass es die gewünschte Eigenschaft tatsächlich besitzt, führt man ein zweites (evtl. gleichartiges) Experiment durch, das diese Eigenschaft überprüft. Besitzt das Objekt die Eigenschaft, zeigt es sie in diesem Test.

Wenn man mit Sicherheit vorhersagen kann, dass ein Test eine bestimmten Eigenschaft bestätigt, dann ist die Vorstellung erlaubt, dass das Objekt diese Eigenschaft wirklich *besitzt*, sie also dem Objekt auch unabhängig vom Test zukommt. Wir werden später sehen, dass im Bereich der Quantenphysik diese Vorschrift sehr genau beachtet werden muss. Es wird sich herausstellen, dass es Fälle gibt, in denen man in Widerspruch zu den Phänomenen gerät, wenn man Quantenobjekten eine Eigenschaft unabhängig von einer Präparation, einem Test oder einer Messung zuschreibt.

## 2.2 Halbdurchlässiger Spiegel (Strahlteiler)

Nicht immer präpariert eine Versuchsanordnung eine dynamische Eigenschaft, auch wenn es zunächst den Anschein hat. Das sieht man an folgendem Experiment:

**Experiment 2.3:** Senden Sie Licht wird unter einem Winkel von  $45^\circ$  auf einen Strahlteiler (einen halbdurchlässigen Spiegel; Abb. 2.4). Das Licht wird teilweise durchgelassen und teilweise reflektiert. Durchgelassener und reflektierter Strahl besitzen die gleiche Intensität.

Besitzt der durchgelassene Anteil des Lichts eine besondere Eigenschaft, die dazu führt, dass er durchgelassen wird? Hat der Strahlteiler einen Strahl mit der Eigenschaft „wird durchgelassen“ präpariert? Diese Frage können wir mit dem allgemeinen Schema von Präparation und Test beantworten. Stellen Sie dazu in den durchgelassenen Strahl einen zweiten Strahlteiler. Er stellt den *Test* dar. Wenn sich im durchgelassenen Strahl nur Licht mit der Eigenschaft „wird durchgelassen“ befindet, dann muss sich diese Eigenschaft im Test zeigen. Am zweiten Strahlteiler müsste dann alles Licht durchgelassen werden; nichts darf reflektiert werden.

**Experiment 2.4:** Leiten Sie den durchgelassenen Strahl auf einen zweiten Strahlteiler (Abb. 2.5). Er wird erneut in einen durchgelassenen und einen reflektierten Anteil aufgespalten.

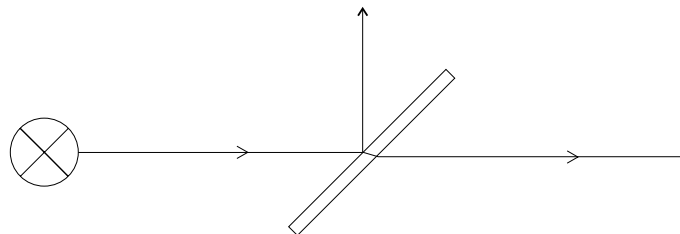


Abbildung 2.4: Durchgelassener und reflektierter Strahl am halbdurchlässigen Spiegel

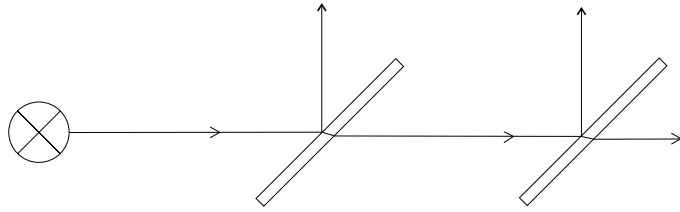


Abbildung 2.5: Test: Wurde am durchgelassenen Strahl eine Eigenschaft präpariert?

Das Versuchsergebnis zeigt, dass der durchgelassene Strahl keine Eigenschaft „wird durchgelassen“ besitzen hat. Ein Strahlteiler führt keine solche Präparation durch. Tatsächlich kann man einen Lichtstrahl gar nicht so präparieren, dass er gänzlich durch einen halbdurchlässigen Spiegel durchgelassen wird.

## 2.3 Polarisation

**Experiment 2.5:** Beleuchten Sie mit dem Licht einer 12 V-Lampe Experimentierleuchte ein waagrecht eingestelltes Polarisationsfilter (Abb. 2.6). Das Licht (Intensität  $J_L$ ) wird durch das Polarisationsfilter abgeschwächt; der durchgelassene Anteil besitzt etwa die halbe Intensität des ursprünglichen Lichts:  $J_0 = \frac{1}{2}J_L$ .

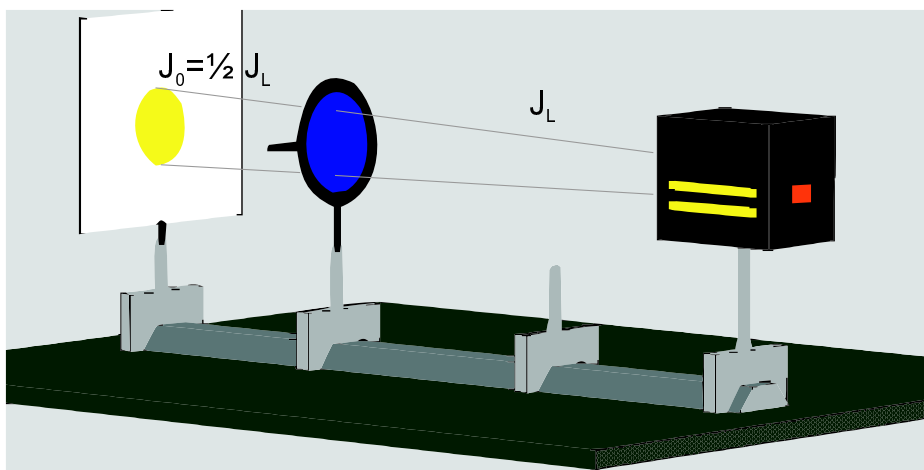


Abbildung 2.6: Herstellung von polarisiertem Licht

Das Polarisationsfilter hat etwa die Hälfte des Lichts absorbiert. Wieder stellt sich die Frage: Wurde am durchgegangenen Anteil eine Eigenschaft präpariert? Auch diese Frage lässt sich nach dem vorher angewandten allgemeinen Schema klären.

**Experiment 2.6:** Stellen Sie ein zweites waagrecht eingestelltes Polarisationsfilter in den Strahlengang (Abb. 2.7). Sie werden keine merkliche Abschwächung der Lichtintensität beobachten; sowohl vor als auch hinter dem zweiten Polarisationsfilter ist die Intensität  $J = J_0$ .

Das Experiment zeigt, dass das erste Polarisationsfilter am Licht der Lampe eine Eigenschaft präpariert hat. Sie wird *Polarisation* genannt. Das waagrecht eingestellte Polarisationsfilter hat *waagrecht polarisiertes Licht* hergestellt. Das zweite Polarisationsfilter dient als Test für die Eigenschaft „waage-

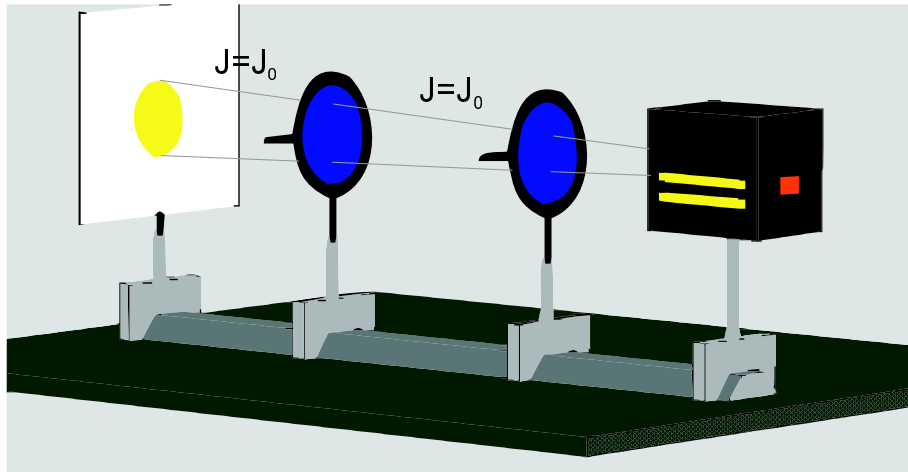


Abbildung 2.7: Test auf Präparation der Eigenschaft „waagrecht polarisiert“

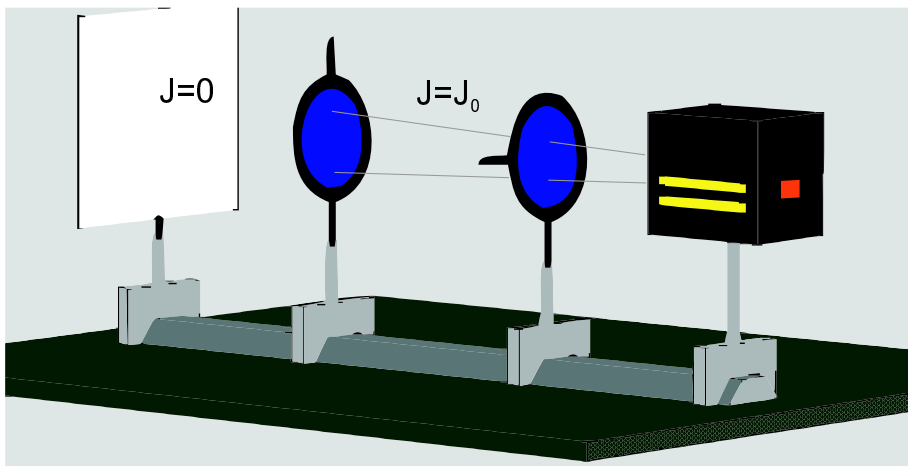


Abbildung 2.8: Waagrechte und senkrechte Polarisation

recht polarisiert“. Das vom ersten Polarisationsfilter auf diese Eigenschaft präparierte Licht konnte es ungehindert passieren.

**Experiment 2.7:** Nun werden beide Polarisationsfilter zunächst senkrecht gestellt. Wieder wird das Licht im zweiten Polarisationsfilter fast ungehindert durchgelassen. Wenn Sie nun das erste Filter langsam in die waagerechte Stellung drehen, wird die Intensität immer kleiner, bis schließlich fast kein Licht mehr durchgelassen wird (Abb. 2.8).

Im ersten Teil des Versuchs wurde Licht mit einer anderen Eigenschaft präpariert, nämlich *senkrecht polarisiertes Licht*. Der Test mit dem zweiten senkrecht gestellten Polarisationsfilter zeigt, dass auch dies eine Eigenschaft des Lichts ist.

Im zweiten Teil des Experiments passiert etwas Neues. Nachdem das erste Polarisationsfilter in die waagerechte Stellung gedreht wurde, präpariert es waagrecht polarisiertes Licht. Dieses Licht fällt auf das senkrecht eingestellte zweite Polarisationsfilter, das einen Test für die Eigenschaft „senkrecht polarisiert“ darstellt. Der Ausgang des Tests ist eindeutig: Waagrecht polarisiertes Licht besitzt die

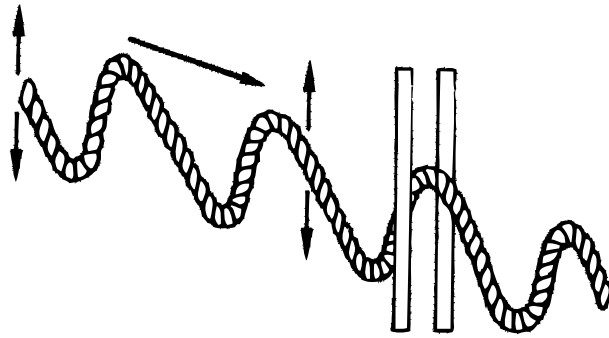
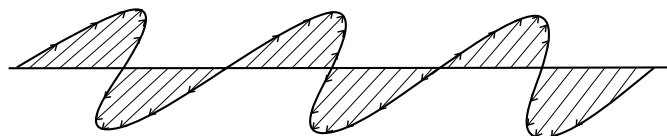


Abbildung 2.9: Modellversuch zur Polarisation

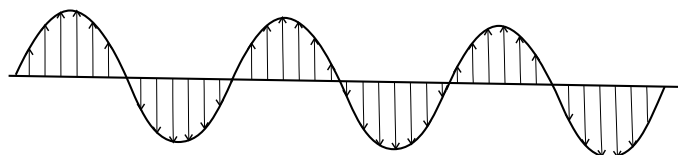
Eigenschaft „senkrecht polarisiert“ *nicht*. Die beiden dynamischen Eigenschaften sind nicht gleichzeitig präparierbar. Es handelt sich um *einander ausschließende Eigenschaften*.

In der Wellentheorie des Lichts kann man sich die Eigenschaft „Polarisation“ und die Wirkungsweise eines Polarisationsfilters mit einem Modellversuch veranschaulichen:

**Experiment 2.8:** Zwei Stativstangen werden wie in Abb. 2.9 in senkrechter Stellung befestigt. Mit einem Seil werden Wellen in senkrechter Richtung erzeugt. Die Seilwellen können das „Filter“ ungehindert passieren. Waagerechte Seilwellen werden dagegen von den Stativstangen aufgehalten („absorbiert“).



waagrecht polarisiertes Licht



senkrecht polarisiertes Licht

Abbildung 2.10: Waagrecht und senkrecht polarisiertes Licht

Bei den Seilwellen hängt es von der *Schwingungsrichtung* ab, ob die Welle durchgelassen wird oder nicht. Die Eigenschaft „Polarisation“ des Lichts lässt sich analog erklären, wenn man auf die Vorstellung von Licht als einer elektromagnetischen Welle Bezug nimmt. Hier ist es die Schwingungsebene des elektrischen Felds, welche die Polarisationsrichtung des Lichts bestimmt (Abb. 2.10). Schwingt das elektrische Feld in waagerechter Richtung, handelt es sich um waagrecht polarisiertes Licht. Allgemein lässt sich das folgendermaßen formulieren: Besitzt das elektrische Feld einer Lichtwelle ausschließlich eine Komponente in eine bestimmte Raumrichtung, ist das Licht in dieser Richtung polarisiert.