

# 1.2 Was die Welt im Innersten zusammenhält

## Ein Einblick in das Reich der Quantenmechanik

Die Entdeckung der quantenmechanischen Struktur unserer Welt hat unsere Anschauung von ihr völlig verändert. Um zu verstehen, was Licht genau ist, liefert die Quantenmechanik wichtige Erkenntnisse. Letztendlich ist sie aber nicht nur für das Verständnis von Licht, sondern für sämtliche Vorgänge im Universum von enormer Bedeutung. Ohne die Quantenmechanik gäbe es uns nicht. Begeben wir uns deshalb in einen Bereich der Physik, für den das menschliche Vorstellungsvermögen eigentlich viel zu begrenzt ist. Aber versuchen kann man es ja trotzdem ...

### Die große Revolution des ganz Kleinen

Quantenmechanik – was ist das überhaupt? Wir werden an dieser Stelle einen kleinen Einblick in dieses sehr komplexe Fachgebiet der Physik wagen, um die grundlegenden Vorgänge besser zu verstehen, denen Licht und Materie unterliegen. Denn letztendlich bestimmt der winzig kleine Bereich der Quanten, also der nach dem heutigen Wissensstand kleinsten Bestandteile unserer Welt, das Verhalten der ganz großen Objekte im Universum, beispielsweise unserer Sonne (siehe *Eigentlich zu kalt und klein, um ein echter Stern zu sein*, Seite 286). Wir sind also unmittelbar von der Quantenmechanik betroffen. Mehr noch – gäbe es sie nicht, würden wir gar nicht existieren. Doch warum das so ist, klären wir später (siehe *Ominöses Durchtunneln*, Seite 287) ...

Betrachten wir zunächst einmal, welche Entdeckungen in der Wissenschaft dazu geführt haben, dass die sogenannte »Quantenrevolution« überhaupt ins Rollen kam, aus der schließlich die moderne Quantenmechanik hervorging:

Wie bereits erwähnt war Albert Einstein der erste Wissenschaftler, der das Licht quantenphysikalisch deutete. Mit der Beschreibung des photoelektrischen Effekts im Jahr 1905 zeigte er, dass sich Licht nicht nur wie eine Welle, sondern auch wie ein Teilchen verhält (siehe *Der Welle-Teilchen-Dualismus*, Seite 47). Im selben Jahr veröffentlichte er die Spezielle Relativitätstheorie, in der die Lichtgeschwindigkeit eine wichtige Rolle spielt. Ihr ist deshalb ein komplettes Kapitel gewidmet (siehe *Dem Licht auf der Spur*, Seite 156). Wenige Jahre später, im Jahr 1911, experimentierte der in England lebende neuseeländische Atomphysiker Ernest Rutherford (1871–1937) mit Atomen und stellte fest, dass diese vor allem aus leerem Raum bestehen (siehe *Das Photon*, Seite 94). Diese Entdeckung warf die große Frage auf, warum sich Materie überhaupt fest anfühlt. 1913 stellte der dänische Physiker Niels Bohr (1885–1962) fest, dass die Energie von Elektronen in Atomen gequantelt ist, sie also nur bestimmte feste Energieniveaus annehmen können, aber keine Werte dazwischen (siehe *Der etwas andere Jo-Jo-Effekt*, Seite 133).

Einstein, Rutherford und Bohr legten durch die Erforschung von Energie und Materie den Grundpfeiler für eine Entwicklung, die Mitte der 1920er-Jahre zur Quantenrevolution führte. Sie sorgte dafür, dass wir die Vorstellung von der Struktur unserer Welt völlig überdenken mussten. Doch welche Erkenntnisse lieferte die Quantenrevolution, vor allem in Hinblick auf das Verständnis vom Licht? Genau dieser Frage wollen wir nun nachgehen – zunächst durch einen groben Überblick und später im Detail.

### Die Erkenntnisse der Quantenrevolution

Da es der Wissenschaft im Zuge der Quantenrevolution gelang, immer tiefer in die Struktur der Materie zu blicken, begann das bisherige Atommodell zu bröckeln: Nicht mehr Protonen und Neutronen gelten nach dem heutigen Wissensstand neben den Elektronen als die kleinsten Bausteine der Materie, sondern die sogenannten Quarks und Leptonen. Während das Elektron weiterhin als elementar angenommen wird und zu den Leptonen zählt, bestehen Protonen und

Neutronen aus Quarks. Leptonen und Quarks gehören der Gruppe der Fermionen an und sind somit die elementaren Teilchen, die die Materie aufbauen (siehe *Fermionen sind verfeindet*, Seite 82).

Doch was ist mit dem Licht? Da es sich bei ihm nicht um Materie, sondern um Energie handelt, gehört das Photon zu einer anderen Gruppe: den Bosonen (siehe *Bosonen lieben sich*, Seite 85). Sie stellen ein Gegenmodell zu den Fermionen dar. Bosonen dienen als Vermittler zwischen den Materieteilchen und zählen damit zu den Kräften. Sie tragen die Energie von einem Fermion zum nächsten. Ohne Bosonen wäre die Materie also ziemlich aufgeschmissen, denn es wäre niemand da, der eine Interaktion zwischen ihr herstellen würde. Eine Welt ohne Bosonen wäre demnach völlig starr und langweilig. Es würde nämlich überhaupt nichts passieren – nicht einmal Zeit würde vergehen. Denn wenn alles gleich bliebe, gäbe es auch keinen Unterschied mehr zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Die Welt stünde still. Die Materieteilchen wären zwar da, hätten aber keinerlei Möglichkeit, mit ihren Kollegen zu kommunizieren. Vor allem das Elektron würde die Abwesenheit des Lichts schmerzlich vermissen. Elektron und Photon stellen nämlich sozusagen das Traumpaar im Universum dar. Es gibt kaum zwei Teilchen, die so gerne miteinander in Verbindung treten wie diese beiden (siehe *Vom Verschlucken und Wiederausspucken*, Seite 138). Folglich wäre es ohne Bosonen nicht nur völlig trostlos im Universum, sondern außerdem noch stockdunkel. Leben hätte so natürlich auch nie entstehen können.

Doch das Licht ist nicht die einzige Kraft in diesem Universum: Ebenso wie es verschiedene Materieteilchen in Form von Quarks und Leptonen gibt, existieren auch unterschiedliche Bosonen. Zum Photon, das die elektromagnetische Kraft in Form von Strahlung vermittelt, zu der unter anderem auch das für uns sichtbare Licht zählt, gesellen sich noch drei weitere Kraftteilchen (siehe *Das Kräfte-messen der Bosonen*, Seite 90): Das Gluon (vom Englischen *to glue*, »kleben«) vermittelt die sogenannte starke Kraft, jene Kraft, die dafür sorgt, dass die Atomkerne zusammenhalten, obwohl im Inneren positiv geladene Protonen stecken und sich Ladungen gleichen Vorzeichens ja eigentlich abstoßen. Wie der Name schon sagt, müssen diese Kraftteilchen sehr stark sein, damit sie überhaupt gegen die Abstoßung der Protonen im Kern eine Chance haben. Die starke Kraft ist deshalb auch die stärkste der vier Grundkräfte. Wie wir später noch sehen werden, ist sie die Grundlage dafür, dass unsere Sonne und neben ihr alle anderen Sterne überhaupt Licht aussenden können

(siehe *Proton trifft Proton*, Seite 301). Neben der starken Kraft gibt es auch noch die schwache Kraft. Sie ist für den radioaktiven Zerfall von Atomkernen zuständig und wird von den W- und Z-Bosonen vermittelt. Die schwächste aller Kräfte ist schließlich die Gravitation, für die das Graviton zuständig sein soll. Dieses Teilchen konnte bisher nicht experimentell nachgewiesen werden, da es wohl viel zu schwach ist, um von den heutigen Messgeräten in irgendeiner Form geortet werden zu können. Dass das Graviton aber wirklich existiert, davon ist die Wissenschaft überzeugt. Mit den immer präziser werdenden Messmethoden ist es höchstwahrscheinlich nur eine Frage der Zeit, bis es eines Tages tatsächlich aufgespürt werden kann.

Die Bosonen gehören zusammen mit den Fermionen zu den Elementarteilchen, jenen Teilchen, die als Grundbausteine des Universums gelten (siehe *Die Suche nach den Zutaten des Universums*, Seite 77). Jedoch zeigte die Quantenrevolution außerdem, dass es nicht nur Teilchen, sondern auch Antiteilchen gibt, die sich inzwischen im Labor leicht herstellen lassen. Sie stellen das Gegenstück zu den herkömmlichen Materieteilchen dar. Teilchen und Antiteilchen vernichten sich, sobald sie zusammentreffen, gegenseitig und werden zu Energie, also zu Licht. Doch dieser Vorgang funktioniert auch umgekehrt: Wie aus dem Nichts können spontan Teilchen-Antiteilchen-Paare entstehen und wieder vergehen, sogenannte virtuelle Teilchen (siehe *Der erste Symmetriebruch*, Seite 765). Diese Erkenntnis ist vor allem wichtig, um zu verstehen, warum überhaupt etwas ist und nicht nichts. Dies werden wir im letzten Kapitel noch genauer unter die Lupe nehmen.

Doch nun kehren wir zunächst wieder zurück zu unseren Elementarteilchen: Wie Einstein bei seiner Untersuchung von Materie und Energie feststellte, zeigt das Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften und unterliegt demnach dem Welle-Teilchen-Dualismus. Claus Jönssons Version des Doppelspaltexperiments mit Elektronen zeigte außerdem, dass auch klassische Teilchen beide Erscheinungsformen annehmen können. Die Quantenrevolution lieferte schließlich die Erkenntnis, dass dieser Welle-Teilchen-Dualismus ausnahmslos für sämtliche Elementarteilchen gilt – für Materie und Kräfte gleichermaßen. Die Welt schwingt quasi in ihren innersten Teilen und entzieht sich dadurch völlig unserem Vorstellungsvermögen. Wir können uns kein Bild machen, wie Elementar-

teilchen eigentlich aussehen – falls sie überhaupt so etwas wie ein Aussehen besitzen. Was sie aber definitiv besitzen, sind verschiedene Eigenschaften – und diese lassen sich mithilfe der Gesetze der Quantenmechanik sehr genau vorhersagen (siehe *Die Eigenschaften der Elementarteilchen*, Seite 78).

Die Quantenmechanik zählt neben der Relativitätstheorie zu den am besten überprüften Theorien der Physik und hat bisher sämtlichen Experimenten standgehalten. Unsere gesamte moderne Elektronik basiert auf Quanteneffekten, was ebenfalls beweist, dass wir ihre Gesetze durchschaut haben dürften, wenn wir sie uns auch nicht bildlich vorstellen können. Man kann also davon ausgehen, dass die Welt in ihren kleinsten Teilen, und somit auch das Licht, tatsächlich aus einer skurrilen Mischung von Wellen-Teilchen besteht, die sich nicht wirklich in die Karten schauen lassen.

Zu den wohl bedeutendsten Erkenntnissen der Quantenrevolution zählt außerdem die Tatsache, dass es möglich ist, vom ganz Kleinen Rückschlüsse auf das ganz Große zu ziehen, denn die elementare Welt der Quanten hat unmittelbare Auswirkungen auf die gesamte Astronomie. So können wir mithilfe der Quantenmechanik Schlussfolgerungen auf viele Vorgänge im Universum ziehen, angefangen vom Leben und Sterben der Sterne bis hin zu den Geschehnissen kurz nach dem Urknall. In jedem Fall spielt dabei das Licht eine große Rolle, weshalb wir diese Vorgänge später noch genauer untersuchen werden. Eines der fundamentalsten Gesetze der Quantenmechanik wird uns dabei immer wieder begegnen: Die Rede ist von der Heisenberg'schen Unschärferelation. Werfen wir deshalb einen tiefergehenden Blick auf sie:

### Die Heisenberg'sche Unschärferelation

Die Heisenberg'sche Unschärferelation wurde 1927 von dem deutschen Physiker Werner Heisenberg (1901–1976) formuliert. Wie der Name schon verrät, geht es dabei um eine Art Unschärfe. Da wir uns im Quantenbereich befinden, muss es sich um eine Unschärfe auf elementarer Ebene handeln. Und genau dies stellte Heisenberg bei seinen Untersuchungen fest: Sobald man ein Teilchen immer genauer und näher betrachtet, beginnt es irgendwann zu verschwimmen und unscharf zu werden. Denn ab einem gewissen Punkt macht uns die Quantenmechanik einfach einen Strich durch die Rechnung. Sie hindert uns daran, immer tiefer in die Struktur der Materie zu blicken,

indem sie die Teilchen, sobald wir ihnen zu nahe kommen, regelrecht tanzen lässt. Sie flippen völlig aus und schwirren so schnell umher, dass wir sie nicht mehr scharf sehen können. Und je näher wir den Teilchen dabei kommen, desto schlimmer wird es. Eigentlich ganz schön unverschämt!

Heisenberg erkannte den Grund für dieses Problem und stellte fest, dass es zwei Arten der Unschärfe gibt: eine Unbestimmtheit in Ort und Impuls sowie eine Unbestimmtheit in Energiemenge und Zeitraum. Es ist nicht möglich, gleichzeitig beides zu bestimmen. Die beiden Gleichungen der Unschärferelation lauten:

$$\begin{aligned} \text{Ortsunschärfe} \times \text{Impulsunschärfe} &\approx \text{Planck'sches Wirkungsquantum} \\ \text{Energieunschärfe} \times \text{Zeitunschärfe} &\approx \text{Planck'sches Wirkungsquantum} \end{aligned}$$

(Das Planck'sche Wirkungsquantum entspricht einer extrem kleinen Zahl:  $6,626 \times 10^{-34}$  Joulesekunden.)

Mit anderen Worten bedeutet dies: Je genauer man den Aufenthaltsort eines Teilchens kennt, desto unbestimmter wird, in welche Richtung und mit welcher Geschwindigkeit es sich bewegt. Kennt man umgekehrt dessen Impuls sehr genau, lässt sich die Position des Teilchens nicht mehr eindeutig definieren. Wird also eine Art der Unschärfe geringer, wird die andere automatisch größer. Für die Energiemenge und den Zeitraum bedeutet die Unschärferelation wiederum, dass man nie genau weiß, *wann* ein Teilchen *wie viel* Energie besitzt. Da das Planck'sche Wirkungsquantum eine sehr kleine Zahl ist, bemerkt man die Unschärfe jedoch erst, wenn man sich im Reich des ganz Kleinen befindet. Doch warum gibt es diese Unbestimmtheiten überhaupt?

Je genauer man den Ort eines Teilchens kennt,  
desto unbestimmter ist dessen Impuls.

Je genauer man den Impuls eines Teilchens kennt,  
desto unbestimmter ist dessen Ort.

## Warum sehen wir überhaupt etwas?

Um zu verstehen, was die Unschärferelation in puncto Ort und Impuls bewirkt, muss man zunächst wissen, welcher Vorgang dahintersteckt, bis für uns der Eindruck des Sehens entsteht: Damit wir Materie überhaupt wahrnehmen können, muss sie uns signalisieren, dass sie da ist. Sie muss uns also die Informationen über sich irgendwie vermitteln. Und nun landen wir wieder bei den Kraftteilchen, ohne die die Materie keine Chance hätte, ihre Informationen beziehungsweise ihre Energie weiterzuleiten – den Bosonen (siehe *Die Erkenntnisse der Quantenrevolution*, Seite 57). Da es darum geht, etwas erkennbar für unsere Augen zu machen, also Informationen in Form von sichtbarem Licht zu transportieren, ist unser Vermittler in diesem Fall das Photon.

Wir sehen etwas, sobald Licht auf Materie trifft und dabei teilweise wieder zurückgeworfen wird. (Was dabei genau zwischen Licht und Materie passiert, folgt später im Laufe dieses Kapitels – siehe *Wenn das Photon mit dem Elektron...*, Seite 143.) Unsere Augen nehmen die von der Materie zurückgestreuten Photonen wahr und leiten die Informationen des Lichts an das Gehirn weiter, wo schließlich der Seheindruck entsteht. Erst nach dieser Kettenreaktion können wir etwas optisch wahrnehmen. Dieser Vorgang geschieht jedoch so blitzschnell, dass wir davon nichts mitbekommen.

## Sockenversuch Nummer 1

Zurück zur Unschärferelation: Wir suchen uns nun ein Objekt, um in einem kleinen Versuch dessen Ort und Impuls zu beobachten. Dazu soll uns ein Paar Socken dienen. Wir bündeln es zusammen und werfen es in hohem Bogen quer durch den Raum. Damit wir etwas sehen können, beleuchten wir die Szene mit grünem Licht. (Warum es ausgerechnet grün sein soll, klärt sich gleich im nächsten Absatz.) Gleichzeitig fotografieren wir das Bündel während dieser Aktion mehrmals pro Sekunde, um so später seine Bewegung rekonstruieren zu können. Nach dem Sockenflug betrachten wir die Fotoserie und stellen fest: Man erkennt stets einwandfrei, *wann* die Socken *wo* im Raum waren und *wohin* sie sich bewegten. Es lassen sich also für jeden Zeitpunkt Ort und Flugrichtung genau bestimmen (siehe Fotografie 4).

Wir bemerkten es zwar nicht, aber bereits hier wirkte die Unschärferelation. Da sie sich aber erst auf sehr kleinen Skalen bemerkbar macht, lassen wir unsere Socken nun ordentlich schrumpfen. Sie sind jetzt so klein, dass sie sich nicht mehr in Kleidergrößen angeben lassen, sondern nur noch in Pikometern (*pm*). Damit befinden sie sich etwa in der Größenordnung eines Elektrons – wobei man gar nicht genau weiß, wie groß ein Elektron tatsächlich ist, da uns auch hier die Unschärferelation einen Strich durch die Rechnung macht. Die Materie lässt sich ab einer gewissen Grenze einfach nicht mehr genau beobachten, und beim Elektron ist diese Grenze definitiv erreicht, weshalb wir seine Größe nur grob angeben können. Aber nehmen wir einfach einmal an, unsere Socken sind jetzt etwa zehn Pikometer »groß«.

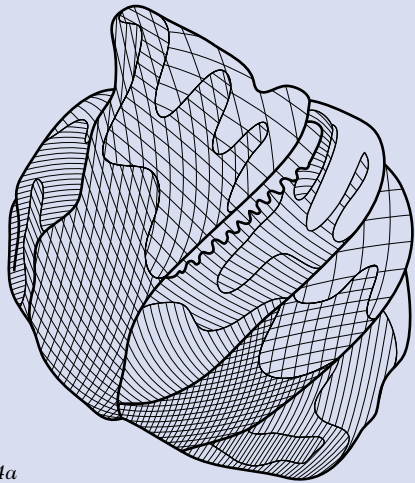
## Die Unschärferelation wirkt immer – auch bei großen Objekten. Sie macht sich jedoch erst im Bereich des ganz Kleinen bemerkbar.

Ein Pikometer entspricht  $10^{-12}$  Metern – das ist ein Billionstel von einem Millimeter, enorm klein also. Das für uns sichtbare Licht befindet sich bereits eine Größenebene höher im Nanometerbereich (*nm*). Dort deckt es ein nur recht schmales Spektrum von circa 380 bis 780 Nanometern ab. (Das gesamte elektromagnetische Spektrum wird später in diesem Kapitel noch detailliert beschrieben – siehe *Beinahe blind*, Seite 108/*Unterwegs auf kurzen Wellen*, Seite 109/*Unterwegs auf langen Wellen*, Seite 117). Ein Nanometer entspricht  $10^{-9}$  Metern, also einem Milliardstel von einem Meter. Das Sockenbündel ist damit viel kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts, das gleich in unserem zweiten Versuch die optischen Informationen der Socken zu unseren Augen transportieren soll.

Wir entscheiden uns für die goldene Mitte und wählen eine Wellenlänge von 500 Nanometern. Nun erklärt sich auch die Wahl der Lichtfarbe aus unserem ersten Versuch, denn 500 Nanometer entsprechen der Farbe Grün. (Es sollen ja schließlich bei beiden Versuchen die gleichen Lichtverhältnisse herrschen.) Wir beschießen das Bündel also mit Photonen, bei denen von einem Wellenberg zum nächsten 500 Nanometer liegen.



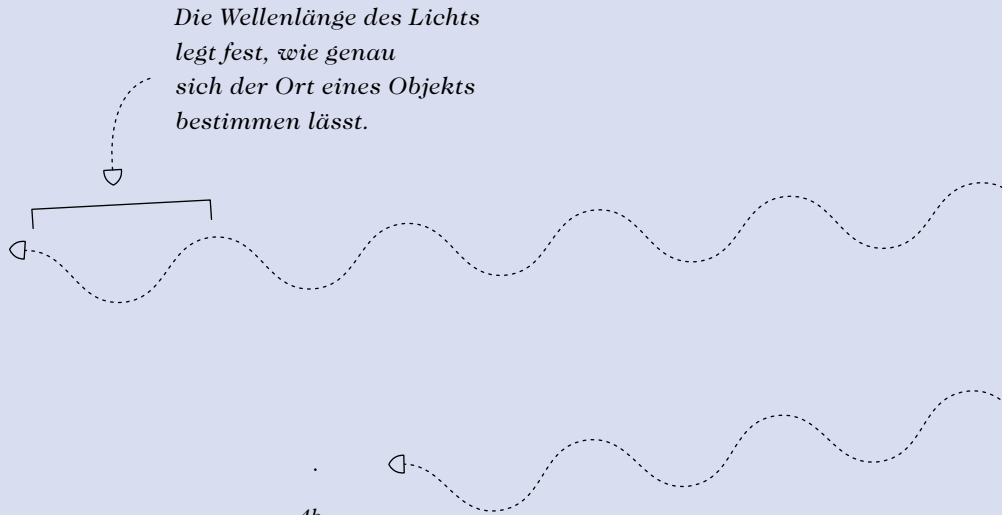
[Fotografie 4] Bei normalen Objekten sind Ort und Impuls genau bestimmbar



4a

**Normales Sockenbündel**

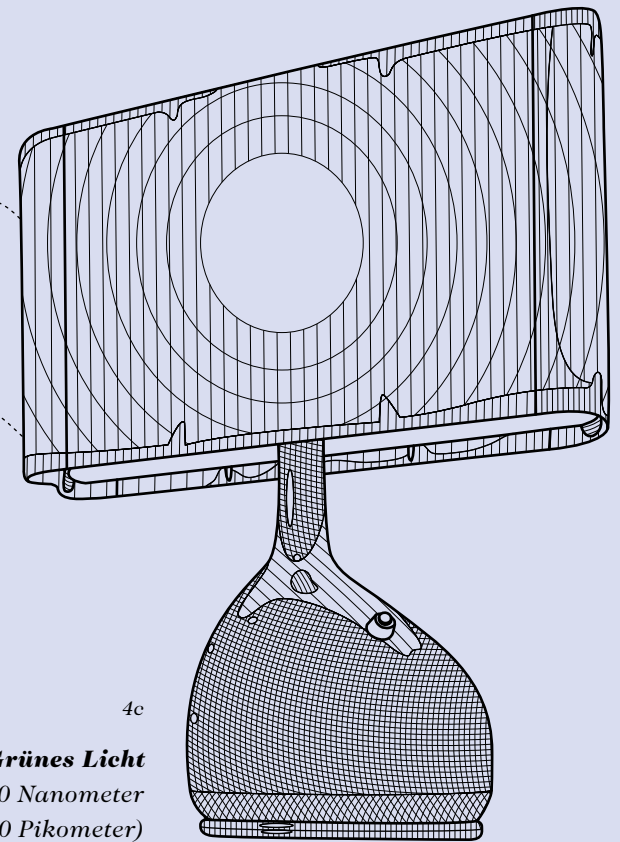
Länge/Breite: 7 Zentimeter  
(70 000 000 000 Pikometer)  
Größenverhältnis  
Licht – Socken: **1 zu 140 000**



4b

**»Pikometer-Socken«**

Länge/Breite: 10 Pikometer  
Größenverhältnis  
Licht – Socken: **1 zu 0,0002**



4c

**Grünes Licht**

Wellenlänge: 500 Nanometer  
(500 000 Pikometer)

Das mag winzig erscheinen, doch wie scharf wir etwas sehen können, hängt stets von der Wellenlänge des Lichts und von der Größe der Materie ab. Je größer ein Objekt im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts ist, desto genauer lässt es sich lokalisieren (siehe Grafik 4). Bei unserem ersten Wurfversuch war der Unterschied zwischen der Wellenlänge des grünen Lichts (siehe Grafik 4c) und der Sockengröße enorm. Deshalb konnten wir den Ort der Socken auf jedem einzelnen Foto problemlos scharf sehen (siehe Grafik 4a). Anders sieht die Sache allerdings aus, wenn wir die »Pikometer-Socken« im gleichen Licht betrachten: Sie sind nun sogar wesentlich kleiner als die Wellenlänge der Photonen, die wir zu ihnen schicken wollen (siehe Grafik 4b).

**Sockenversuch Nummer 2**

Mit diesen Voraussetzungen im Hinterkopf starten wir nun Versuch Nummer 2: Wir werfen das winzige Sockenbündel in die Luft, während wir grünes Licht darauf richten und den Flug mit dem Fotoappa-

rat dokumentieren. Welches Bild liefern uns die Fotos jetzt? Bis auf ein diffuses Rauschen ist von den Socken nicht mehr viel zu erkennen. Vielmehr sieht man nur noch einen Schweif, der ihre Flugbahn beschreibt. Die Heisenberg'sche Unschärferelation hat hier gnadenlos zugeschlagen: Man erkennt zwar eindeutig den Impuls der Socken, aber die einzelnen Aufenthaltsorte erscheinen ausgesprochen unscharf und unbestimmt (siehe Fotografie 5a).

Wie lässt sich dieses Ergebnis erklären? Bei 500 Nanometern ist der Ort der Socken ebenfalls nur auf 500 Nanometer genau bestimmbar. Während dies im Vergleich zur Größe von normalen Socken nicht weiter ins Gewicht fällt und wir sie deshalb auch scharf sehen können, ist das Zehn-Pikometer-Bündel geschlagene zwanzigtausendmal kleiner als die Wellenlänge des grünen Lichts! Damit ist klar, warum es hier nicht möglich ist, auch nur annähernd scharfe Konturen zu erkennen.

[Fotografie 5a] Ortsunschärfe



[Fotografie 5b] Impulsunschärfe

Das Verhältnis zwischen der Wellenlänge  
des Lichts und der Größe des Objekts entscheidet,  
wie scharf wir etwas sehen können.

### Sockenversuch Nummer 3

Starten wir die Gegenprobe und versuchen diesmal den Ort unseres Piko-Bündels genau zu bestimmen. Dazu müssen die Socken größer oder zumindest genauso groß wie die Wellenlänge des Lichts sein, mit dem wir sie betrachten. Da wir unsere Socken nicht wieder vergrößern wollen, können wir nur die Wellenlänge verändern. Wir werden hierfür den Bereich des Sichtbaren verlassen und nun zu kurzwelligerem Licht greifen (siehe *Unterwegs auf kurzen Wellen*, Seite 109). Unser Fotoapparat wandelt es anschließend für uns um, sodass wir das Ergebnis auch sehen können.

Um alles scharf ablichten zu können, müssen wir mindestens eine Wellenlänge wählen, die der Größe des Sockenbündels, also zehn Pikometern, entspricht. Doch da Photonen stets umso mehr Energie mit sich tragen, je kürzer ihre Wellenlänge und je höher somit ihre Frequenz ist, befänden wir uns mit zehn Pikometern bereits an der Schwelle zur extrem hochenergetischen Gammastrahlung (siehe *Der elektromagnetische Dreiklang*, Seite 104). Dies scheint uns unter gesundheitlichen Aspekten jedoch recht riskant, weshalb wir unser Licht etwas schwächer einstellen und damit im Röntgenbereich landen. Da auch mit Röntgenstrahlung nicht zu spaßen ist, begeben wir uns während dieses Versuchs rechtzeitig in Sicherheit. Wir werfen unsere Socken also ein weiteres Mal durch die Luft und beschließen sie diesmal regelrecht mit Strahlung, während der Fotoapparat wieder jede Bewegung dokumentiert.

Was ist jetzt das Ergebnis? Unsere Socken sind nun tatsächlich relativ scharf zu sehen, allerdings sind sie nur noch auf einem einzigen Foto zu finden, alle anderen Bilder sind leer (siehe Fotografie 5b). Auf eine Flugbahn und somit auf einen Impuls lässt sich unter solchen Umständen natürlich nicht mehr schließen, dafür wären mindestens zwei Bilder nötig, die man miteinander vergleichen könnte.

Hochenergetische Strahlung schießt Teilchen aus der Bahn  
und verändert damit ihren Impuls.

Um zu verstehen, warum uns in diesem Versuch der Impuls abhanden kam, kann man den obigen Satz »Wir beschließen die Socken mit Strahlung« durchaus wörtlich nehmen. Denn je mehr Energie die Photonen besitzen, desto stärker verändern sie den Impuls eines Objekts, auf das sie treffen (siehe Grafik 5). Je kleiner dabei die Materie ist, desto heftiger fällt die Reaktion logischerweise aus. Beim Zusammentreffen mit unserem mikroskopischen Sockenbündel (siehe Grafik 5b) übertrug jedes hochenergetische Lichtteilchen (siehe Grafik 5a) einen Teil seiner Energie auf die Socken und schubste sie dadurch völlig aus der Bahn. Deshalb kennen wir jetzt zwar ihren Aufenthaltsort zu einem bestimmten Zeitpunkt, beim Impuls tappen wir jedoch völlig im Dunkeln. Ihn kann man wiederum nur mit langwelligem Licht messen, das weniger Energie besitzt und somit weniger Kraft ausübt – so wie wir es im ersten und zweiten Versuch getan haben. Dann jedoch, so haben wir gesehen, lässt sich der Ort eines sehr kleinen Teilchens nicht mehr präzise bestimmen. Wird die eine Unschärfe also geringer, wird automatisch die andere größer und umgekehrt. Egal, wie man es auch dreht und wendet, man wird nie beide Werte gleichzeitig bestimmen können. Und genau dieses ausweglose Unterfangen steckt in der Unschärferelation.

### Zurück beim Welle-Teilchen-Dualismus

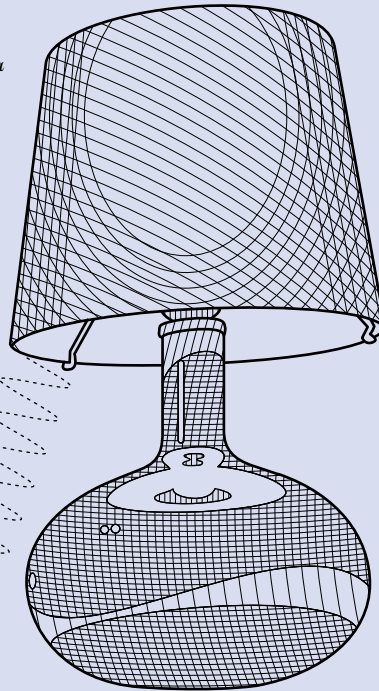
Wenn wir zurückblicken, fällt auf, dass uns dieses Dilemma bereits begegnet ist – und zwar beim Doppelspaltexperiment mit Teilchen. Es ist die Unschärferelation, die uns daran hindert, genau zu untersuchen, welchen Weg ein sehr kleines Teilchen, beispielsweise ein Elektron, auf seinem Weg durch den Doppelspalt nimmt. Allein dadurch, dass wir es beobachten, verändern wir automatisch seinen Impuls, den wir ja eigentlich messen wollten. Würden wir anstatt eines Elektrons unsere geschrumpften Socken durch den Spalt auf die Reise schicken, würde exakt dasselbe passieren. Auch unsere Socken würden sich, solange wir ihnen nicht dabei zusähen, wie eine Welle verhalten und ein Interferenzmuster hinterlassen, dies jedoch sofort unterbinden, sollten wir versuchen, einen genauen Blick auf



**Hochenergetische Röntgenstrahlung**

Wellenlänge: 10 Pikometer bis  
1 Nanometer (1000 Pikometer)

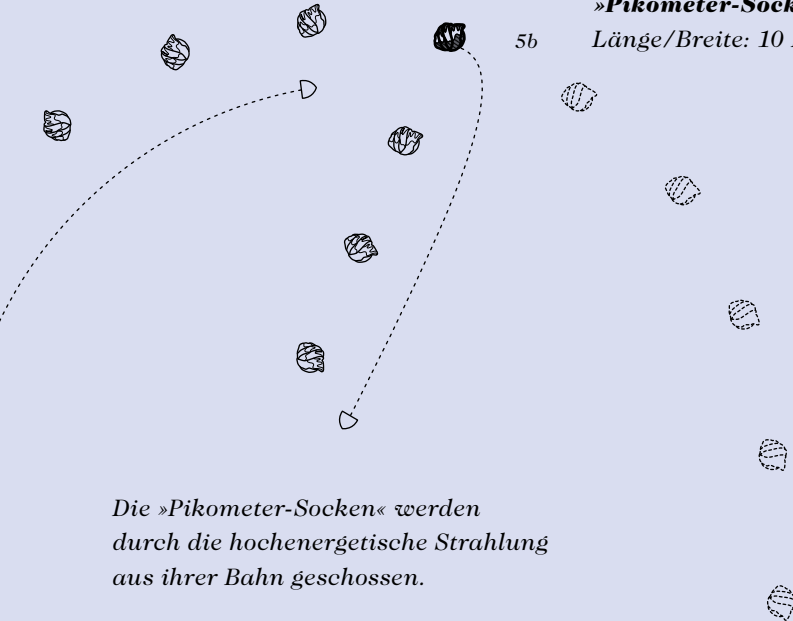
5a



**»Pikometer-Socken«**

Länge/Breite: 10 Pikometer

5b



Die »Pikometer-Socken« werden  
durch die hochenergetische Strahlung  
aus ihrer Bahn geschossen.

ihr Verhalten zu werfen. Denn der Welle-Teilchen-Dualismus gilt für die gesamte Quantenwelt – für das Licht und die anderen Kräfte, für Materieteilchen und ebenso für Socken, die nur wenige Pikometer klein sind.

Es scheint, als weigere sich die Natur vehement, sich ab einer gewissen Größenordnung in die Karten schauen zu lassen. Jeder Versuch, diese List zu umgehen, ist dabei von vornherein zum Scheitern verurteilt, da der Vorgang des Beobachtens die Wirklichkeit automatisch verzerrt. Es liegt jedoch nicht daran, dass die Messmethoden fehlerhaft oder unausgereift sind. Das Dilemma ist ein ganz anderes und zeigt sich schon an der Wahl des Begriffs »Elementarteilchen«. Wir begegnen den innersten Bausteinen quasi schon völlig voreingenommen, indem wir sie darauf festnageln, gefälligst Teilchen zu sein, also etwas Dinghaftes, das wir uns auch vorstellen können (siehe *Die Eigenschaften von Wellen und Teilchen*, Seite 39). Doch genau dies sind sie eben *nicht*, wie das Doppelspaltexperiment gezeigt hat. Die seltsamen Wesen aus der Quantenwelt zeigen zwar Teilchen- und Welleneigenschaften, lassen sich aber weder auf das eine noch auf das andere reduzieren (siehe *Der Welle-Teilchen-Dualismus*, Seite 47).

Die Natur ist in ihrem Innersten eine äußerst schwankende Angelegenheit. Weder Ort, Impuls, Energie noch Zeit sind hier genau bestimmbar.

**Bilderverbot**

Die eigentliche Aussage, die in der Unschärferelation steckt, ist daher nicht, dass wir die Welt nicht genau beobachten können, weil wir sie durch unsere Messungen stören. Tatsächlich ist es so, dass die Welt in ihrem Innersten schlichtweg unbestimmt und unscharf ist! Lässt sie sich bis zu einem gewissen Vergrößerungsgrad zwar noch genau beobachten, schlägt ab einem bestimmten Punkt ihre Wellennatur allmählich durch, und die Teilchen beginnen vor unseren Augen zu schwingen und rastlos hin und her zu wabern. Feste Größen, wie ein bestimmter Ort oder eine bestimmte Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt, existieren hier nicht. Die Natur ist demnach in ihrem tiefs-

ten Inneren eine äußerst schwankende Angelegenheit und gehorcht damit ganz anderen Gesetzen als denen, die uns im Alltag begegnen – Gesetzen der Quantenmechanik eben. Wir sollten gar nicht erst versuchen, uns dies bildlich vorzustellen – wir werden in jedem Fall kläglich daran scheitern. Denn da in dieser skurrilen Quantenwelt nichts hundertprozentig bestimmt ist, sondern stets eine Unge-  
wissenheit bestehen bleibt, herrscht hier striktes Bilderverbot.

Die einzige Möglichkeit, sich der elementaren Ebene zu nähern, besteht darin, sie durch Wahrscheinlichkeiten zu beschreiben. Aufenthaltsorte oder Energiemengen zu bestimmten Zeitpunkten können nur noch in Skalen von sehr wahrscheinlich bis sehr unwahrscheinlich eingeteilt werden. Als ultimatives Hilfsmittel dient hierbei die sogenannte Schrödinger-Gleichung, die 1926 von dem österreichischen Physiker und Wissenschaftstheoretiker Erwin Schrödinger (1887–1961) entwickelt wurde. Mit ihr lassen sich die wahrscheinlichen Aufenthaltsorte eines Elementarteilchens zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Form von Wellenfunktionen berechnen.

Eine definitive Gewissheit, dass etwas hundertprozentig sicher der Fall ist, gibt es in der Quantenwelt also nicht. Die Grundstruktur unserer Welt unterliegt quasi dem Zufallsprinzip. Man kann nie vorhersagen, was als Nächstes passieren wird, weil selbst die Zeit in den Urgründen unserer Welt schwankt. Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft existieren hier gar nicht. Das Prinzip der Logik, also der Tatsache, dass jeder Wirkung stets eine Ursache zugrunde liegt, versagt hier völlig, denn dieses Kausalitätsprinzip gilt in der Quantenwelt nicht mehr (siehe *Die Sturheit des Lichts*, Seite 177).

### Das Kausalitätsprinzip von Ursache und Wirkung gilt in der Welt der Elementarteilchen nicht.

Jetzt wird auch klar, warum wir in der Welt des ganz Kleinen nahezu den Verstand zu verlieren drohen: Unser Gehirn ist auf Ursache-Wirkung-Zusammenhänge angewiesen, um zu verstehen, warum etwas so ist, wie es ist. Aber genau diese Frage existiert in den Sphären der Elementarteilchen nicht. Es können Dinge passieren, ohne dass dazu ein Grund notwendig ist – einfach so. Wie wir ganz am

Ende dieses Buches noch sehen werden, ist wohl genau dieses »Einfach so« die Ursache dafür, dass wir uns überhaupt den Kopf darüber zerbrechen können, warum es kein »Warum« braucht, um die innersten Vorgänge in unserer Welt zu erklären (siehe *Und was war davor?*, Seite 779).

### Unwahrscheinlich unwahrscheinlich

Die Unschärferelation führt uns also vor Augen, dass im tiefsten Inneren unserer Welt im Grunde alles möglich ist. Nichts ist sicher bestimmt, folglich gibt es auch für jede erdenkliche Möglichkeit eine gewisse, wenn vielleicht auch extrem winzige Wahrscheinlichkeit. Dass etwas derart Unwahrscheinliches aber tatsächlich regelmäßig eintritt, werden wir sehen, wenn wir unsere Sonne ins Visier nehmen. Sie beweist uns täglich aufs Neue, dass unsere Vorstellungen von der quantenmechanischen Struktur unserer Welt tatsächlich stimmen müssen, wenn sie auch dem gesunden Menschenverstand zu widersprechen scheinen. Denn in ihrem Inneren geschieht permanent ein äußerst bizarr anmutendes Phänomen, das durch die Energieunschärfe ermöglicht wird. Ohne diesen Effekt könnte die Sonne niemals Licht zu uns senden (siehe *Ominöses Durchtunneln*, Seite 287). Doch das Geheimnis, das dahintersteckt, lüften wir erst später ...