Teil 2: Von Wellen und Photonen

.

So, wie versprochen,
weiter geht's mit Wellen, Photonen, Phononen
und magischen Gummibärchen.

.

In diesem Teil gehe ich noch einmal ausführlich
auf das Modell des Welle-Teilchen-Dualismus ein –
darauf, wo es nach wie vor seine Gültigkeit besitzt,
wo seine Grenzen liegen - und
warum wir ein besseres Modell brauchen.

Außerdem geht es um den Übergang
von der Quantenwelt in unsere Alltagswelt.
.
In diesem Zusammenhang muss ich vielleicht auch erklären,
warum dieses YouTube-Video
immer noch in meinem Kanal unter dem Motto
"Relativitätstheorie 2.0" läuft?
Nun, das ist so:
Als ich mein anschauliches Modell der
Relativitätstheorie entwickelt habe,
ging ich noch vom klassischen Welle-Teilchen-Dualismus aus
– für Licht und auch für Materie.
In der Einleitung zu DIESEM Video habe ich aber gesagt,

dass das Modell des Welle-Teilchen-Dualismus
zwar noch überall gelehrt,
aber eigentlich veraltet ist.
Für meine Überlegungen zur Relativitätstheorie
spielt das jedoch keine Rolle.
Ich habe nur den Wellencharakter der Natur gebraucht.
Der Teilchencharakter, z.B. von Photonen,
taucht nur gelegentlich auf,
im Sinne von abzählbaren Energiequanten.
Abgesehen davon war der Teilchenaspekt aber eher hinderlich.
.
Für die klassische Physik ist der Welle-Teilchen-Dualismus
– in einem gewissen Rahmen – weiterhin ein brauchbares Modell.

Auch die Relativitätstheorie gehört zunächst
in diesen klassischen Bereich,
schließlich wurde sie noch vor der Quantentheorie formuliert.
.
Heute wissen wir allerdings,
dass die klassische Vorstellung von Licht
als elektromagnetische Welle
im Sinne der Maxwell'schen Theorie nicht ausreicht,
sondern durch die Quantenmechanik ergänzt werden muss.
.
Andererseits,
und das ist auch Thema dieses Vortrags
zur Quantentheorie des Lichts,

ändert sich dadurch nichts an meinem
anschaulichen Modell der Relativitätstheorie.
Im Gegenteil: Der Zusammenhang zwischen
Relativitätstheorie und Quantenmechanik
wird nur offensichtlicher:
Die Spezielle Relativitätstheorie lässt sich nämlich als eine Art
Dopplereffekt innerhalb der Quantenmechanik verstehen.
Auch Fragen, die in meinen Vorträgen
zur Relativitätstheorie aufkamen,
erscheinen nun in einem neuen Licht:
Warum ist die Lichtgeschwindigkeit
für alle Wellenlängen und Frequenzen gleich?
Und ist das Vakuum wirklich nur leerer Raum?

Im Rahmen der modernen Quantentheorie
bekommen diese Fragen eine andere, oft tiefere Bedeutung.
Umgekehrt kann ein anschauliches Modell
der Relativitätstheorie vielleicht auch helfen,
die Quantenmechanik besser zu verstehen.
Vor allem beim Thema "Kollaps der Wellenfunktion"
werde ich darauf noch einmal zurückkommen.

.

Ich habe jetzt schon oft das Wort "Photon" verwendet.
Der Begriff stammt jedoch
aus dem Modell des Welle-Teilchen-Dualismus –
und dieses Bild ist
nach den modernen Quantentheorien veraltet.

Im Mikrokosmos, also auf der Quantenebene,
gibt es keine Teilchen in dem Sinne,
wie wir sie aus dem Alltag kennen.
Deshalb taucht immer wieder die Frage auf:
Soll das Wort „Photon“ überhaupt noch benutzen werden?
Einstein selbst sprach übrigens von Lichtquanten.
.

Nach der Quantenelektrodynamik sind Photonen genau genommen:
Quantisierte Modenanregung des elektromagnetischen Felds.
Dabei muss aber angemerkt werden,
dass dieses „Feld“ nicht identisch ist mit den
bekannten KLASSISCHEN elektromagnetischen Feldern.
Darauf komme ich später noch zurück.

.
Dieser Ausdruck – „quantisierte Modenanregung usw.“ –
ist natürlich sehr lang.
Deshalb bleibe ich bei dem Wort "Photon" -
auch deshalb, weil es einen - durchaus sinnvollen - Aspekt gibt:
Diese Modenanregungen sind keine klassischen Wellen
mit einer echten Amplitude.
Die Modenanregungen sind quantisiert
und jedes nächsthöhere Anregungsniveau
ist ein weiterer Eigenzustand derselben Mode.
Darum spricht man beim quantisierten elektromagnetischen Feld
auch nicht von einer klassischen Amplitude,
sondern von einer quantenmechanischen Wellenfunktion.

Diese Wellenfunktion ist immer auf 1 normiert und ihr
Betragsquadrat gibt die Wahrscheinlichkeit an,
das gesamte Lichtquant, also das Photon,
bei einer Messung in einem bestimmten Modus
oder an einem bestimmten Ort zu finden.“

.

Wobei man sich diese sogenannte Wellenfunktion nicht
ausschließlich als einen mathematischen Ausdruck vorstellen muss.
Sie soll hier nur verdeutlichen,
dass wir es nicht mit einer klassischen Welle zu tun haben.

.

Aber letztlich sind Worte wie "Photon" nur Hilfsmittel.
Entscheidend ist das Bild, das wir im Kopf haben.

Und genau dieses Bild möchte ich euch im Folgenden vermitteln.
..
Wie kommt man überhaupt darauf,
zu denken, Licht wäre ein Teilchen?
Und dazu noch Teilchen, die sich manchmal seltsam verhalten!
Naja, wir betrachten die Welt eben mit unseren Augen
und interpretieren sie entsprechend unseren Erfahrungen.
.
Als der Mensch noch nicht reisen konnte,
dachte er, die Erde wäre flach.
(Bild mit der Erde als Scheibe)
Aber mit einem sich ausdehnenden Erfahrungshorizont,
wurde aus der Scheibe eine Kugel,

(Bild mit der Erde als Kugel)
rückte die Erde mit dem Menschen
aus dem Zentrum des Universums heraus
(Bild des geozentrischen Weltbilds und Übergang
vom Geo-zum Heliozentrischem Weltbild)
in eine Umlaufbahn um eine Sonne
und heute ist die Erde ein Planet,
wie ihn fast alle rund 100 Milliarden Sonnen in unserer Galaxie,
der Milchstraße haben,
(Bild der Milchstraße)
wobei es nach heutigem Stand, wiederum
weit mehr als 100 Milliarde Galaxien in unserem Universum gibt.
(Bild mit vielen Galaxien)

Und mittlerweile spricht man sogar von Multiversen.
.
Wenn wir jetzt in die andere Richtung blicken,
in den Mikrokosmos, in die Quantenwelt,
(Bild von Atomen und Molekülen)
versuchen wir natürlich ebenfalls
die Natur mit den uns geläufigen Begriffen
zu beschreiben und zu verstehen.
Und diese Begriffe sind eben Teilchen,
Teilchen, die sich an einem bestimmten Ort befinden oder bewegen,
eine Masse und Energie haben,
und die man idealerweise,
im wahrsten Sinne des Wortes "begreifen" kann.

Aber das alles sind Überlegungen und Begriffe
aus der klassischen Welt,
die es in der Quantenwelt so gar nicht gibt.
Und deshalb verhalten sich Quanten-Teilchen
aus diesem, unserem Blickwinkel heraus eben seltsam!
Ihr Ort oder ihre Energie lassen sich z.B. nicht genau bestimmen,
und nach manchen Interpretationen
scheinen sie sogar in der Zeit hin- und herzuspringen.
Irgendwie sind Quantenteilchen einfach diffus.
.
Aber EIGENTLICH müssen wir die Sache andersherum sehen:
Die Quantenwelt ist, so wie sie ist.
Und SIE ist die Grundlage für die makroskopische Welt.

Die Frage ist also nicht, warum ist die Quantenwelt unscharf?
Sondern, warum ist die makroskopische Welt scharf,
und was bedeutet überhaupt "scharf"?
Wenn wir die Position eines Menschen so genau bestimmen wollten,
wie wir es von Quantenteilchen verlangen,
d.h. genauer als der Durchmesser eines Haares,
was nehmen wir dann überhaupt als Referenz
für diese Positionsbestimmung?
Den Schwerpunkt seiner Kontur, seiner Masse,
welche Position muss er einnehmen?
Sitzend, liegend... ?
Spontan fällt mir dazu ein Film von Woody Allen ein:
"Harry außer sich":

(Bild aus dem Film "Harry außer sich" zeigen)
In dem der Hauptdarsteller unscharf ist.
.
Die Frage ist also, wie kommen wir von der
"unscharfen" Quantenwelt in die,
unseren Erfahrungen entsprechende,
sagen wir, klassische Welt, also unsere Alltagswelt?
Tatsächlich ist dieser Übergang fließend,
und es folgt daraus ein wichtiges
und sehr nützliches Prinzip in der Physik.
Man nennt es das Prinzip des klassischen Limes.
Denn, JEDE Theorie hat einen beschränkten Gültigkeitsbereich.
Neue Theorien, die einen neuen Gültigkeitsbereich erschließen,

müssen, wenn sie sich dem Gültigkeitsbereich
der alten Theorien nähern,
deren Ergebnisse reproduzieren.
Dieses Prinzip ist auch bei der Interpretation
von Experimenten mit einzelnen Photonen sehr nützlich.
Denn im Mittel über viele Photonen ergibt sich immer das Verhalten,
das durch die klassische Optik – oder allgemeiner
durch die Wellenausbreitung elektromagnetischer Wellen –
vorhergesagt wird.

.

(Ab hier Bild des Doppelspalt-Experiment als Hintergrundbild)
Ich werde das mal konkret am Doppelspalt-Experiment erklären,
welches ja DAS Schlüsselexperiment zur Quantenmechanik ist.

Dazu habe ich ein kleines Tisch-Experiment aufgebaut –
mit einem Laserpointer und einigen schwarz lackierten Glasscheiben.
Wer möchte, kann es problemlos selbst zu Hause ausprobieren.
.
Zunächst die Frage,
wie kommt man überhaupt darauf anzunehmen,
dass Licht aus Teilchen, oder sagen wir mal besser,
aus Energiepaketen besteht?
Gehen wir zuerst einmal von einem rein klassischen Bild aus.
In diesem Modell ist Licht eine elektromagnetische Welle,
deren Energie kontinuierlich(!) von den Bildpunkten
wie von einer Antenne auf einem Detektor eingesammelt wird.
Und zwar so lange, bis genug Energie vorhanden ist,

dass der Detektor anspricht.
Aber WENN dem so wäre, dann würden alle Bildpunkte
in Bereichen gleicher Helligkeit gleichzeitig sichtbar werden.
Wenn ihr das Experiment, so wie ich hier, daheim durchführt,
habt ihr wahrscheinlich keinen Detektor,
sondern nur ein Blatt Papier.
Aber der Detektor ist letztendlich euer Auge.
Also wenn dem so wäre,
und da alle Bildpunkte des Detektors,
oder eures Auges,
in etwa die gleiche Empfindlichkeit haben,
dann würdet ihr, je nach Helligkeit,
zuerst einmal gar nichts sehen,

und dann, wenn die Auslöseschwelle erreicht ist,
wäre plötzlich das volle, helle Bild da.
.
Oder ein anderes Beispiel,
Wenn ihr nachts in den Sternenhimmel blickt,
die Augen schließt und nach einer Weile wieder aufmacht,
Dann müsstet ihr nach diesem klassischen Modell
nach einer gewissen Zeit,
die davon abhängt(!),
ob ihr z.B. noch eine Sonnenbrille aufhabt,
zuerst die hellsten Sterne, dann die weniger hellen usw. sehen.
So ist es aber nicht. Ihr seht sofort alle Sterne...
(Bild mit Sternenhimmel und Fotoblende)

Harry Paul hat in seinem Buch "Photonen"
(Bild vom Cover des Buchs [1])
sehr schön beschrieben welche Zeiten da ins Spiel kämen,
und welche Konsequenzen das hätte,
wenn die Energieaufnahme von Licht durch Atome
rein klassisch ablaufen würde.
.
Eine andere Begründung dafür,
dass Licht in Energiepaketen auftritt,
ist der schon erwähnte Foto-Effekt
(Bild von Briefmarke mit Photoeffekt [2])
Hier absorbieren die Elektronen sogar mehr Energie,
als bis zur Ionisationsschwelle des Atoms nötig wäre.

Die aufgenommene Energiemenge muss also vom Licht
und nicht vom Atom bestimmt sein.
Und es stellt sich letztendlich auch noch heraus,
dass die übertragene Energiemenge
nicht mit der Intensität des Lichts zusammenhängt,
sondern einzig und allein mit dessen Frequenz
(Bild ergänzen um E=hv, v Frequenz, h Planck. Wirkungsquantum)
Der Proportionalitätsfaktor wird das
Plancksche Wirkungsquantum genannt.
.
Ich möchte noch ein drittes Argument
für die Lichtquanten-Hypothese anführen,
das Albert Einstein 1905 in der Zeitschrift

"Annalen der Physik"
in folgendem Artikel veröffentlicht hat [3]:
„Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“
(Bild des Artikels)
Dieses Argument ist besonders genial,
weil es aus einer ganz anderen Richtung kommt.
Albert Einstein zeigt darin mit Hilfe der Thermodynamik,
dass sich die Entropie von Strahlung mit geringer Dichte so verhält,
als bestünde das Licht aus unabhängigen Lichtquanten.
Oder anders ausgedrückt:
Eine kontinuierliche klassische Feldbeschreibung
ist im Grenzfall sehr kleiner Intensitäten

nicht mehr mit einer quantisierten Welt vereinbar.
Und wahrscheinlich gilt das nicht nur für Licht,
sondern für alle Felder.
.
Es gibt noch andere Experiment,
bei denen Lichtteilchen
wie Kugeln in einem Billiard-Spiel agieren,
worauf ich jetzt aber nicht näher eingehe...
.
Es ist also von Natur aus offensichtlich,
dass die Energie des Lichts auf Quantenebene
nicht wie bei klassischen,
makroskopischen Antennen akkumuliert wird,

sondern in Energiepaketen statistisch verteilt,
ohne zeitlichen Offset übertragen wird.
In der Dokumentation auf ARTE,
die ich im letzten Video gezeigt habe,
wird es auch so dargestellt [4]:
(Ausschnitt aus Video mit Akkumulation von Photonen zeigen)
Wenn das Licht eingeschaltet wird,
sprechen die Bildpunkte auf dem Detektor
vom ersten Moment statistisch verteilt an,
bis das volle Bild zu sehen ist.
.
So viel zum Teilchen- oder besser gesagt
Quanten-Charakter des Lichts.

Und was ist die Begründung für den Wellencharakter?
Aus makroskopischer Sicht würde man hinter dem Doppelspalt
einfach einen Schattenwurf erwarten,
so wie es hier zu sehen ist,
wenn ich die beiden Öffnungen relativ groß mache.
(Video vom Doppelspalt-Experiment mit großen Öffnungen)
Wenn man aber einen Laser benutzt,
und die Öffnungen sehr klein macht
- ich habe hier dazu den Lack mit einer Rasierklinge angeritzt -
(Video vom Doppelspalt-Experiment mit kleinen Schlitzen)
dann sieht man nicht mehr den Schattenwurf,
sondern ein Interferenzmuster.
Ein ähnliches Interferenzmuster erhält man,

wenn man Wasserwellen durch zwei Spalte schickt
(Video mit Wasserwellen)
und so kam man zum Wellenbild des Lichts.
.
Wem das jetzt etwas zu schnell war,
oder wer noch etwas mehr über den geschichtlichen Hintergrund
des Doppelspalt-Experiments erfahren möchte,
der kann sich das Video
"Quantenphysik: Aufbruch ins Ungewisse",
das auf ARTE ausgestrahlt wurde,
ja einmal ganz ansehen.
Der Link steht in den Erläuterungen zu diesem Video [4].
.

So entstand also das Modell des Welle-Teilchen-Dualismus,
das letztendlich nicht nur für Licht,
sondern für Elektronen und sogar große Moleküle bestätigt wurde.
.
Und wieso ist dieser
Welle-Teichen-Dualismus jetzt so gesehen ein Paradoxon?
Naja, wenn wir die Lichtintensität so weit reduzieren,
dass nur einzelne Photonen im Experiment sind -
was überprüft werden kann,
indem ich je einen Detektor hinter jeden Spalt stelle
und die Intensität so weit reduziere,
dass immer nur ein Photon
in entweder dem einen ODER dem anderen Detektor gemessen wird;

wenn ich dann die Detektoren wieder weglasse und
die Photonen bis zum Bildschirm durchlasse,
dann sehe ich dort mit der Zeit ein Interferenzbild.
Jedes Photon muss also durch beide Spalte gegangen sein.
Und das Ganze gilt nicht nur für Licht,
sondern auch für Elektronen, Atome und sogar größere Moleküle.
.

Dieses Doppelspalt-Experiment
kann man auch etwas anders durchführen,
denn es ist natürlich schwierig
Detektoren hinter diese kleinen Spalte zu stellen.
Dafür spaltet man das Licht in 2 Lichtwege auf,
(Bild eines Holografie-Aufbaus zeigen)

z.B. über einen halbdurchlässigen Spiegel (Bem.[5]).
Auf der Projektionsfläche bekommt man
auch in diesem Fall Interferenzstreifen,
allerdings mit einem periodischen Abstand im µm-Bereich.
.
Tatsächlich ist das hier ein Standard-Aufbau, mit dem
wir jahrelang holographisch optische Gitter für Spektrometer
bei der Firma ZEISS in Oberkochen hergestellt haben (Bem. [6]).
.
Weil das Verständnis dieses Paradoxons so wichtig ist
- auch später für die Quantenphysik -
werde ich es noch einmal etwas anders beschreiben,
mit einem Gummibärchen:

.
Sicher kennt ihr alle das Ratespiel,
in welcher Hand habe ich das Gummibärchen versteckt?
Kinder, und natürlich auch meine Enkelin und Enkel,
lieben es ganz besonders.
Nur wandle ich es ein bisschen ab
und spiele den großen Zauberer:
Ich nehme in jede Hand ein halbes Gummibärchen,
zeige sie den Kindern und sage:
Ich schließe jetzt meine Hände,
stecke sie in meinen Zauberhut,
sage Abrakadabra, und wenn ich die Hände wieder herausnehmen,
dann sind die beiden Gummibärchen-Hälften verzaubert.

Ihr dürft jetzt eine Hand auswählen,
aber ihr werdet sehen,
da werdet ihr keine halben Gummibärchen mehr finden,
sondern entweder ein ganzes oder gar keines.
Wer will sein Glück versuchen?
Und so finden die Kinder mal
ein Gummibärchen und freuen sich,
und mal wundern sie sich,
weil es verschwunden ist.
So wiederholen wir den Zaubertrick ein paar Mal,
bis die Kinder misstrauische werden und die halben Gummibärchen
und noch ein paar ganze im Zauberhut finden.
.

Opa, du hast geschummelt!
Du hast die halben Gummibärchen im Zauberhut
gegen ein ganzes ausgetauscht!
Tja, so schnell ist man als großer Zauberer entlarvt.
.
ABER: Wenn die Gummibärchen ganz winzig klein wären,
Einzelne Quantenbärchen sozusagen,
dann bräuchte ich nicht zu schummeln
und bräuchte keinen Zauberhut.
Wenn dann die Kinder nach dem halben Gummibärchen greifen,
haben sie plötzlich
ein ganzes Gummibärchen in der Hand oder keines,
und das ganze Gummibärchen

würde plötzlich in der anderen Hand auftauchen.
.
Das ist, anschaulich beschrieben,
das Rätsel, oder das Paradoxon,
das hinter dem Welle-Teilchen-Dualismus steckt.
Man nennt es den "Kollaps der Wellenfunktion",
das Photon nimmt gleichzeitig beide Wege,
halbiert sich sozusagen,
aber wenn man bei einem der Wege nachschaut,
ob es dort ist,
dann detektiert man entweder ein ganzes Photon, oder keines.
.
Eine Anmerkung muss ich dazu noch machen:

Korrekterweise dürfte ich hier nicht von
halben Quantenbärchen oder Photonen sprechen,
sondern nur von Wahrscheinlichkeiten für ganze Quantenteilchen.
Aber den Unterschied verstehen meine Kinder sowieso nicht,
und, ehrlich gesagt, ich auch nicht wirklich. (siehe Bem [7])
.
Im 4. Teil dieses Vortrags werden wir den
Kollaps der Wellenfunktion noch viel genauer unter die Lupe nehmen
und feststellen, dass er unser klassisches Bild der Welt
vollkommen auf den Kopf stellt.
Tatsächlich ist er auch für die Quantentheorie
bisher ein ungelöstes Rätsel.
.

Man kann das Gummibärchenexperiment auch noch ausbauen,
und damit veranschaulichen,
um was es beim Physiknobelpreis im Jahr 2022 ging,
im Zusammenhang mit sogenannten verschränkten Photonen.
Dabei wurde die Verletzung von Bells Ungleichungen belegt,
womit experimentell bewiesen wurde,
dass es keine verborgenen Parameter gibt.
Das Quantenbärchen entscheidet sich also tatsächlich
erst bei der Messung, in welche Hand es geht.
.
Zur Veranschaulichung der Verschränkung von 2 Gummibärchen,
nehme ich jetzt nicht 2 halbe Gummibärchen in jede Hand,
sondern 2 ganze, weiße Gummibärchen.

(Bild von 2 ganzen weißen Gummibärchen)
Schließe die Hände und sage:
Wer möchte ein rotes und wer ein grünes Gummibärchen?
Gleiches Spiel - Abrakadabra -
(Bild der Hände im Zauberhut und danach beide öffnen)
und wenn ich nachschaue,
dann habe ich in der einen Hand ein grünes
und in der anderen Hand ein rotes Gummibärchen.
Welches in welcher Hand ist, das entscheidet der Zufall.
.
Und die Farbe kann sich ändern.
Beim nächsten Mal frage ich,
wer ein orangenes und ein blaues Gummibärchen möchte?

(Weiße Gummibärchen zeigen, Hände in den Zauberhut,
dann Hände öffnen und orangenes und blaues zeigen)
oder ein gelbes und ein violettes?
(Gleichens Spiel mit gelbe und violette)
Die Farben sind immer die Komplementärfarben.
Aber welches in welcher Hand ist,
das ist Zufall.

.
Diese Quantenverschränkung kann mit dem Modell des
Welle-Teilchen-Dualismus gar nicht erklärt werden,
also weder mit dem Wellen-
und schon gar nicht mit dem Teilchenbild.
.

Auch die Photonenstatistik,
also z.B. in welchem zeitlichen Abstand
Photonen aufeinander folgen,
sei es auf demselben Pfad oder auf verschiedenen,
kann mit dem Modell des Welle-Teilchen-Dualismus
nicht erklärt werden.
.
Bevor wir aber zur richtigen Erklärung kommen,
möchte ich noch ein paar Worte zum klassischen Limes,
also zum Übergang von der Quanten-
in die makroskopische Welt sagen,
da es ja immer heißt, die Quantenwelt wäre komisch:
.

Ich hatte vorhin ja schon 2 extreme Fälle
des Doppelspalt-Experiments angesprochen:
Zum einen mit sehr großen Spalten,
dann sieht man nur das Schattenbild der Öffnungen
(Bild des Schattenbilds)
und zum anderen mit - im Vergleich zur Wellenlänge -
sehr engen Spalten,
(Bild des Interferenzmusters)
dann sieht man ein Interferenzmuster.
Das sind ja 2 völlig unterschiedliche Ergebnisse.
Es hätte ja auch sein können,
dass das Schattenbild einfach immer schmäler und dunkler wird.
Tatsächlich steht das linke Bild stellvertretend

(Bild von beiden Fällen)
für die makroskopische, also unsere Alltagswelt.
Und das rechte für die Quantenwelt.
Die Frage ist jetzt, sind das 2 unterschiedliche Welten?
Oder geht die eine aus der anderen hervor?
Wie kommt man von der einen zu der anderen Welt?
Gibt es da einen Übergangsbereich?

.
Betrachten wir mal einen einzelnen Spalt.
Wie schon gesagt,
wenn der Spalt, im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts,
relativ schmal ist,
erhält man keinen einfachen Schattenwurf,

sondern ein Beugungsmuster.
(Links, Bild vom Beugungsbild eines Spalts)
Dieses Beugungsmuster erinnert
an die Beugung von Wasserwellen hinter einer Öffnung.
(Rechts, Bild von Beugung von Wasserwelle an Spalt)
.
Wenn der Spalt im Vergleich zur Wellenlänge sehr eng ist,
Dann sieht man dahinter eine Kugelwelle.
(Simulation mit https://www.falstad.com/ripple/ (siehe [8]))
Das ist das Beugungsmuster einer Öffnung,
die viel kleiner als die Wellenlänge ist.
Wird der Spalt breiter,
dann sieht man die Beugung nur noch an den Kanten des Spalts,

(Video von Beugung von Wasser an Spalten unterschiedlicher Breite)
und in der Mitte geht es schon eher
in Richtung einfacher Schattenwurf.
Das Beugungsbild ist jetzt das Interferenzbild des Lichts,
das aus diesem breiteren Spalt austritt.
Genauso sieht es bei meinem Tischexperiment aus.
(Wieder Beugungsbild des Lasers von Einzelspalt)
Wenn also der Spalt immer breiter wird,
dann wird der gebeugte Anteil relativ zum Rest immer kleiner,
so dass wir am Ende das Schattenbild des Spalts erhalten.
(Wieder Schattenbild des Lasers von der Doppelblende)
Im Alltagsleben verschwinden die
kleinen Oszillationen am Rand auch noch,

da das Sonnenlicht eine Mischung aus vielen Farben ist
(Bild mit mehreren Farben usw.)
und außerdem die Lichtquellen im Alltag
normalerweise keine Punktlichtquellen sind,
was dazu führt, dass das Beugungsbild verschmiert.
.
Aber, trotz allem, ist also auch
das Schattenbild ein Interferenzbild.
Oder anders ausgedrückt:
Die Quantenwelt geht im klassischen Limes
in unsere Alltagswelt über.
.
Noch ein weiterer kleiner Exkurs,

für alle, die tiefer einsteigen wollen:
Ich habe jetzt ja zum einen vom Beugungsbild des Doppelspalts
und zum anderen vom Beugungsbild des Einzelspalts gesprochen.
Die Spalte, die ich in meinem Aufbau verwendet habe,
sind nicht perfekt und vor allem sind sie nicht ausreichend schmal.
Was man bei diesem Beugungsbild also wirklich sieht,
ist eine Überlagerung des Beugungsbild
eines perfekten Doppelspalts, das in Wirklichkeit so aussähe:
(Beugungsbilder des perfekten Doppelspalts,
Einzelspalt und Superposition)
mit dem Beugungsbild des Einzelspalts.
Diese Überlagerung, auch genannt Superposition,
ist ein wichtiges Prinzip unserer Natur.

Die Funktionsweise von Quantencomputern z.B.
basiert direkt auf diesem Superpositionsprinzip.
Endes des Exkurses.
.
Und wie sieht es jetzt in der Alltagswelt aus?
Geht in der Alltagswelt ein Objekt auch durch beide Spalte?
So wie es für Licht und Elektronen schon gezeigt wurde.
Die Antwort lautet: Im Prinzip ja!
ABER es müssen ein paar Randbedingungen erfüllt werden,
die da sind:
.
Die Quelle für diese Objekte muss
(Filmausschnitt aus Arte-Film, wie aus Punkten Interferenzbild wird)

.

1. identische Objekte aus einem "Quellpunkt" emittieren,
   die gleichzeitig auf beide Spalte treffen können. (Bem.[9])
2. Ich brauche viele identische Objekte,
   damit ein Interferenzbild überhaupt sichtbar wird.
3. Die Objekte dürfen auf ihrem Weg von der Quelle
   zum Detektor nicht mit ihrer Umgebung wechselwirken,
   sonst ändert sich ihre Phase,
   und das Interferenzbild verschwindet.

.

Und das sind nur ein paar Randbedingungen,
die es, umso größer die Objekte werden,
umso schwerer machen, ein Interferenzbild zu erzeugen.

.
Diese Randbedingungen sind für große Objekte
also nicht zu erfüllen.
und zwar aufgrund von Einschränkungen,
die durch die Quantenwelt selbst bedingt sind,
also auch wieder aufgrund des klassischen Limes.
Somit ist alles in sich konsistent.

.
Alles wird also durch die Gesetze der Quantenwelt bestimmt,
und unsere Alltagswelt ist der klassische Limes.
Wobei der Übergang fließend ist (siehe auch Bem.[10]).
Ihr könnt euch ja selbst einmal überlegen,
warum es aufgrund dieser Überlegungen

Schrödingers Katze NICHT gibt,
wobei in die vollständigen Überlegungen
ein Punkt noch mit aufgenommen werden muss:
"Der Kollaps der Wellenfunktion".
Thema des 4. Teils meines Vortrags.
.
So, jetzt haben wir nochmal sehr ausführlich
das Doppelspalt-Experiment und den
Welle-Teilchen-Dualismus beleuchtet -
wie aus der Quantenwelt die Alltagswelt hervorgeht
und dass nicht die Quantenwelt komisch,
sondern die Alltagswelt der klassische Limes der Quantenwelt ist.
Außerdem habt ihr erfahren, dass eine

notwendige Konsequenz aus dem Welle-Teilchen-Dualismus
der Kollaps der Wellenfunktion ist.
Der Kollaps der Wellenfunktion ist strenggenommen
aber nur ein "umgangssprachlicher" Ausdruck für das,
was wir in den nächsten beiden Kapiteln besprechen wollen.
Bisher habe ich ja noch gar nicht erklärt,
warum die Energie des Lichts quantisiert ist.

.
Darum hoffe ich, ihr bleibt weiter dran –
wir sehen uns im nächsten Teil wieder,
wenn wir dann tiefer in die Quantenwelt eintauchen.“
.
--- Quellen ----------

[1] Harry Paul, Photonen – Eine Einführung in die Quantenoptik: Teubner Studienbücher Physik, Stuttgart, 1999.
[2] dbp-1979-1019-albert-einstein-lichtelektrischer-effekt-fed920.jpg Bild: Deutsche Bundespost, 1979 – „Photoelektrischer Effekt (Albert Einstein)“, Quelle: Picryl / Public Domain
[3] Einstein, A. (1905).
Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.
Annalen der Physik, 17, 132–148.
https://doi.org/10.1002/andp.19053220607
[4] https://archive.org/details/quantenphysik-aufbruch-ins-ungewisse-impulse-arte
[5] Bem.: Oder indem ich das einfallende Licht aufweite

und auf 2 Spiegel fallen lasse, die es auf 2 Lichtweg schicken, die am Ende auf der Projektionsfläche wieder zusammenfallen.

[6] Bem.: Das Interferenzbild kann in diesem Fall leicht sichtbar gemacht werden, indem als Projektionsfläche ein Gitter mit geeignetem Gitterabstand verwendet wird. Dadurch einsteht ein leicht zu analysierendes Moiré-Muster.

[7] Bem.: Auf beiden Wegen muss das Licht mit den optischen Komponenten wechselwirken, damit es den entsprechenden Weg geht!

[8] Paul Falstad https://www.falstad.com/ripple/

[9] Bem.: Quellen für große Objekte emittieren meistens nur in ganz bestimmte Richtungen. Die Lichtquelle muss aus einer Mode emittieren.

Weitere Probleme: Strahlteiler für Materie…?

[10] Bem.: Tatsächlich sind unter geeigneten Bedingungen kleine Quanteneffekte immer vorhanden. Ein schönes Experiment dazu ist eine raffinierte Messmethode von Hanbury Brown & Twiss namens Speckle- oder Intensitäts-Interferometrie, bei der der Winkeldurchmesser eines Sterns allein aus den photonischen Eigenschaften seines Sternenlichts herausgekitzelt wird.