

Der neue FLP nimmt viele Anleihen an den Wesenszügen der QM und dem online-Lehrgang milq (milq.tu-bs.de). In der didaktisch methodischen Planung finden sich am Ende Links zu den entsprechenden Stellen des Lehrgangs, der zugehörigen Simulationsprogramme sowie zu den bestehenden Arbeitsblättern.

DoStd.	Grundlegende Wissensbestände	Didaktisch-methodische Planung	Kompetenzentwicklung
KSP: Eigenschaften von Quantenobjekten ZRW 26			
1	<p>Welleneigenschaften von Licht Interferenz durch Beugung am Doppelspalt Interferenzgleichung für das n-te Maximum: $\frac{n \cdot \lambda}{b} = \frac{s_n}{e_n}$ Polarisation, Streuung</p>	<p>Wiederholung Klassisches Wellenmodell – Doppelspaltversuch beim Licht Klassisches Teilchenmodell – Masse, Ladung, Impuls, Ort, Bahn <u>Zeigerformalismus nach Küblbeck</u></p>	<p>Die qualitativen Vorhersagen der klassischen Elektrodynamik zur Energie der Photoelektronen mit Bezug auf die Frequenz und die Intensität des Lichts erläutern. Teilchen- und Welleneigenschaften von Photonen und Elektronen beschreiben. Die Ergebnisse von Mehrfachspaltexperimenten quantitativ mit dem <i>Zeigerformalismus</i> beschreiben.</p>
2-3	<p>Teilcheneigenschaften von Photonen <u>Photoeffekt</u> Histor. Experiment nach HALLWACHS Deutung nach EINSTEIN Photonenhypothese Teilcheneigenschaften von</p>	<p>Vorstellen des historischen Experiments von W. HALLWACHS 1888. Erarbeiten des Photoeffekts. Der Versuch einer Deutung im Wellenmodell führt zum Widerspruch mit den experimentellen Ergebnissen. Notwendigkeit einer neuartigen Modellvorstellung von der Natur des Lichts erkennen. Photonenhypothese erörtern. Lichtquanten besitzen die Energie</p>	<p>Die Gültigkeit des EES in der Quantenphysik am Beispiel des Photoeffekts aufzeigen. Energiebilanzen aufstellen und anwenden. Den Widerspruch der experimentellen Befunde des Photoeffekts zur klassischen Physik erläutern und den</p>

	<p>Photonen</p> <p>Energiebilanz: $h \cdot f = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + W_A$</p> <p>EINSTEIN'sche Gerade Planck'sches Wirkungsquantum</p> <p>Energie von Photonen</p> <p>Impuls von Photonen</p>	<p>$E = h \cdot f$</p> <p>Begriffe: Austrittsarbeit und Grenzfrequenz</p> <p>Aufstellen der Energiebilanz $h \cdot f = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + W_A$.</p> <p>Im E(f)-Diagramm die EINSTEIN'sche Gerade zeichnen und aus deren Anstieg das PLANCK'sche Wirkungsquantum ermitteln.</p> <p>Experimentelle Überprüfung der Energiebilanz mit einer Photozelle. Mit der Gegenfeldmethode als Messverfahren wird die Energie der schnellsten Photoelektronen bestimmt.</p> <p>Photonen besitzen einen Impuls, den sie auf materielle Teilchen übertragen können (z.B. Kometenschweif oder Photoelektronen in Metallen).</p> <p>$p = \frac{h \cdot f}{c}$</p> <p>Lehrgangstext AB zum Photoeffekt</p>	<p>Photoeffekt mithilfe der EINSTEIN'schen Photonenhypothese deuten.</p> <p>Simulationssoftware bei der Untersuchung von Photonen nutzen (z.B. Uni Colorado).</p> <p>Das Versagen klassischer Modelle bei der Deutung quantenphysikalischer Phänomene diskutieren und begründen.</p> <p>Die Grenzen des klassischen Teilchenmodells und des klassischen Wellenmodells benennen.</p> <p>Eine eindeutige Antwort auf die Frage „Welle oder Teilchen?“ ist in der QuPh nicht möglich. Quantenobjekte sind komplizierter.</p> <p>Experiment zur Messung des PLANCK'schen Wirkungsquantums für das Experimentalpraktikum planen.</p>
4	<p>Teilcheneigenschaften von Elektronen</p> <p>Masse, Ladung, Impuls, Ort</p> <p>Elektronenstrahlröhre</p>	<p>Wdh. klassischer Teilcheneigenschaften.</p> <p>Elektronenstrahlröhre (Wdh.): Aufbau, Wirkungsweise – Nutzung der Teilcheneigenschaften von Elektronen, d.h. glühelektrischer Effekt, Beschleunigung im elektrischen</p>	<p>Recherchen zu Fragestellungen der Eigenschaften der Quantenobjekte und deren Anwendungen durchführen und präsentieren.</p>

	<p>Impulsexperiment</p>	<p>Längsfeld zwischen Katode und Anode, Ablenkung im Querfeld (y-Ablenkung), Gesamtablenkung auf dem Schirm und seine mathematische Beschreibung, Ort und Impuls sind klassisch berechenbar. Experimenteller Nachweis des Photonenimpulses z.B. durch O. FRISCH 1933: Photonen einer Natriumdampflampe lenken nach Impulsübertrag einen Strahl von Natriumatomen zur Seite ab. Lehrgangstext Elektronen</p>	
5	<p>Welleneigenschaften von Elektronen</p> <p>Zusammenhang von Impuls und Wellenlänge</p> <p>De-Broglie-Hypothese</p> <p>DE-BROGLIE-Wellenlänge</p> $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ <p>Elektronenbeugung (Ausblick)</p>	<p><u>Schwerpunkt:</u> Vergleich von Doppelspaltexperimenten mit klassischen Teilchen, klassischen Wellen und Mikroobjekten</p> <p><u>Beginn:</u> (1) DSP-Exp. mit klassischen Teilchen mit dem Ergebnis für die Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x) = P_1(x) + P_2(x)$. (2) DSP-Exp. mit Quantenobjekten mit dem Ergebnis $P(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$.</p> <p><u>Zielorientierung und Motivation:</u> Wenn Photonen sowohl Teilcheneigenschaften als auch Welleneigenschaften zugeordnet werden, können dann Elektronen neben ihren Teilcheneigenschaften auch Welleneigenschaften besitzen? Analogie: Photon - Elektron $p = \frac{h \cdot f}{\lambda}$ und $c = \lambda \cdot f$ ergibt $p = \frac{h}{\lambda}$ bzw. $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ λ ...DE-BROGLIE-Wellenlänge Aufstellen der Hypothese. Diese Hypothese verlangt nach experimenteller Überprüfung. Lehrgangstext Elektronen AB zum Verhalten von Elektronen oder Atomen am Doppelspalt</p>	<p>Entwicklung physikalischer Fachtermini.</p> <p>Das Auftreten eines Paradigmenwechsels in der Physik am Beispiel der Beschreibung der Eigenschaften und des Verhaltens von Quantenobjekten (Photonen, Elektronen) im Vergleich zur Beschreibung mit klassischen Modellen reflektieren.</p> <p>Das Versagen klassischer Modelle bei der Deutung quantenphysikalischer Phänomene diskutieren und begründen.</p>

<p>6</p>	<p>Elektronen als Quantenobjekte - Experimente mit Elektronenwellen Interferenz von Elektronenwellen am Doppelspalt: Experiment von JÖNSSON</p> <p>Beugung von Elektronenwellen in der Elektronenbeugungsröhre</p>	<p><u>Doppelspaltexperiment mit Elektronen von JÖNSSON 1961:</u> Bewusst machen, dass es technische Herausforderungen bei der Herstellung von Spalten und bei der Visualisierung des Interferenzmusters gibt.</p> <p>Jedes einzelne Elektron verhält sich beim Nachweis wie ein Teilchen. Erst wenn man die Verteilung aus vielen Einzelaufschlägen betrachtet, zeigt sich die charakteristische Wellenerscheinung des Interferenzmusters.</p> <p><u>Experiment mit Elektronenbeugungsröhre:</u> Ein Elektronenstrahl durchquert eine dünne Folie aus polykristallinem Graphit. Auf dem Leuchtschirm erkennt man mehrere helle Ringe. Ursache: Elektronen werden am Kristallgitter des Graphits gebeugt, d.h. Elektronen zeigen auch Welleneigenschaften.</p> <p><u>Versuch von Jönsson</u> <u>Quanteninterferenz</u></p>	<p>Mehrfachspaltexperimenten quantitativ mit dem Zeigerformalismus beschreiben.</p> <p>Quantenobjekte als quantenphysikalische Systeme von klassischen Objekten aufgrund besonderer Eigenschaften und des besonderen Verhaltens unterscheiden.</p> <p>Experimentelle Beobachtungen an der Elektronenbeugungsröhre auswerten und mit den Welleneigenschaften von Elektronen deuten und interpretieren.</p> <p>Das Quantenobjekt Elektron zeigt weder reines Teilchenverhalten noch reines Wellenverhalten.</p>
<p>7</p>	<p>Wechselwirkung von Strahlung mit Materie – COMPTON-Streuung</p> <p><u>COMPTON- Effekt</u> Experiment von 1922 Wechselwirkung von Photonen und Elektronen gemäß der Gleichung $\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$ mit der</p>	<p>Bestätigung der Quantisierung von Energie und Impuls, d.h. Bestätigung der Lichtquantenhypothese von EINSTEIN. Keine Unterscheidung zwischen dem Teilchen- und Wellenmodell möglich. Die COMPTON-Streuung macht die Röntgenstrahlung weicher, d.h. die Wellenlänge wird größer. Ein Photon der COMPTON-Wellenlänge λ_c hat die Energie, die der Ruhemasse eines Elektrons entspricht.</p>	<p>Vorgänge beim Durchgang von Strahlung durch Materie am Beispiel des Compton-Effekts beschreiben. Recherchen zu Fragestellungen der Eigenschaften der Quantenobjekte und deren Anwendungen durchführen und präsentieren. Die Grenzen des klassischen</p>

	<p>Compton- Wellenlänge</p> $\lambda_c = \frac{h}{m_{0,e} \cdot c}$ <p>als das Verhältnis dreier Naturkonstanten</p>		<p>Teilchenmodells und des klassischen Wellenmodells benennen.</p> <p>Mathematisierung physikalischer Sachverhalte.</p>
8	<p>Die Wesenszüge der Quantenphysik</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Stochastische Vorhersagbarkeit ➤ Fähigkeit zur Interferenz ➤ Eindeutigkeit der Messergebnisse (Einfluss der Messung) ➤ Komplementarität ➤ Verschränktheit und Nichtlokalität 	<p>Die Wesenszüge zunächst im Überblick einführen und anschließend am Doppelspaltexperiment vertiefen. Im Zentrum der Behandlung steht das Doppelspaltexperiment.</p> <p>Beginn mit Wdh.:</p> <p>(1) DSP-Exp. mit klassischen Teilchen mit dem Ergebnis für die Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x) = P_1(x) + P_2(x)$.</p> <p>(2) DSP-Exp. mit Quantenobjekten mit dem Ergebnis $P(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$.</p> <p>Erarbeitung:</p> <p>Die Wellenfunktion $\psi(x)$ ist einem Ensemble von identisch präparierten Quantenobjekten zugeordnet. Die Wellenfunktion entwickelt sich nach den Gesetzen der klassischen Wellenlehre mit Interferenz, Beugung,...</p> <p>Plausibilitätsbetrachtung und Interpretation von $P(x) = \psi(x) ^2$ als Wahrscheinlichkeitsdichte nach M.BORN. Die Wellenfunktion bestimmt die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt am Ort x nachzuweisen und es gilt:</p> $P(x) \Delta V = \psi(x) ^2 \cdot \Delta V$ <p>Für den Doppelspalt gilt: $\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$, d.h. die Quantenobjekte befinden sich in einem Überlagerungszustand.</p>	<p>Die Wesenszüge der Quantenphysik an Beispielen und Experimenten, z. B. am Doppelspaltexperiment und am Beispiel der Polarisationsmessung an Photonen qualitativ beschreiben.</p> <p>Mithilfe der Wesenszüge der Quantenphysik Experimente aus der aktuellen Forschung analysieren.</p> <p>Verwendung einer Computersimulation.</p>

		$P(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x) ^2$ $P(x) = \psi_1(x) ^2 + \psi_2(x) ^2 + 2\psi_1(x)\psi_2(x)$ <p>Die Wahrscheinlichkeitsfunktion enthält einen zusätzlichen Interferenzterm. Sie beschreibt somit das beobachtete Interferenzmuster.</p> <p><u>Simulationsexperiment zum Doppelspaltversuch AB zum Doppelspalt</u> <u>Lehrgangstext zu statistischen Aussagen</u></p>	
9	<p>Begriff „Quantenobjekt“ Interferenzversuche mit einzelnen Photonen</p> <p>Experiment von TAYLOR</p> MACH-ZEHNDER-Interferometer Wahrscheinlichkeitsaussagen	<p><u>Historisches Experiment von TAYLOR</u> <i>Aufbau</i> <i>Durchführung</i> <i>Beobachtung</i></p> <p>Auch einzelne oder sehr wenige Photonen erzeugen hinter einem geeigneten Beugungsobjekt (Nadelspitze) nach hinreichend langer Zeit ein Interferenzmuster.</p> <p><u>Schlussfolgerung:</u> Die Wechselwirkung der Photonen untereinander kann ausgeschlossen werden.</p> <p>Aufbau eines MACH-ZEHNDER-Interferometer: Laser, zwei Spiegel, zwei Strahlteiler (halbdurchlässige Spiegel), Schirm</p> <p><u>Experiment:</u> Das Laserlicht wird an Strahlteiler 1 in zwei Anteile aufgespalten, die entlang verschiedener Wege laufen (Weg A und Weg B). An ihrem Schnittpunkt steht Strahlteiler 2, der die beiden Teilstrahlen wieder vereint. Die Gangunterschiede, die sich auf verschiedenen Wegen von der Quelle zum Schirm bilden, bringen ein Interferenzmuster hervor (Simulationsprogramm).</p> <p><u>Vom Lichtstrahl zu einzelnen Photonen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reales Experiment mit Laserlicht, Graufiltern und empfindlichen CCD-Elementen zum Nachweis der 	<p>Quantenobjekte deutlich von klassischen Objekten aufgrund besonderer Eigenschaften und des besonderen Verhaltens unterscheiden.</p> <p>Stochastische Vorhersagbarkeit als Wesenszug erkennen.</p>

		<p>einzelnen Photonen (Nur Diskussion!).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Interferometrie mit einzelnen Photonen (Computersimulation) Ergebnis: Allmählicher Aufbau des Interferenzmusters aus einzelnen Photonen-„Einschlägen“. <p>Es offenbaren sich der Wellen- und der Teilchencharakter von Photonen. Es ist nicht möglich, das Verhalten von Photonen in einem reinen Teilchenmodell oder Wellenmodell zu beschreiben. Eine befriedigende Erklärung muss Elemente beider Modelle in sich vereinigen.</p> <p>Kann man einem Photon einen Weg zuschreiben? Ob ein Photon innerhalb des Interferometers die Eigenschaft „Weg“ besitzt, lässt sich mithilfe einer Markierung entscheiden. Zur Unterscheidung zwischen Weg A und Weg B verwendet man die Eigenschaft „Polarisation“.</p> <p>D.h., Aktivierung eines Polarisationsfilters in jedem der beiden Interferometerwege. Zunächst erfolgt die parallele Einstellung der Polarisationsrichtung.</p> <p>Ergebnis: Es entsteht ein Interferenzmuster. Anschließend Polfilter in Weg A senkrecht und Polfilter in Weg B waagrecht einstellen.</p> <p>Ergebnis: Das Interferenzmuster verschwindet.</p> <p>In der Quantenphysik ist es möglich, dass einem QO eine bestimmte Eigenschaft (z.B. „Weg A“ oder „Weg B“ <u>nicht</u> zugeschrieben werden kann.</p> <p>Die Vorstellung, dass sich ein Photon möglicherweise teilt, ist falsch.</p> <p>Obwohl ein QO eine Eigenschaft „Weg im Interferometer“ nicht besitzen muss, wird bei einer Messung dieser Eigenschaft immer ein bestimmter Weg gefunden.</p> <p>Experiment mit dem MACH-ZEHNDER-Interferometer als Quantenradierer</p>	<p>Bei Quantenobjekten das Auftreten oder Verschwinden eines Interferenzmusters mit der Komplementarität von Welcher-Weg-Information und Auftreten von Interferenz erläutern.</p> <p>Simulationssoftware bei der Untersuchung von einzelnen Photonen nutzen.</p> <p>Simulationssoftware bei der Untersuchung der Photonen-Eigenschaft „Weg“ nutzen.</p>
--	--	--	--

		<u>Simulationsexperiment: Interferometer</u>	
10	Verschränktheit und Nichtlokalität von Photonen als Wesenszug der Quantenphysik	<p>Begriff Verschränkung: Bei der Verschränkung sind zwei Quantenobjekte, die ehemals als Paar auftraten, auch nach ihrer räumlichen Trennung auf bestimmte Weise miteinander verbunden. Messungen an dem einen wirken sich unmittelbar, ohne Zeitverzögerung, auf den Zustand des anderen aus. Zwei quantenmechanisch verknüpfte Teilchen verhalten sich trotz großer Distanzen wie ein einheitliches System. Ändert sich der Zustand des einen Teilchens z.B. durch eine Messung, dann „spürt“ dies das andere instantan und ändert sofort seinen Zustand ebenfalls entsprechend, selbst wenn beide Partner Lichtjahre voneinander entfernt sind.</p> <p>Polarisationsmessung an zwei miteinander verschränkten Photonen: Misst man die Polarisation des einen Photons (Festlegen der Polarisation), dann ist damit sofort auch die Polarisation des anderen Photons festgelegt.</p> <p><i>Wichtig ist hierbei, dass erst im Augenblick der Messung die Polarisation entschieden wird.</i></p>	<p>Simulationssoftware bei der Untersuchung von Quantenobjekten nutzen.</p> <p>Recherchen zu Fragestellungen der Eigenschaften der Quantenobjekte und deren Anwendungen durchführen und präsentieren.</p>

EINSTEIN-PODOLSKI-ROSEN-
Experiment

EPR-Experiment 1935

Zunächst als Gedankenexperiment, später im Labor nachgewiesen.

Es wird ein System aus zwei Teilchen betrachtet, die anfänglich direkt miteinander wechselwirken und sich darauf weit voneinander entfernen. Ein solches System wird durch *einen einzigen*, speziellen quantenmechanischen Zustand beschrieben, der kein Produktzustand ist, das heißt die beiden Teilchen befinden sich in einem speziellen verschränkten Zustand.

An den räumlich getrennten Teilchen werden zwei komplementäre Messgrößen betrachtet, z. B. Ort und Impuls.

Es wird gezeigt, dass die Werte dieser Messgrößen für die beiden Teilchen, trotz der Trennung und trotz der Unschärferelation, streng korreliert sind: Eines der beiden Teilchen befindet sich nach der Messung in einem Eigenwert der ersten Messgröße, das andere im dazu komplementären Wert der zweiten Größe.

Behandlung einer Variante eines EPR-Experimentes, z.B. mit Photonenwillingen, die bzgl. der Polarisation verschränkt

		<p>sind.</p> <p>Der gemessene Zustand steht vorher nicht fest. Die beiden Quantenobjekte bilden auch über eine beliebige Distanz ein Quantensystem. Es gibt eine instantane Verbindung zwischen ihnen. => Nichtlokalität</p>	
11	<p>HEISENBERG'sche Unschärferelation</p> $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} ; \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$ <p>Komplementarität</p> <p>Notwendigkeit der Aufgabe des klassischen Bahnbegriffs für Mikroobjekte</p>	<p>Präparation bedeutet, dass bei Messungen der präparierten Größe, z.B. an einem Ensemble von Kugeln, die Streuung der Messwerte sehr klein wird (sehr geringe Standardabweichung). Die gleichzeitige Präparation verschiedener klassischer Eigenschaften wie z.B. „Ort“ und „Impuls“ an klassischen Körpern ist möglich. <u>aber</u> Es ist nicht möglich, ein Ensemble von Quantenobjekten gleichzeitig auf Ort und auf Impuls zu präparieren.</p> <p><u>Gedankenexperiment von HEISENBERG:</u> Elektronen am Einzelspalt, Herleitung und quantitative Formulierung der Unbestimmtheitsrelation. Hat man ein Ensemble von Quantenobjekten so präpariert, dass die Streuung der Ortsmesswerte Δx klein ist, so wird die Streuung der Impulsmesswerte Δp_x groß sein (und umgekehrt). Es gilt</p> $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad \text{bzw.} \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$ <p>Die HEISENBERG'sche Unbestimmtheitsrelation stellt eine untere Schranke für die gleichzeitige Präparation von Ort und Impuls (Energie und Zeit) bei Quantenobjekten dar. Ort und</p>	<p>Die Komplementarität als prinzipiellen Wesenszug der Quantenphysik interpretieren. An Beispielen die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation von HEISENBERG für den Messprozess erläutern.</p>

		<p>Impuls (Energie und Zeit) sind in der Quantenphysik komplementäre Größen. Abschied vom Begriff der Bahn eines QO: Aufklärung des Widerspruchs, dass Elektronen in einer Elektronenstrahlröhre scheinbar auf wohldefinierten Bahnen laufen durch eine Rechnung.</p>	
12	<p>Der quantenmechanische Messvorgang und seine Konsequenzen.</p> <p>Einfluss auf das Messergebnis</p>	<p>In einem Interferometer kann man einem Photon die Eigenschaft „Weg“ nicht zuordnen. Versucht man die Zuordnung, zeigt sich keine Interferenz. Beim Doppelspaltexperiment mit Elektronen ist die Zuordnung der Elektronen zu einem bestimmten Spalt nicht möglich, d.h. es ist falsch zu behaupten, das Elektron habe in der Spaltebene einen bestimmten Ort, den wir nur nicht kennen. Die Eigenschaft „Ort“ kann einem Elektron nicht zugeschrieben werden. Die Ortsmessung am Doppelspalt (z.B. in einem Simulationsprogramm) ergibt, dass die Ortseigenschaft bzw. „Welcher-Weg-Information“ und Interferenzmuster nicht gleichzeitig realisierbar sind. Das Interferenzmuster verschwindet (Wesenszug der Komplementarität). Verringert man im Simulationsprogramm, z.B. die Intensität der Lampe (Lichtblitz), so geht die strukturlose Verteilung erneut in das Interferenzmuster über. In der Quantenphysik hängt das Ergebnis von Experimenten empfindlich von der Versuchsanordnung ab.</p> <p>Bei jeder Messung an einem QO wird aus dem Spektrum der möglichen Messwerte z.B. am DSP (Spalt 1 oder Spalt 2) ein einzelner realisiert. Erst im Messprozess wird eine der beiden</p>	<p>Die Superposition der Möglichkeiten vor dem quantenphysikalischen Messvorgang erkennen und die Konsequenzen des quantenphysikalischen Messvorgangs mit dem Wesenszug der Eindeutigkeit der Messergebnisse bewerten.</p>

		<p>Möglichkeiten realisiert. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Messwert gefunden wird, lässt sich aus der Wellenfunktion mit der Wahrscheinlichkeitsgleichung nach BORN ermitteln.</p> <p>In der Quantenphysik besteht ein Unterschied zwischen „eine Eigenschaft haben“ und „eine Eigenschaft messen.“ Vergleich: Klassischer und quantenmechanischer Messvorgang Anders als in der klassischen Physik ändert eine quantenmechanische Messung den Zustand des Systems. Ursache ist nicht eine „Störung“ oder das „Geschubse“ der Photonen. Die Ursache ist grundsätzlicher Natur. Die Elektronen werden nach der Messung durch eine <i>andere</i> Wellenfunktion beschrieben. Den Übergang von $\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$ zu einer der beiden Möglichkeiten $\psi_1(x)$ oder $\psi_2(x)$ nennt man Zustandsreduktion oder Kollaps der Wellenfunktion HEISENBERG: „Übergang vom Möglichen zum Faktischen“</p> <p><u>Gedankenexperiment:</u> SCHRÖDINGER's Katze Übergang von mikroskopischen zu makroskopischen Systemen, klassischer Grenzfall, Überlagerungszustände. Die Wellenfunktion des Gesamtsystems (Kasten + Katze) hat die Form eines Überlagerungszustandes zweier makroskopischer Zustände („Atom zerfallen + Katze tot“ und „Atom nicht zerfallen + Katze lebt“). Die Wellenfunktion hat die gleiche Gestalt wie die eines QO beim Doppelspaltexperiment. Es besitzt die Eigenschaft „Ort“ nicht. Überträgt man diese Erkenntnis auf den Fall der Katze, so darf die Katze in dem Überlagerungszustand die Eigenschaften „tot“ oder „lebendig“ <i>nicht</i> besitzen. Verständnis des SCHRÖDINGER'schen Katzenproblems</p>	
--	--	--	--

		durch Dekohärenz . D.h., makroskopische Körper erscheinen klassisch, weil man sie nicht von ihrer Umgebung isolieren kann (Lichtstreuung, Wärmestrahlung, ...). Diese Wechselwirkung offener Systeme mit der Umgebung zerstört die Interferenzfähigkeit.	
13	Wiederholung, Systematisierung, Übung	Wiederholung, Systematisierung, Übung	Erworbenen Wissens selbstständig anwenden.