

FACETTEN DER QUANTENPHYSIK

VON HANS PETER DREYER

INFORMATIONEN FÜR LEHRERINNEN UND LEHRER



Universität
Zürich ^{UZH}



Version 6.0 – Juni 2022

hanspeter.dreyer@uzh.ch



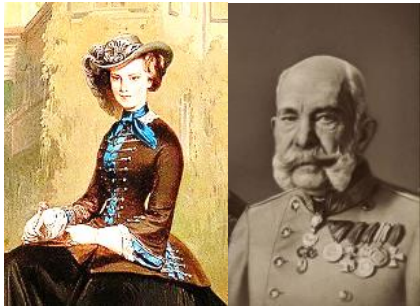
'FACETTEN DER QUANTENPHYSIK' – LEITGEDANKEN UND INFORMATIONEN

Physik hat viele Facetten: «historische, technische, soziale, kulturelle, philosophische und amüsante. Sie können wesentliche und bestimmende Motive für die Beschäftigung mit den Naturwissenschaften sein. Viele [Hochschul-]Lehrbücher lassen diese ‚Facetten der Physik‘ nur erahnen.» schrieb Roman Sexl, theoret. Physiker und Förderer der Gymnasialphysik, im Vorwort zur Buchreihe «Facetten der Physik» (Vieweg, Braunschweig) vor dreissig Jahren. Könnte es sein, dass auch der Physikunterricht diese Facetten nur erahnen lässt? Jedenfalls ist Physik weltweit ein bei vielen ungeliebtes Unterrichtsfach. In der Schweiz stösst sie schon am Anfang des Gymnasiums im Mittel auf das geringste Interesse, besonders ausgeprägt bei den Mädchen.



Eine These: «Physik ohne Quanten ist wie Geschichte, die bei Franz-Joseph und Sisi aufhört.»

In den kantonalen Lehrplänen für das Grundlagenfach taucht Quantenphysik kaum auf. Allenfalls wird ein «Einblick in die moderne Physik» gewünscht. Die moderne Physik ist im 21. Jahrhundert schon 100 Jahre alt: Relativitätstheorie und Quantenphysik. Astrophysik und Hochenergiephysik fussen auf der Quantenphysik genau so wie die Halbleiterphysik und die sogenannte Digitalisierung.

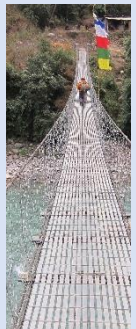
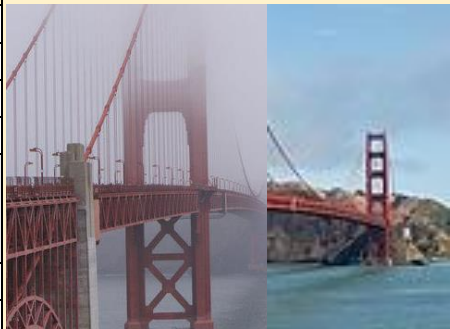


Wichtiger als die Anwendungsmöglichkeiten der Quantenphysik (Revolution der Beleuchtungstechnik, Handy ...) sind ihre allgemeinbildenden Konsequenzen. Der Bildungsforscher H. E. Tenort findet 2019: «Die ‚Sprache der Naturwissenschaften‘ gehört zu den Kompetenzen, die in allgemeiner Bildung für alle Lernenden unentbehrlich sind, durch keine andere Sprache zu ersetzen.» Speziell ist die Sprache der Quantenphysik unerlässlich für das Verständnis des Mikrokosmos. Das Eindringen in die Quantenphysik ist eine zweite Kopernikanische Wende. Die Lernenden stossen in eine Welt vor, die der Anschauung paradox erscheint, weil in unserer Anschauung Teilchen- und Wellennatur sich ausschliessen. Die Lernenden werden mit der Tatsache konfrontiert, dass im Innersten der Natur der Zufall wirkt. Das hat schon Einstein erschüttert!



Nobelpreisträger S. Haroche meint 2006 im Buch 'Exploring the Quantum': «In order to access this description [of Nature], one must abandon inadequate images and immerse oneself in the mathematical framework, which is elegant and simple.»

- Die **Konzeptwechsel**, die Haroche fordert [must abandon ... and immerse ...], benötigen präzise Sprache und Zeit, sich mit ihnen auseinanderzusetzen.
- Die erwähnte Mathematik ist zwar elegant, aber im gymnasialen Grundlagenfach leider nur bedingt zugänglich. Beschränkungen und Umgehung sind zwangsläufig. Haroche's Warnung für das **Lehren von Quantenphysik** gilt: «This concept is difficult to comprehend and explaining it to the layman does not go without danger.»

Lernende / Physik	Licht		Materie	
archaische Vorstellungen	Licht verdrängt Dunkel.		Dinge sind irgendwo & brauchen Platz.	
Vorstellung ende Primarschule	Licht und Schatten / Spiegelung ...		Materie ist körnig.	
Vorstellungen ende Sekundarstufe I	Licht ist ähnlich wie Energie.		Atome sind Mini-Sonnensysteme.	
Wissen/Konzepte vor FACETTEN	Elemente der Strahlen-/Wellenoptik		klassische Punktmechanik	
Die FACETTEN schlagen Brücken über die Kluft zwischen den Lernenden und der Fachwissenschaft.			Max Born an Albert Einstein 1923: <i>Die Quanten sind eine Schweinerei.</i>	
semiklassische Quantenphysik	frühe Quantenphysik des Lichts	frühe Quantenphysik der Materie	Modul 2 Materie	
spezielle Theorie	cavity QED	nichtrelativistische Quantenmechanik		
Art der Theorie	Quanten-Elektrodynamik	relativistische Theorien		
Quantenobjekte im Standardmodell	Klebstoffe = Bosonen	Baustoffe = Fermionen		

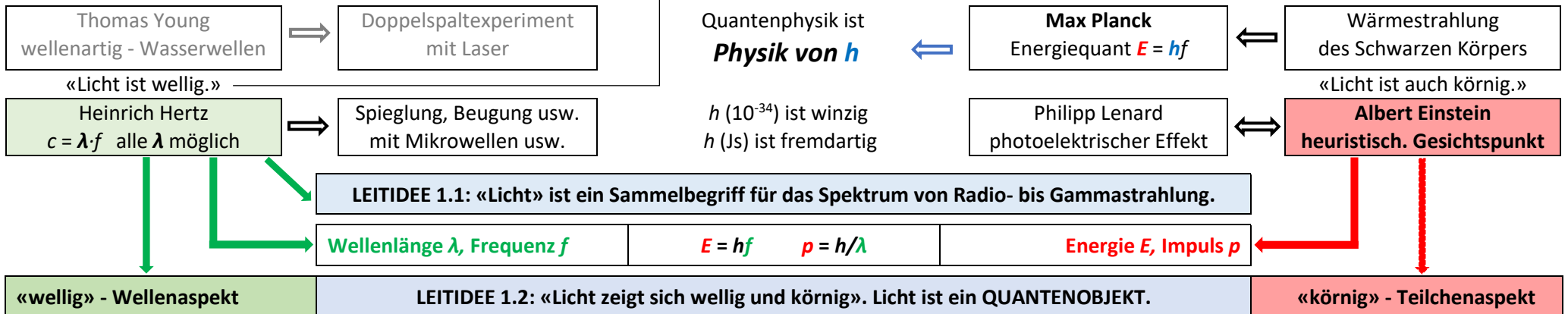
Modul 1
Licht

Modul 3
Materie

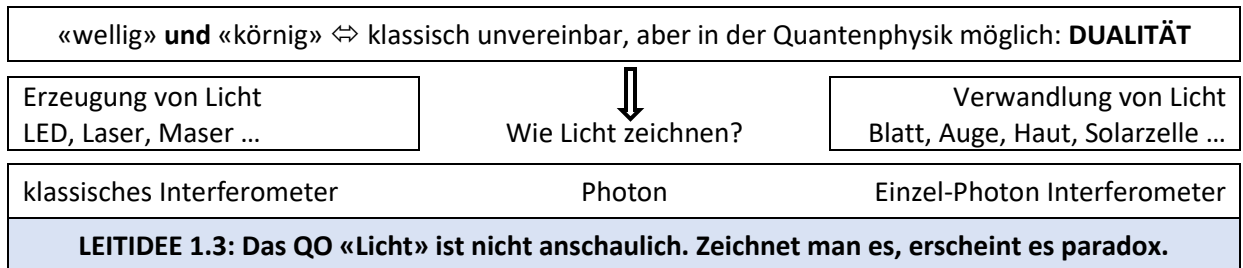
ÜBERBLICK ÜBER DIE LERNUMGEBUNG 'FACETTEN DER QUANTENPHYSIK'

	MINIMUM IM GLF	REALISTISCH IM GRUNDLAGENFACH	IDEAL IM GRUNDLAGENFACH, WENN SCHWERPUNKT «QUANTENPHYSIK»	ZUSÄTZLICH FÜR ERGÄNZUNGSFACH
Wann?	Grundl.fach 10./11. Schuljahr	Grundl.fach 11./12. Schuljahr	Grundl.fach 12. Schuljahr	Ergänzungsfach 12. Schuljahr
Zeitbedarf	8 Lektionen Modul 1	8-10 Lektionen Modul 2	8 Lektionen Modul 3	ca. 24 Lektionen Modul 4
ROTER FADEN	WAS IST LICHT?	WO IST DAS ELEKTRON?	SCHLEIER ÜBER DER QUANTENWELT	QUANTENMECHANIK LIGHT
Leitideen	<i>«wellig & körnig» Licht unanschaulich</i>	<i>Planetenmodell falsch QO «überall und nirgends»</i>	<i>QO sind unbestimmt QO sind nicht-lokal</i>	<i>Erfolg rechtfertigt Schrödinger-Gl. Mikro-Makrokosmos fließend QO ununterscheidbar</i>
Stichworte	Spektrum der e-m Strahlung Dualität beim Licht Quantenobjekt «Licht»	Dualität beim Elektron Quantenobjekt «Materie» Atome sind flauschig	Brücke zu Chemie Zufall ⇔ Schwankung Schröd. Katze ⇔ Dekohärenz	Pot.topf & Schröd.-Gleichung harm. Oszillator, Operatoren ...
Aufgaben & Experimente	AKTIVITÄTEN 1 Fotoeffekt ...	AKTIVITÄTEN 2 Elektronenbeugung ...	AKTIVITÄTEN 3 radioaktiver Zerfall ...	
Nachdenken über ...	PHYSIK & TECHNIK inkl. 1 Lektion	THEORIE & EXPERIMENT inkl. 1 Lektion	PHYSIK & ANDERE WISSENS. inkl. 1 Lektion	
Bewertung	z. B. Lerntagebuch	z. B. Klausur	z. B. Referat	
PANORAMA & Biographien	1900 – PLANCK, EINSTEIN ... +2 Lektionen	1925 – BOHR, DE BROGLIE ... +2 Lektionen	1950 – HEISENBERG, PAULI.. +2 Lektionen	BINNEN-DIFFERENZIERUNG
MINT-VERTIEFUNG	QUANTENOPTIK LIGHT +ca. 6 Lektionen	QUANTENSTATISTIK LIGHT + ca. 6 Lektionen	ANWENDUNGEN DER QP + ca. 6 Lektionen	BINNEN-DIFFERENZIERUNG

MODUL 1	Lernweg zu einem quantenphysikalischen Verständnis von Licht	Info für die Lehrperson
WAS IST LICHT? 6-8 Lektionen im 10. oder 11. Schuljahr	EINSTELLUNG ZUM THEMA: positiv; Licht macht hell, Licht ist warm ... VORSTELLUNGEN (Ende Sek I): Licht ist immer sichtbar (IR, UV ...). Licht ist eher wellig , vielleicht körnig , sicher etwas Feines. VORKENNTNISSE (beim Start): Licht breitet sich nach den Gesetzen der Strahlenoptik aus und hat eine Wellenlänge.	



Licht **zeigt sowohl** Teilchen**aspekt als auch** Wellen**aspekt** – je nach Experiment.



«LICHT
ist
zeigt sich
sowohl wellig
als auch körnig.»

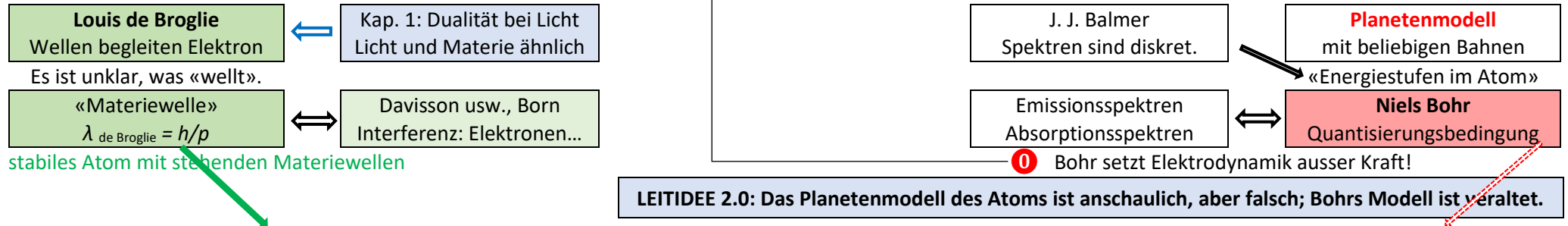
PRAGMATISCHE EBENE	=>	Erheben in Klausur
Begriffe		Formeln, Kompetenzen
elektromagnetisches Spektrum = «Licht»	$c = \lambda f$	
photoelektrischer Effekt, Lichtquant	$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Js	
Dualität	$E = hf$	
Quantenobjekt	$p = h/\lambda$	
Quantenobjekte zeigen Aspekt	1 eV = $1.60 \cdot 10^{-19}$ J	
Interferometer	Licht abstrakt zeichnen	
Photon	Achtung beim Begriff «Modell»	

ONTOLOGISCHE EBENE	=>	Erheben in Tests oder Interviews
Angestrebte Konzepte	⇔	Änderung der tiefen Konzept-Struktur
1.1.	«Licht» ist ein Sammelbegriff, der alle e.Imagn. Strahlung umfasst.	
1.2a)	Bei Erzeugung und Verwandlung zeigt sich Licht «körnig», bei der Ausbreitung «wellig». «Sowohl-als-auch» ⇔ Licht zeigt Dualität.	
1.2b)	Licht ist anders. Die klassisch unvereinbaren Konzepte «Welle» und «Teilchen» sind beim Licht vereinbar . Licht ist ein Quantenobjekt .	
1.3a)	Quantenobjekte «sind» nicht, sondern «zeigen Aspekte» .	
1.3b)	Quantenobjekte können nicht veranschaulicht werden.	

MODUL 2	Lernweg zu einem quantenphysikal. Verständnis von Atom und Elektron	Info für die Lehrperson
WO IST DAS ELEKTRON? 8-10 Lektionen im 11. oder 12. Schuljahr	EINSTELLUNG ZUM THEMA: neutral bis negativ; Materie ist voluminös, schwer und träge ... VORSTELLUNGEN (Ende Sek I): Materie ist in planetenartigen Atomen strukturiert. Das Elektron ist ein kleines Korn. VORKENNTNISSE (beim Start): Newtons Mechanik gilt für Massenpunkte. Coulombkraft. Gesetze der Chemie gelten für Atome.	

FORTSETZUNG: Wellenaspekt des Elektrons

START: Präzisierung des Atommodells



Wellenaspekt des Elektrons	LEITIDEE 2.1: Elektronen, Neutronen usw. zeigen sich körnig und wellig, sind also Quantenobjekte.	Teilchenaspekt des Elektrons
-----------------------------------	--	-------------------------------------

①	Wellenlänge λ_{dB} $f_{dB} = ?$ $c_{dB} = ?$	$\lambda_{de Broglie} = h/mv = h/p$	Masse m, Ladung q, Impuls p	H-Atom ohne Rotation
Experimentelle Überprüfungen des Wellenaspekts bei (1) freien Quantenobjekten am Doppelspalt und (2) beim Tunneleffekt.				(3) Dualität gibt stabiles H-Atom gemäss Modell «Gasplanet».
LEITIDEE 2.2: Elektronen sind nicht an einem Ort x, sondern in einem Zustand ψ.				
②	Erwin Schrödinger präzisiert de Broglies Idee und findet Gleichung für abstrakte ψ -Wellen. H-Atom-Energienstufen ergeben sich aus den stehenden ψ -Wellen, den Zustandsfunktionen .			s, p, d ... Formen vom H-Atom Orbitalmodell der Chemie

LEITIDEE 2.3: Das Elektron ist überall (mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit) und nirgends (mit Sicherheit). – Atome sind flauschig.

③ **Max Borns Regel: $w(x) = \psi^2$** verknüpft Welliges mit Körnigem durch Wahrscheinlichkeit. Keine Kausalität in der Quantenwelt! Das missfiel Einstein und Schrödinger.

PRAGMATISCHE EBENE	Begriffe, Formeln, Kompetenzen
kreisende Elektronen strahlen	Atome sind etwa 10^{-10} m klein
Dualität bei der Materie	$\lambda_{de Broglie} = h/mv$
Quantenobjekt mit Ruhemasse	$\lambda_{de Broglie} = h/p$
Elektronenbeugung am Doppelspalt.	Tunneleffekt, RTM
Elektronen sind überall und nirgends.	ψ -Funktion
Elektronen sind nicht an einem Ort, sondern in einem Zustand ψ .	
stehende Wellen im Atom	ψ_1 mit E_1
Wahrscheinlichkeitsdichte	$w(x) = \psi^2$
Antreffwahrscheinlichkeit	$\Delta p(x) = w(x) \cdot \Delta x$

ONTOLOGISCHE EBENE	Kritisierte / angestrebte Konzepte
2.0a)	Planetenmodell ist teilchenartig, anschaulich, ohne Quantisierung.
2.0b)	Bohrs Modell ist irreführend (Bahn) und teilweise falsch (flach).
2.1a)	Elektronen ... zeigen Wellenaspekt , also Dualität: Quantenobjekte .
2.1b)	Atome sind ohne Umlauf stabil dank der Dualität des Elektrons.
2.2a)	Das Elektron ist nicht an einem Ort x , sondern in einem Zustand ψ .
2.2b)	Stehende ψ-Wellen erklären s-, p-, d-Orbitale der Chemie.
2.3a)	Wahrscheinlichkeitsdeutung verbindet Welliges mit Körnigem .
2.3b)	Wahrscheinlichkeitsdichte gibt Flauschigkeit quantitativ .
2.3c)	$w(x)$ mit Geometrie aufaddiert liefert Wahrscheinlichkeit.

Modul 3	Lernweg zu Anwendungen und zu Interpretationen der QM	Info für die Lehrperson
SCHLEIER ÜBER DER QUANTENWELT 8 Lektionen im 12. Schuljahr	EINSTELLUNG ZUM THEMA: Dualität und ψ sind fremdartig-negativ. Quantenphysik ist abgehoben vom Alltag. VORSTELLUNGEN (beim Start): Physikalisches Geschehen findet in Raum und Zeit, mit Ursache und Wirkung statt. VORKENNTNISSE (beim Start): Lichtquanten und Materiewellen. Zustandsfunktion und flauschige Orbitale; Borns Regel.	

«Quantenland» ist dort, wo die de Broglie-Wellenlänge eine Rolle spielt. In der Quantenphysik beschreibt man das Geschehen mit ψ .

Das «Wellenbild» ist in der Intuition nur schwach verankert: «Ich finde Schrödingers Wellen eher mysteriös.»	Gymnasiasten & Gymnasiastinnen	Das «Teilchenbild» ist in der Intuition tief verankert: «Mir scheinen Elektronen, Neutronen, Atome usw. eher teilchenartig
---	---	---

Heisenberg kritisiert die Begriffe des «Wellenbilds» und der «Teilchenbilds».

4 Unbestimmtheitsrelation von Ort und Impuls: $\Delta x \cdot \Delta p > h/4\pi$ \Leftrightarrow Ort und Impuls gibt es nicht gleichzeitig ganz genau.

Es gibt auch Unbestimmtheitsrelationen für Energie und Zeit, für den Drehimpuls und seine z-Komponente usw.

Die UBR schränken ein, aber sie ermöglichen auch positive Aussagen: Lokalisierungsenergie, Grösse des H-Atoms und des Atomkerns abschätzen.

5 Es gibt (1) den Zufall infolge fehlender Information bei einem komplizierten System (Wetter usw.) und es gibt (2) den **fundamentalen Zufall der Quantenphysik.**

Die **Schwankungen** der Zählrate beim radioaktiven Zerfall weist auf den quantenmechanischen Zufall.

Quantenobjekte sind ununterscheidbar. Quantenobjekte besitzen einen Spin zusätzlich zu Ladung usw.: **halbzahlig \Leftrightarrow Fermionen / ganzzahlig \Leftrightarrow Bosonen**

Elektronen, Protonen usw. sind Fermionen. Sie meiden den gleichen Zustand \Leftrightarrow Pauli-Prinzip \Rightarrow Aufbau des Periodensystems; Grundlage der Elektronenpaarbindung

Photonen usw. sind Bosonen. Sie sind gerne im gleichen Zustand \Leftrightarrow Bose-Einstein-Kondensat \Rightarrow Licht im Laser-Resonator

Seit 1980 können die reinen Gedankenexperimente von 1930 real ausgeführt werden: EPR und Schrödinger-Katze. – Messgeräte sind auch Quantenobjekte...

PRAGMATISCHE EBENE	Begriffe, Formeln, Kompetenzen
Unbestimmtheitsrelationen	$\Delta x \cdot \Delta p > h/4\pi$ $\Delta E \cdot \Delta t > h/4\pi$
Δx = «Standardabweichung von x » = Wurzel aus mittl. quad. Abw.	
Unbestimmtheit ist grundsätzlich und nicht Messungenauigkeit	
Messresultat = Erwartungswert \pm Schwankung	
Lokalisierungsenergie	$E \approx 3h^2/2\pi^2ma^2$
epistemisch = unser Wissen über das Sein betreffend	
ontologisch = direkt das Sein betreffend	
charakteristische Grösse des H-Atoms ($a = \epsilon h^2/\pi m e^2$)	
charakteristische Energie des H-Atoms ($E_1 = -1/8 \cdot m e^4/\epsilon^2 h^2$)	
Pauli-Prinzip für Fermionen / Bose-Einstein-Kondensat mit Bosonen	

ONTOLOGISCHE EBENE	Kritisierte / angestrebte Konzepte
3.1a) Teilchen- und Wellenaspekt resp. -bild sind komplementär. 4	
3.1b) Die Natur ist unbestimmt. Gewisse Eigenschaften können nicht zugleich genau gemessen werden; sie existieren nicht «an sich». 4	
3.2a) Eine Trennung von Messobjekt und -gerät ist nicht möglich. 5	
Man spricht besser von «Experiment» statt von «Messung».	
3.2b) Die Grenze zwischen Mikro- und Makrokosmos ist fließend. 5	
3.3a) Quantenobjekte besitzen keine Individualität. 5	
3.3b) Bosonen sind gerne, Fermionen nie im gleichen Zustand.	
Man kann mit einzelnen Photonen oder Atomen experimentieren.	
Dekohärenz und Nichtlokalität sind experimentell zugänglich.	

WEITERE MATERIALIEN

MODUL 4 Quantenmechanik light

Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

Quantenobjekte im unendlich tiefen Potentialtopf

Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.

Von Atomen, Molekülen und Kristallen

Zu verschränkten Zuständen und zum Quantencomputer

Darf es noch etwas mehr Mathematik sein: komplexe Zahlen in der Quantenmechanik Probleme mit dem Impuls-Operator ...

Nochmals: Teilchen oder Welle?

Wir stoßen - unter anderem - vor bis zur Schrödingergleichung und deren Lösungen beim harmonischen Oszillator:

$$\text{Gleichung: } -\frac{\hbar^2}{8\pi^2m} \cdot \psi''(x) + \frac{1}{2}m\omega^2 \cdot x^2 \cdot \psi(x) = E \cdot \psi(x) \quad \text{und Lösungen dazu: } \psi_1(x) = C_1 \cdot 2x \cdot e^{-\frac{\pi m \omega}{\hbar} x^2}, \quad \psi_2(x) = C_2 \cdot (4x^2 - 2) \cdot e^{-\frac{\pi m \omega}{\hbar} x^2} \dots$$

Elektronenmikroskop, Atomuhr, Spin, Bosonen und Fermionen ...

Quantum-Dot, Erwartungswert, Schwankung ...

Test der Unbestimmtheitsrelation ...

Helium, Elektronenpaar-Bindung, Halbleiter ...

Interferometrie mit Neutronen und mit riesigen Cäsium-Atomen ...

PANORAMA 1900 – 1925 – 1950



(...) **KOMMUNIKATION:** Das Telefonsystem funktioniert innerhalb der Kontinente, die Telegraphie sogar weltweit. Per Schiffsfunk können nun laufend dringende Meldungen übermittelt werden.

MATHEMATIK: Bertrand Russell veröffentlicht 1903 eine Antinomie, die die Grundlagen der Mengenlehre erschüttert. Populärversion: Ein Barbier ist einer, der all diejenigen rasiert, die sich nicht selbst rasieren? Frage: Rasiert der Barbier sich selbst? Antwort: Wenn JA, dann NEIN, aber wenn NEIN, dann JA.

GEOGRAPHIE: Chimborazo und Kilimandscharo werden bestiegen. Amundsen ist einer von vielen, die mit einfachsten Mitteln in die Arktis und Antarktis vorstossen. Afrika wird vollständig kartographiert und unter den Kolonialmächten aufgeteilt. Die letzten Touristen werden in Sänften über Alpenpässe getragen. 1906 wird der Simplon-Tunnel eröffnet und von Beginn weg elektrisch betrieben. Postkutschen gibt es noch 20 Jahre. (...)



BIOGRAPHIEN VON PLANCK BIS BELL



Max Planck stammt aus einer Gelehrtenfamilie und steht nach dem Gymnasium vor der Wahl: Musik oder Physik? Philipp von Jolly kommentiert Plancks Interesse an der Physik mit der Bemerkung, dass «in dieser Wissenschaft schon fast alles erforscht sei, und es gelte, nur noch einige unbedeutende Lücken zu schließen.» Planck studiert in München und Berlin Mathematik und Physik, schliesst mit dem Gymnasiallehrerdiplom ab und doktoriert «Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie». (...)

Werner Heisenbergs Vater ist Professor an der Universität München. Die Gymnasialzeit, in der Werner Karl als vielseitig talentierter und ehrgeiziger Schüler auffällt, wird durch Hilfsdienst unterbrochen. Platon, Musik, Matura und politische Wirren fallen zusammen. (...)

John Bell ist der Prototyp eines modernen Forschers. Er will schon mit 11 Forscher werden und studiert in Belfast Experimental- und theoretische Physik. (...) 1960 wechselt er gemeinsam mit seiner Frau Mary, die ebenfalls Physikerin ist, von nach Genf ans CERN, wo es nicht nur die längsten Tunnels und die grössten Magnete für die leistungsfähigsten Beschleuniger gibt, sondern auch eine grosse Theorieabteilung. Dort publizieren sie auch gemeinsame Arbeiten. (...)



DIE MODULE 1 UND 2 DER 'FACETTEN' IM SCHULALLTAG DES GYMNASIUM:

Schweizerischer Rahmenlehrplan für das Grundlagenfach (Entwurf 2021): Quantenphysik ist eines der Beispiele für «moderne Physik»

Kantonale Lehrpläne: Mehrere Kantone erwähnen Quantenphysik

Stoff: Frühe Quantenphysik des Lichts mit $E = hf$; frühe Quantenphysik der Materie mit $\lambda_{\text{de Broglie}} = h/p$; **Wahrscheinlichkeitsdichte $w(x) = \psi^2$

Klausuren: konventionelle (Kurz-) Klausuren möglich; siehe «pragmatische Ebene» bei den Modulen

Allgemeinbildung: Die Einbettung der QP in einen grösseren Rahmen kann gelernt (und geprüft) werden.

**Hinweis: Im Grundlagenfach gilt anstatt $w = \psi^* \psi$ einfach $w = \psi^2$, denn wir betrachten nur reelle Zustände ψ .

Hilfen für die Lehrenden

Informationen für Lehrerinnen und Lehrer

Zusatzmaterial zur Erarbeitung einiger Voraussetzungen (Wellen, Energie ...)

Überblick über die angestrebten Konzeptwechsel, die im Vergleich von Prä- und Post-Test gemessen wurden (*)

Dualität beim Licht: Bei jeder Form von elektromagnetischer Strahlung sowohl Wellen- als auch Teilchenaspekt erwarten.

Teilchen-Atom: Das Plankens- respektive das Bohrsche Atommodell als rein teilchenartig erkennen und als überholt bewerten.

Dualität bei Materie: Jeder Form von Materie zusätzlich zum Teilchen- auch den Wellenaspekt und die de Broglie-Wellenlänge zuordnen.

Quanten-Atom: Das Atom als flauschig sehen und akzeptieren, dass es ohne Rotation stabil sein kann.

ψ -Atom: Schrödingers Psi-Wellen mit Wahrscheinlichkeitsaussagen, etwa zur Flauschigkeit der Atome, in Verbindung bringen.

Kausalität: Sich der Kausalität als Voraussetzung bewusst werden und erkennen, dass im Mikrokosmos keine Kausalität gilt.

Begriffe: Schärfung des Bewusstseins für die präzise Verwendung von Begriffen wie 'Modell' in unvertrautem Umfeld.

Nature of Science: Sich zum Nachdenken über das Verhältnis von Physik und Technik, respektive Theorie und Experiment anregen lassen.

(*) Mehrere Erprobungen fanden an den Kantonsschulen Wattwil und Frauenfeld und Hofwil und an der Neuen KS Aarau statt.

Die Ziele sind erreichbar, wie die bisherigen Erprobungen zeigen.

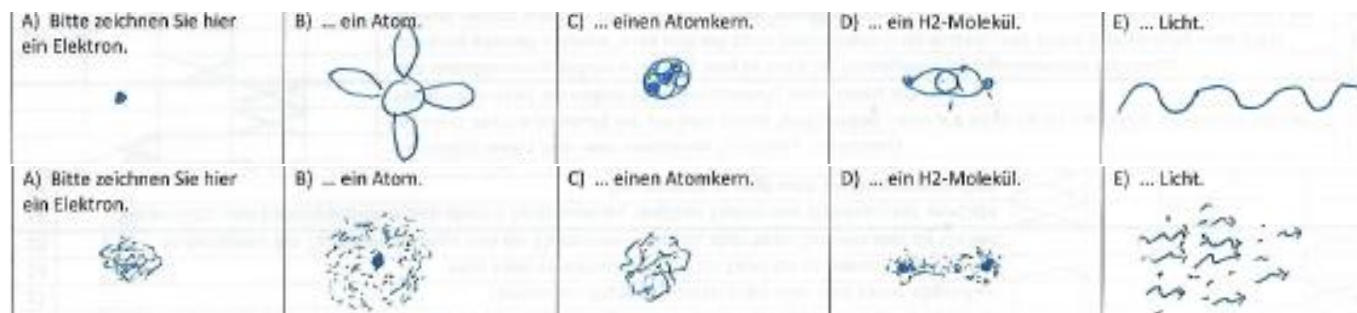
Zeichnungen

des gleichen Schülers

vor und nach dem

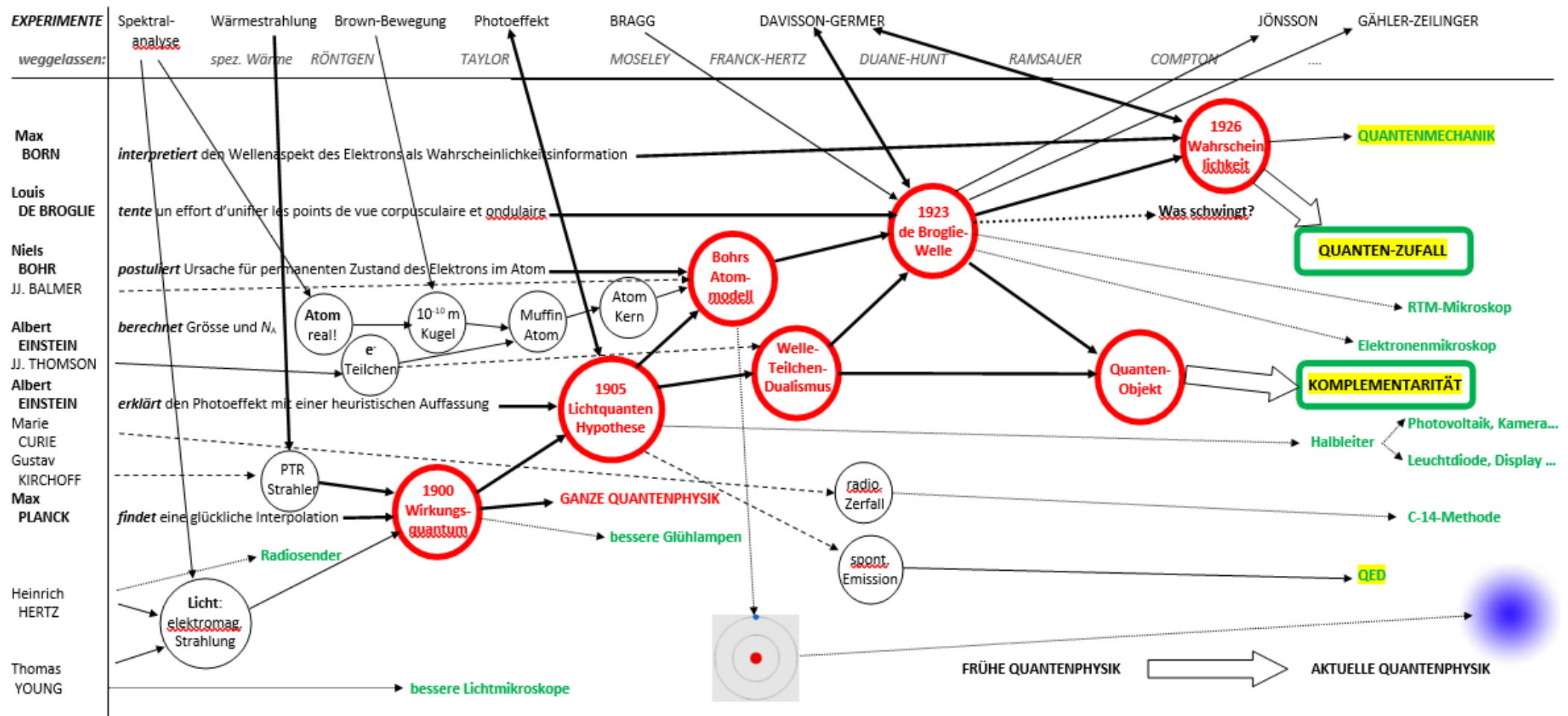
Unterricht:

zum Elektron,
zum Atom,
zum Atomkern,
zum H₂-Molekül und
zum Licht.



Dieses Ergebnis aus dem Test zeigt den Idealfall. Ihn zu erreichen, setzt Unterrichtszeit, Lernbereitschaft und Talent voraus. Der Durchschnitt ist sicher zufriedenstellend.

FACETTEN DER QUANTENPHYSIK: ZYKLUS I = EINSTIEG - Rekonstruktion der didaktisch wichtigen Entwicklungslinien



BENÜTZTE KONZEPTE	Welle	Teilchen	Planck Wirkungsquant.	Lichtquant	Energieniveaus	Dualismus	de Broglie-Welle	Quantenobjekt	Zufall	Schwankung	Orbital
GESETZE	$c = \lambda f$ Licht: $c = 3.0 \cdot 10^8$ m/s	$m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C	Strahlungsgesetz $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Js	$E = hf$	Quantenzahlen Drehimpuls...		$\lambda_{dB} = h/mv$	zwei Aspektet		Zerfallsgesetz $N(t) = N_0 2^{-t/T}$	Atome sind flauschig
VERMIEDENE BEGRIFFE	Wellenmodell, -natur		Teilchenmodell, -natur		Photon (bis 1925)	Bahn des Elektrons	Materiewelle, Führungswelle				