



UZH - Weiterbildung für Lehrpersonen an Maturitätsschulen

## Elemente der Quantenphysik an Maturitätsschulen

Unterrichtsvorschläge und ein Seitenblick auf die Klimaphysik

# «Moderne Physik» im Grundlagenfach – *Kann man Quantenphysik im Gymnasium verstehen?*



Hans Peter Dreyer



# Das – meist nicht bewusste – klassische Weltbild

Z. B. wurde 2024 am Eingang der st. galler Jost Bürgi-Ausstellung behauptet:



Ohne die Formen  
Raum, Zeit und Kausalität  
gibt es kein Denken.

(Immanuel **Kant**, 1781  
Kritik der reinen Vernunft)

Philosophisch zugespitzte Form von **verbreiteten Alltagsvorstellungen**:

- Der leere Raum ist einfach da. (Er ist angefüllt mit unabhängig existierenden Dingen.)
- Die Zeit läuft ab. (Dinge, die sich verändern, zeigen den Zeitlauf.)
- Alles, was geschieht, hat eine (vorangegangene) Ursache.

# Gegenposition der «modernen Physik»

Seit etwa 1900 bestreitet die Physik  
- unter Bezug auf Experimente -  
das klassische Weltbild mit den Grundannahmen von Kant.

**$c < \infty$  und Relativitätsprinzip  $\Leftrightarrow$  Relativitätstheorie**

Es gibt keine absolute Gleichzeitigkeit.

Raum und Zeit verschmelzen.

Die Massenverteilung prägt den Raum.

**$h > 0$   $\Leftrightarrow$  Quantenphysik**

Das «Ding an sich» existiert nicht.

Quantenobjekte sind nicht an einem Ort lokalisiert, sondern mit der Umgebung verschränkt.

Im Mikrokosmos gibt es spontane Prozesse ohne Kausalität.

# Pädagogischer Grundsatzentscheid



Gymnasiale Physik ohne Quanten,  
wäre wie Geschichtsunterricht, der um 1900 endet.  
Die Gegenposition der Physik zu Kants klassischer Weltsicht  
muss im Gymnasium thematisiert werden.



Im Grundlagenfach nicht Quantencomputer, sondern Bildung:  
Erweiterung der Weltsicht in Richtung Mikrokosmos,  
mehr Verständnis für das Wesen von Wissenschaft (NoS).



# «Moderne Physik» im Gymnasium

Abraham Pais schreibt in der Einsteinbiografie (Subtle is the Lord, S. 141)

## zur Relativitätstheorie:

*Es scheint mir, diese Kinematik [wie sie Einstein 1905 publiziert], ...  
könnte und sollte in der Sekundarstufe unterrichtet werden  
als das **einfachste** Beispiel dafür,  
wie **die Wege der modernen Physik die Alltagsvorstellungen überschreiten.***

Und unmittelbar anschliessend (auch im Original in Klammern und mit ...)

## zur Quantentheorie:

*(Wenn ich nur eine ähnliche Empfehlung für den Fall  
der Quantentheorie machen könnte ...)*



(Prince)  
**Louis de Broglie**

verteidigte am 25. 11. 1924 seine Dissertation.

Leitidee:

«Was für Licht recht ist, ist für Masse billig.»

*Il faut unifier les points de vue  
corpusculaire et ondulatoire.*

*A toute particule matérielle [...] doit être associée une onde réelle.*

Diese Aussagen (reell) sind **heute noch gültig** und für Gymnasiatinnen und Gymnasiasten **beim Lernen und Verstehen hilfreich.**

# Was heisst «verstehen» im Gymnasium?

## Eine Antwort eines Fachwissenschaftlers:

Richard Feynman, 1947: ***What do I mean by understanding?***  
*Nothing deep or accurate —*  
*just to be able to see some of the **qualitative consequences** of the equations*  
*by some method other than solving them in detail.*

## Eine Antwort aus der Sicht von Physikdidaktikern:

Hoehn & Finkelstein, 2018, Uni Boulder:  
*We argue that the [unvermeidlicherweise verbleibende] **messiness of student reasoning***  
*should be valued*  
[als Ansatz für weitere Arbeit an Konzeptwechseln].

# Was heisst «Quantenphysik» im Gymnasium?

... eine Auswahl, welche die **hochschulabschlussfähigen Wesenszüge** zeigt:

**Rainer Müller, 2007: *Wesenszüge der Quantenphysik***

- 1: Statistisches Verhalten
- 2: Fähigkeit zur Interferenz
- 3: Eindeutige Messergebnisse
- 4: Komplementarität

Das mag im Schwerpunkt Mathematik-Physik sinnvoll sein. Im Grundlagenfach jedoch scheint sinnvoller...

... eine Auswahl, welche **das klassische Weltbild nachhaltig erschüttert:**

***Von der Welle-Teilchen-Dualität in Richtung Verschränkung!***

Arnold Sommerfeld, 1930: ... unter allen erstaunlichen Entdeckungen unseres Jahrhunderts ist sie [Welle-Teilchen-Dualität] **die erstaunlichste**.

Claus Kiefer, 2015: *Die Verschränkung ist **der** grundlegende Zug der [Quanten-]Theorie.*



## Intro

In this Viten programme you will learn quantum physics through the use of films, animations and glimpses into the history of physics. You will practice thinking and making arguments like physicists and discuss questions to which physics does not have clear, unambiguous answers.

Open intro

2 min



## 1 – Need for a new physics

Around year 1900, physicists began to study atoms and even smaller particles like the electron. But what they observed in experiments could no longer be described using the established physics that is today known as classical physics. A new and different physics was developed – quantum physics.

Open module

2 hours

... eine /

müssen!

RELEQUANT - Norwegen

<https://www.viten.no/filarkiv/quantum-physics/>



Interessen im Gynasium: 2012

N(12./13.Sj.)  $\approx$  2000

9./10. Sj. Physik: männl. = 3.3 / weibl. Nicht

11./12. Sj.: Physik = 2.9 / Biologie = 3.8 => 12./13. Sj.: Physik = 2.7

10 % der Unterrichtszeit = 20 Lektionen  
auf Kosten von Routine in Mechanik, Elektrizität ...

Wir sollten so unterrichten,  
dass viele von ihnen am Schluss des Gymnasiums ein positiveres Bild von der Physik weitertragen.  
Die vorliegenden Materialien können das Problem nicht lösen, möchten aber einen Beitrag leisten.  
Und dafür braucht es Zeit!

# Rechtfertigung für Quantenphysik im Rahmenlehrplan

## RLP Physik – 1 Allgemeine Bildungsziele

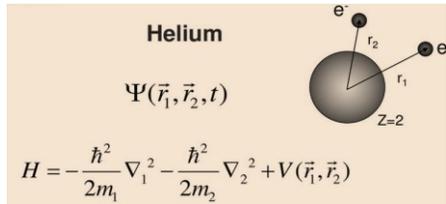
Im Grundlagenfach Physik stehen anfangs alltägliche physikalische Erfahrungen und deren Erklärungen im Vordergrund. Anschliessend werden auch jene Naturerscheinungen in sehr kleinen und sehr grossen Dimensionen zum Thema gemacht, welche unser Weltbild wesentlich prägen. Durch den historischen Blick auf ausgewählte Experimente und Entdeckungen wird die Einsicht ermöglicht, dass Wissen sich entwickelt. Der Unterricht in Naturwissenschaften ermöglicht es, die Möglichkeiten und Grenzen der wissenschaftlichen Methoden zu verstehen. Mit interdisziplinären Bezügen wird ein umfassendes Verständnis der Realität gefördert.

## RLP Physik – 4 Lerngebiete und fachliche Kompetenzen

6. Raum, Zeit, Quanten	Die Maturandinnen und Maturanden können
6.1 Licht als Teilchen	- an Beispielen den Teilchencharakter des Lichts erklären.
6.2 Ausgewählter Aspekt moderner Physik	- an einem ausgewählten Beispiel den Übergang von klassischer zu moderner Physik und den damit verbundenen Paradigmenwechsel skizzieren (WP).

# Entwicklung der Materialien mit der Methodik der Didaktischen Rekonstruktion

Rekonstruktion so, dass **Konzepte der Fachwissenschaft** und **Vorstellungen der Lernenden** gleiches Gewicht erhalten. (Kattmann et al. 1997)



**Fachwissenschaft** im Prinzip bekannt.

Was auswählen, was weglassen?

Nur einige FACETTEN bleiben!



**Lernende** mehrheitlich weiblich.

Alle lernen auch Biologie und Chemie.

MINT-Beziehungen knüpfen!

**Physikdidaktik:** *Das 'Bohrsche' Atommodell ist die eindeutig dominierende Schülervorstellung (Müller & Schecker, 2018).*

1 unstrukturiert	2 Planeten-Atom	3 Orbital mit Grenze	4 Orbital - wolkig	5 abstraktes Objekt

**Physikdidaktik:** *Students showed **less difficulty** assigning both wave and particle behaviour **to light than to electrons**.*  
(Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017).

## Modul 1 = Minimum

Semiklassische Quantenphysik des Lichts  
6-8 Lekt. / 10.-11. Sj.

## Modul 2 = Normal

Einstieg in die Quantenmechanik  
8-10 Lekt. / 11.-12. Sj.

## Modul 3 = Ideal

12. Sj.  
Vertiefung QM

Entwicklung & Erprobung:  $N \approx 500$  Lernende, 10 Lehrpersonen in 4 Kantonen

nicht erprobt

# Wo stehen wir?



## Einführung

Wieso und wie Quantenphysik?

Inhaltsübersicht

Beurteilung des Materials

Modul 1

Was ist Licht?

Modul 2

Wo ist das Elektron?

Verknüpfung

Klima & Quanten

Ergänzung

Quantenphysik im Schulalltag: Aufgaben, Experimente ...

Ausblick

Mehr Quanten

# Überblick über die Materialien zur Quantenphysik

UZH-Physik (neu) ⇔ **ELEMENTE ...**

UZH-Fach-Didaktik (älter) ⇔ **FACETTEN ...**

## Modul 1 = **Minimum**

Semiklassische Quantenphysik des Lichts  
6-8 Lekt. / 10.-11. Sj.

## Modul 2 = **Normal**

Einstieg in die Quantenmechanik  
8-10 Lekt. / 11.-12. Sj.

## Modul 3 = **Ideal**

12. Sj.  
Vertiefung QM

**konventioneller Lerntext zum Selbststudium** ⇔ **ROTER FADEN**

Modul 1

Modul 2

Modul 3

**Aufgaben & Experimente** ⇔ **AKTIVITÄTEN**

zu Modul 1

zu Modul 2

zu Modul 3

**NoS-Ergänzungen** ⇔ **PANORAMA**

1900

1925

1950

**MINT-Ergänzungen** ⇔ **MINT Module**

Modul I (Optik)

Modul II (Standardmodell & Technik)

Modul III (Math.)

# «ELEMENTE/FACETTEN DER QUANTENPHYSIK»



Brücken in neue Gebiete

Was ist Licht?  
*Ein Quantenobjekt!*



Semiklass. QP d. Lichts

Licht ist **nicht**  
**anschaulich**:  
ein Quantenobjekt.

W-T-Dualität  
entwickeln



Wo ist das Elektron?  
*Im Zustand  $\psi$ !*



Einstieg in die QM

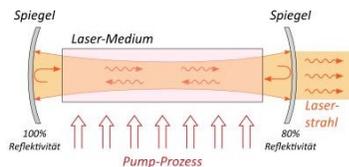
Q.objekte verhalten  
sich **nicht**  
**deterministisch**.

Zustandsbegriff  
entwickeln

$$E = hf$$

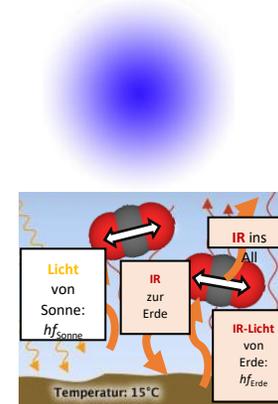


$$p = h/\lambda$$



$$\lambda_{dB} = h/p$$

$$w(x) = \psi(x)^2$$



# Ertrag nebenbei = Konzeptentwicklung in «Nature of Science»

‘Experiment vor Theorie’ (RLP...)

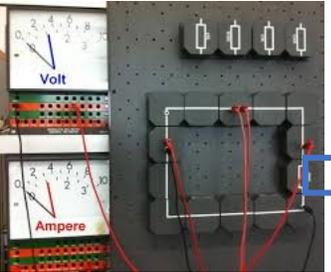


Wechselwirkung Theorie & Experiment

Georg Simon Ohm



Experiment  
&  
Theorie

$$z - \zeta = \frac{\sum (x - \chi)}{\omega (n - m)}$$


Experiment  
zuerst



$$U = RI$$

**Reale Physik**  
ist komplex.  
↔  
Wissenschafts-  
geschichte

**Gymnasialphysik**  
ist vereinfacht,  
↔  
leider zu oft  
**‘fake history’.**

Louis de Broglie



$$p_\nu = E_\nu / c$$

$$= hf_\nu / c$$

$$= h / \lambda_\nu$$

auch für Elektron  
 $p = h / \lambda_{dB}$

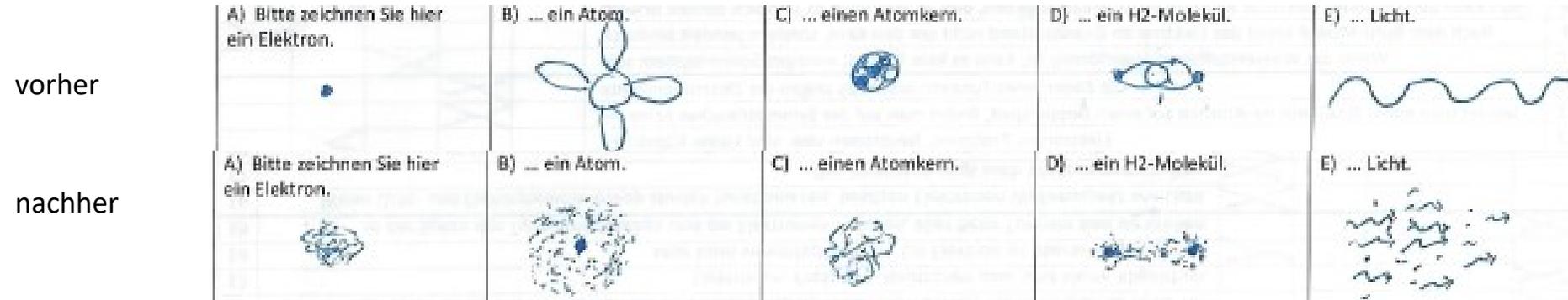
**Idee/Theorie zuerst**





# Was sagt die Empirie zum Lernerfolg?

Erwartet: weltweit verbreitete Vorstellungen – Illusion: Vorstellungen **aller** Lernenden ändern sich.



Erfolg des Unterrichts gemessen mit 4 x 4 Items Prä- und Post-Fragebogen – quantifiziert nach Cohen.

KONSTRUKT	$m_K$	$m_{K'}$	$\Delta m_K$	$d_K$	$\text{sig}_K$	Effektstärke
LICHT	2.79	3.20	0.41	$d_L = 0.39$	1 %	knapp - mittel
ATOM	2.64	3.53	0.89	$d_A = 0.73$	1 %	mittel - stark
(FREIES) ELEKTRON	2.68	2.88	0.20	$d_E = 0.17$	5 %	nicht nachweisbar
ZUFALL	2.43	3.06	0.63	$d_W = 0.54$	1 %	mittel

KONSTRUKT	$Q$	$Q'$	$\Delta Q$	$d_o$	sig	Effektstärke
QUANTEN - TOTAL	10.54	12.66	2.12	0.75	0.1 %	hoch

# Stimmen zu den «Facetten der Quantenphysik» = Zitate aus Lerntagebüchern

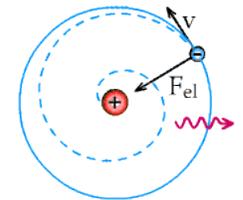
- Ich fand es super, dass die neuen **Begriffe** (...) **erklärt** werden (z. B. Heuristik). Zudem waren die vielen **farbigen Bilder** sehr unterstützend beim Verständnis. (Manuela 11. Sj.)
- Es ist ein interessantes Thema und auch **nützlich geschrieben**, da es sich auf Alltägliches bezieht und man etwas mitnehmen/lernen kann. (Alena 11. Sj.)



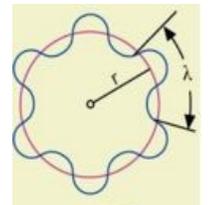
- Wir **hadern mit** dem Wirkungsquantum **h**. Wir können es uns nicht bildlich vorstellen. (Lena, 11. Sj.)



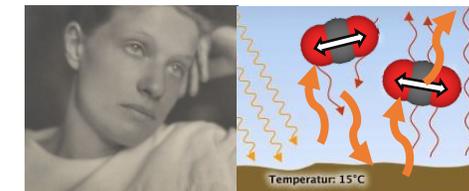
- Mich überraschte, dass das **Bohrsche Atommodell** so viele **Fehler** aufweist, weil ich es bereits in der **Chemie** kennengelernt habe, dort aber nie etwas über diese Mängel erfuhr. (Jack 12. Sj.)



- Ich fand es interessant, dass Louis de Broglie diese Idee **ohne experimentelle Stütze** aufbauen konnte. (Julia 12. Sj.)

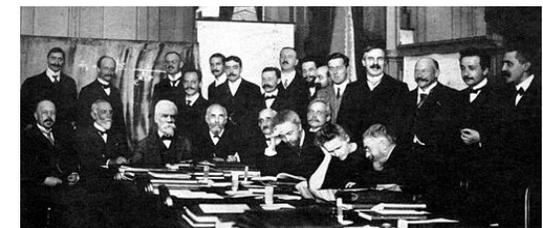


- Ich fand es schön, dass auch die Physikerin **Hertha Sponer** erwähnt wird. (Luise 12. Sj.)



**Kritik:** Ca. 5 % äussern sich ähnlich wie Jenny, 11. Sj.

**Mir persönlich hat es ein wenig zu viel Info-Dump (...) einfach zu viel Geschichte.**





# Meine Behauptung:

Quantenphysik an Maturitätsschulen  
ist wichtig und lehr- und lernbar.

***Ihre Gedanken zur  
Quantenphysik am Gymnasium:  
Erfahrungen, Ideen, Fragen ...***