

Klima und Quanten im gymnasialen Physikunterricht

Hans Peter Dreyer, UNI Zürich & KS Wattwil, hanspeter.dreyer@uzh.ch

1 Prolog: Zwei Ziele und zwei Zielgruppen

Der Entwurf des neuen Rahmenlehrplans (RLP 20) bietet Anlass über Ziele nachzudenken, die im Unterricht angestrebt werden soll(t)en. Der RLP 20 erwähnt Klimapolitik in der Einleitung, Solarenergie und Treibhauseffekt in der Liste der Lerngebiete für das Grundlagenfach. Der Treibhauseffekt lässt sich mit den Strahlungsgesetzen und dem Verhalten von Gasmolekülen verstehen. Beides beruht auf der Quantenphysik. Diese gilt als sperrig und ist im Grundlagenfach bloss als mögliche Ergänzung angeführt. Doch Physik ohne Quanten ist wie Geschichte, die um 1900 stoppt. Die Klimafrage wiederum kann bei den Lernenden die Motivation für eine «zweite Kopernikanische Wende», eine in Richtung Mikrokosmos wecken.

Beim RLP Schwerpunktfach sind explizit sowohl Stefan-Boltzmann als auch die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie aufgelistet. Ein Bogen vom Klima zur Quantenphysik ist für diese Zielgruppe leicht möglich. Allerdings erschwert es den Unterricht, dass vielerorts Lernende aus dem Schwerpunkt gemeinsam mit denjenigen in einer Klasse sind, für die Physik das am wenigsten geliebte Fach ist. – Hier wird über einen Lernweg zu Klima- und Quantenphysik mit Vertiefungsmöglichkeiten für Interessierte nachgedacht.

2 Treibhaus «Erde» ohne Quantenphysik

Als Ausgangspunkt dient das Diagramm mit den zeitlich und räumlich gemittelten Energieflüssen der Erde (Abb. 1). Es zeigt die Komplexität der Frage und die Notwendigkeit von fachübergreifender Zusammenarbeit. Die Physik trägt durch die Strukturierung und die grundlegenden Naturgesetze bei. Eine Lernschwierigkeit verursacht die Ausdehnung der Atmosphäre. Zur Vereinfachung kann man sie sich als 10 km dicke Schicht denken. Oben grenzt sie an das System «Sonne plus Weltall». Unten grenzt sie an das System «Erdboden». Die 10 km enthalten nur 25 m Wasserdampf und nur 4 m CO₂ (0.25%; 400 ppm), der Rest ist N₂ und O₂. Sie wird einerseits von kurzwelligem Sonnenlicht und andererseits von unsichtbarem langwelligem Licht durchflossen, das seinen Ursprung auf der Erde hat.

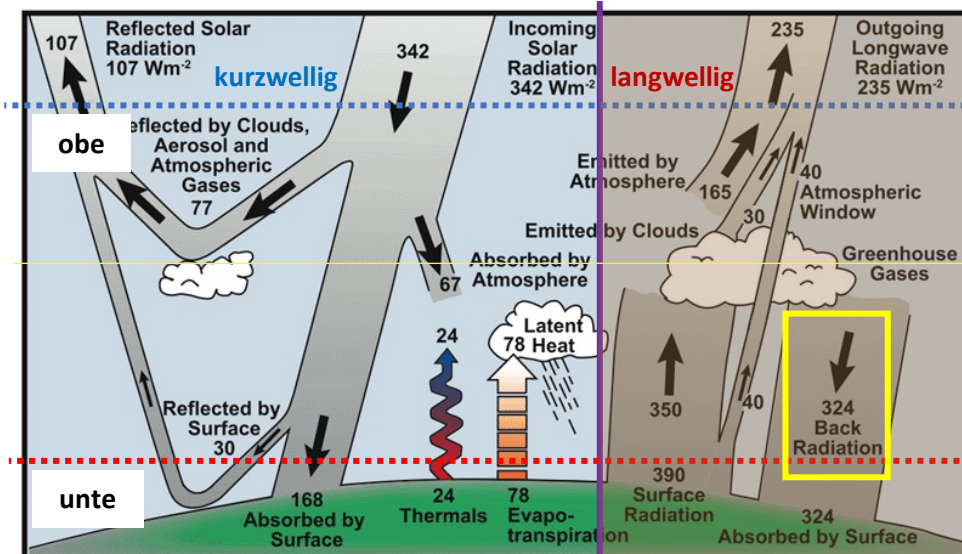


Abb. 1: Energieflüsse der Atmosphäre. Ergänzt, nach Kehl und Trenberth 1997.

Die Hauptaufgaben sind, die zentrale Rolle des Energietransports durch elektromagnetische Strahlung und den Unterschied zwischen dem Sonnenlicht (im linken Teil von Abb. 1) und dem infraroten Strahlungsmix (rechter Teil) zu lehren und zu lernen. Um im stationären Gleichgewicht zu bleiben, muss die Erde 342 W/m^2 als Strahlungsmix an der oberen Grenze der Atmosphäre wieder ans Weltall abgeben können. Die Rollen, die das IR und die Treibhausgase dabei spielen, hat der Schwede Svante Arrhenius schon 1897 erkannt. Arrhenius hatte sich dank eines grosszügigen Stipendiums in Mitteleuropa weiterbildern dürfen, unter anderem 1887 bei Ludwig Boltzmann in Graz. Dieser hatte gerade das von Joseph Stefan 1879 in Wien auf empirischer Basis gefundene Strahlungsgesetz thermodynamisch begründet.

Heute kann man das Gesetz von Stefan im Gymnasium durch den Bezug auf die modernen IR-Heizwände mit der Erfahrungswelt in Verbindung bringen und die Grössenordnung der Konstanten empirisch überprüfen. Alle (schwarzen) Körper mit der Temperatur T geben nach Stefan & Boltzmann ein Gemisch von elektromagnetischer Strahlung mit der totalen Leistungsdichte J ab:

$$J = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{A})$$

Ohne Atmosphäre, mit $J = 342 \text{ W/m}^2$ und $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, wäre die Erdoberflächentemperatur 279 K . Mit Atmosphäre, für $J' = 390 \text{ W/m}^2$ IR-Abstrahlung, muss die Erdoberflächentemperatur $T' = 288 \text{ K}$ betragen. Gemäss diesen Zahlen sind die Erde und ihre Atmosphäre im Energiegleichgewicht. Doch die Energieflüsse und ihre Veränderungen sind nicht genau bekannt (Trenberth et al., 2009). Wie gross das Ungleichgewicht ist, und ob das IPCC die richtigen Schlüsse daraus zieht, ist deshalb politisch umstritten. Man findet selbst:

Erhöht das anthropogene CO_2 die IR-Abstrahlung um 1%, so steigt die Erdoberflächentemperatur um $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Beim Haarföhn kann man sehen und fühlen, wie der Heizdraht seine Farbe mit zunehmender Temperatur ändert. 1893 konnte Willy Wien ein weiteres Strahlungsgesetz aus der Thermodynamik begründen, das vorher nur empirisch bekannt war. Das Wiensche Verschiebungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Temperatur des strahlenden Körpers und seinem Strahlungsmaximum:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.9 \text{ mm} \cdot \text{K} \quad (\text{B})$$

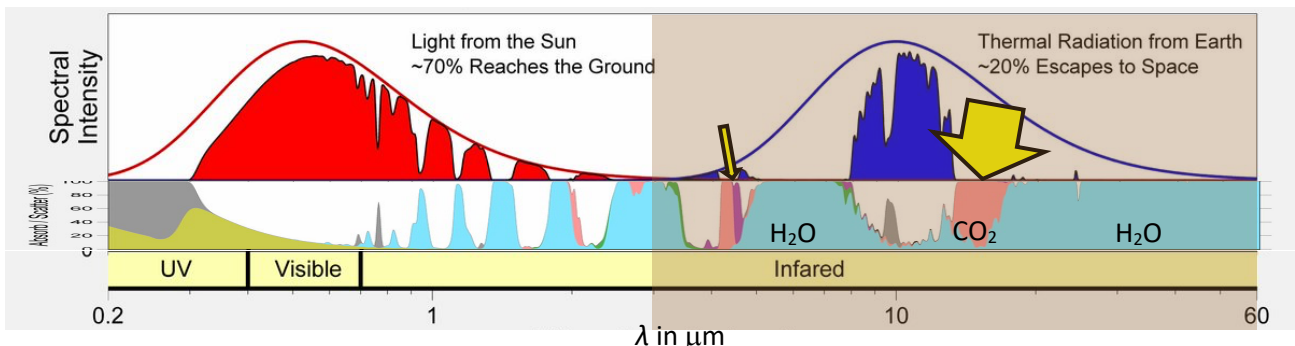


Abb. 2: Die Absorption von H_2O , CO_2 usw. im sichtbaren und im IR-Bereich, nach R. A. Rohde 2019.

Mit $T = 279 \text{ K}$ und auch mit $T' = 288 \text{ K}$ erhält man ziemlich genau $\lambda_{max} = 10 \text{ } \mu\text{m}$, also Infrarotstrahlung, Strahlung, deren Abfluss durch die Atmosphäre behindert wird, wie Abbildung 2 zeigt.

Als er die epochale Arbeit «On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature on the Ground» publizierte, kannte Arrhenius also die Strahlungsgesetze A und B. Sie lassen sich beide aus Plancks Strahlungsgesetz (C) durch Integration über alle Wellenlängen sowie der Bestimmung des Maximums der mathematisch komplizierten Funktion herleiten. Anspruchsvolle Aufgaben fürs letzte Jahr im Schwerpunkt!

Die Quantenphysik beginnt mit Plancks Strahlungsgesetz von 1900:

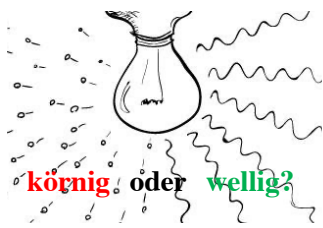
$$E_S(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (\text{C})$$

Ironie der Geschichte ist, dass 1901 in den «Annalen der Physik», die Plancks Entdeckung verbreiteten, auch der Artikel erschien «Über die Bedeutung des Wasserdampfs und der Kohlensäure bei der Absorption in der Erdatmosphäre». Auf Grund eines Messfehlers machte sich Knuth Angström darin zum Vorläufer der

modernen Klimaleugner. Es wäre allerdings unfair, ihm daraus den Strick zu drehen, denn das Ausmessen von IR-Strahlung begann erst 1880, nachdem der Amerikaner Samuel Langley das Bolometer erfunden hatte.

Schon vor fünfzig Jahren hat der Klimapionier Hans Oeschger an der Uni Bern einen Fortbildungskurs für Gymnasiallehrer angeboten. Klimafragen wurden bestimmt in manchen Physikzimmern bereits vor dem RLP 20 angegangen. Wenn man die Strahlungsgesetze und das Absorptionsverhalten der Atmosphäre phänomenologisch akzeptiert, kann man Klimaphysik auch ohne Quanten betreiben. Doch damit verpasst man die Chance, das Geschehen in der Atmosphäre auf «natürliche» Weise mit der Quantenphysik zu verbinden.

3 Quantenphysik des Lichts – Erzeugung und Verwandlung in der Atmosphäre



Allerdings ist Plancks Strahlungsgesetz, Wiege der Quantenphysik und Ausgangspunkt für Einsteins Arbeit von 1905, ein gordischer Knoten. Heute wird es mit der Quantenstatistik für Bosonen abgeleitet. Den historischen Umgang Plancks mit der damaligen Thermodynamik beurteilt Pais (1986, S. 375) als *unorthodoxe Behandlung des Boltzmannschen Prinzips*. Da weder klassische noch Quantenstatistik im Gymnasium möglich sind, kann man diesen harten Knoten höchstens mit einer qualitativen Schilderung durchschneiden.

Auch Lichtquanten, Thema der Quantenelektrodynamik (QED), scheinen ausserhalb der Reichweite des Gymnasiums zu liegen. Doch die Frühe Quantenphysik des Lichts genügt für viele Phänomene und ermöglicht bereits einen Start im 10. Schuljahr [1]. Optik wird im RLP 20 als Einstiegskapitel empfohlen. Wenn man die «Lehre vom Licht» nicht bloss als «Lehre von der Lichtausbreitung» auffasst, sondern auch die Frage «Was ist Licht?» zulässt, stösst man auf das ganze Spektrum der elektromagnetischen Strahlung und die Lichtquanten, die Albert Einstein 1905 im berühmten Artikel «Über einen die Erzeugung und Verwandlung von Licht betreffenden heuristischen Gesichtspunkt» (er)fund. Er stellte fest, dass *die (...) Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, dass die Energie des Lichts diskontinuierlich im Raum verteilt sei*. Zu diesen Erscheinungsgruppen gehörten neben Plancks Gesetz die Fluoreszenz und der Photoeffekt. Beides konnte man nicht genauer ausmessen, aber verstehen, wenn man annahm, *dass das erregende Licht aus Energiequanten von der Energie hf besteht*. In der Atmosphäre absorbieren und emittieren die Treibhaus-Moleküle einzelne Lichtquanten verlustfrei, also bleibt λ unverändert. Die Atome und Moleküle am Erdboden absorbieren Lichtquanten mit hoher Energie und geben solche mit niedrigerer Energie ab. Das ist im Grundlagenfach interessanter als das Geschehen in einer Vakuum-Photo-Röhre. Nebenbei: Der Photoeffekt hat die Fachleute damals nicht überzeugt. Die Lichtquanten waren bis zu Comptons Experiment in der Physik umstritten. Planck schrieb noch 1912 in seinem Empfehlungsschreiben zur Wahl Einsteins an die Top-Position in Berlin, dieser habe mit der Idee der Lichtquanten *über das Ziel hinausgeschossen*.



Heute sind die Lernenden sofort geneigt, das Licht ausschliesslich als Teilchenstrom zu sehen und den in der Schule angelernten, im Alltag schlecht fassbaren, nicht-lokalen Wellenaspekt des Lichts zu komplett zu verdrängen. Das Doppelwesen der Quantenobjekte, die Dualität, macht *die* Lernschwierigkeit der Quantenphysik aus. Einstein sah schon früh klar. Er hatte die Dualität des Lichts 1909 mathematisch aus der Energiedichteschwankung in Plancks Strahlung herausgeschält. Einstein (zweiter von rechts) hielt daher 1911 an der Solvay-Konferenz im Schlussvotum fest: *Ich bestehe auf dem provisorischen Charakter dieses Konzepts [der anscheinend teilchenartigen Lichtquanten], das mit den experimentell nachgewiesenen Konsequenzen der Wellentheorie nicht verträglich ist*.

Im Gymnasium muss man die Dualität aus den Gleichungen $E = hf$ (D) und $p = h/\lambda_{\text{de Broglie}}$ (E) lesen: Links steht der **Teilchen**-, rechts der **Wellen**aspekt der Quantenobjekte «Licht» und «Elektron».

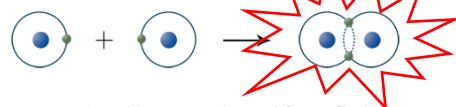
Das Provisorium beim Verständnis des Wesens des Lichts endete erst um 1950 mit der QED. Doch schon viel

früher gab es eine Klärung bei der Materie: Louis de Broglie übertrug in genialer Weise die Dualität vom Licht auf das Elektron. (Der ältere Bruder Victor hatte 1911 die Protokolle geschrieben, die Louis bei Studium anregten.) Nach der Lektüre von de Broglies Dissertation schrieb Einstein 1924 seinem Kollegen H. A. Lorentz: *Der junge de Broglie hat einen sehr interessanten Versuch zur Deutung der Bohr-Sommerfeldschen Quantenregel unternommen. (...) Ich habe einiges gefunden, was für seine Konstruktion spricht.* De Broglie hatte ohne empirische Evidenz etwas «konstruiert», er hatte theoretisch-physikalische Überlegungen angestellt, die auch im Grundlagenfach nachvollziehbar sind [1].

Dass de Broglie damit Bohrs Quantisierungsregel für den Drehimpuls stationärer Bahnen eine neue Grundlage gab, ist eher Thema für das Schwerpunktfach. Dort wird mit dem Drehimpuls gearbeitet. Dort wird wohl auch die Relativitätstheorie so weit entwickelt, dass Comptons Rechnung für die Streuung von Licht an Materie nachvollzogen werden kann. Unter solchen Voraussetzungen ist es auch denkbar, de Broglies relativistische Überlegungen samt Unterscheidung zwischen Phasen- und Gruppengeschwindigkeit nachzuvollziehen.

4 Quantenphysik für Atome und Moleküle, im Himmel und anderswo

Zwischen Louis de Broglies Wellen und der physikalischen Begründung des Absorptionsverhaltens der Atmosphäre liegt die grosse Kluft der ganzen Quantenmechanik. Ich erkenne keinen einfachen Übergang. Das Verhalten von Atomen und Molekülen zu erklären, ist die anspruchsvolle Aufgabe des Chemieunterrichts [2]. Dabei hat er unter anderem das schwierige Problem zu lösen, ohne Quantenphysik zu begründen, weshalb zwei elektrisch neutrale Objekte elektrisch zusammenhalten. Diesen Sachverhalt hatte Wolfgang Pauli in seiner Dissertation auch nicht befriedigend erklären können. Der erst 22-jährige sollte den einfachsten Fall, das H_2^+ -Molekülion, durchrechnen. Konzeptionell musste er vom Bohr-Modell ausgehen. Doch ohne die damals noch nicht bekannte Quantenmechanik und ohne den Spin konnte er nur scheitern. – Eine Folgerung für den heutigen Physikunterricht: Das seit 100 Jahren überholte, falsche Planetenbild vermeiden, damit es die Einführung der Orbitale im Chemieunterricht nicht unnötig erschwert!



Wenn man die Moleküle voraussetzt, könnte man auf die semiklassische Quantenphysik zurückgreifen. Schon 1906 hatte Einstein die Quantisierung von der Strahlung auf die Materie übertragen und geschrieben: *Während man sich bisher die molekularen Bewegungen genau denselben Gesetzmässigkeiten unterworfen dachte, welche für die Bewegungen der Körper unserer Sinnenwelt gelten, sind wir nun genötigt, für schwingungsfähige Ionen bestimmter Frequenz (...) die Annahme zumachen, dass die Mannigfaltigkeit der Zustände, welche sie anzunehmen vermögen, eine geringere sei (...).* Nicht alle Zustände sind möglich, sondern nur solche, deren Energie sich durch $\Delta E = hf$ unterscheiden, wobei f die klassische Frequenz ist. So konnte er die mit der Temperatur abnehmende spezifische Wärme beim Diamanten erklären. Im Solvay-Kongress von 1911 wurden die Lichtquanten kaum erwähnt. Hingegen stand die Übertragung der Quantisierung auf Schwingungen und Rotationsbewegungen im Zentrum.



Die bedeutsame «Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground» kommt von den Streck- und Beugeschwingungen und den Rotationen der CO_2 -Moleküle. Semiklassisch gilt für die Energieniveaus des harmonischen Oszillators ebenfalls $\Delta E = hf$. Die Frequenz ist klassisch-mechanisch $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/\mu}$. Die symmetrische Streckschwingung ist der geometrisch einfachste Fall. Die Energie hilft, die unbekannte Federkonstante k abzuschätzen: Beim Bilden des CO_2 -Moleküls werden 394 kJ/mol frei. Also stecken in den zwei gespannten Federn CO_2 -Moleküls $6.6 \cdot 10^{-19}$ J. Für die Auslenkung x einer Feder

nehmen wir die Bindungslänge a (beispielsweise durch Röntgenstrahlung ermittelt). Mit $a = 116$ pm erhält jede fiktive Feder eine Härte von $k = 49$ N/m. Mit der Masse eines Sauerstoffatoms resultieren die Resonanzfrequenz von 67 THz und eine Wellenlänge von etwa 4.4 μm . Diese Werte liegen im richtigen IR-Bereich (vgl. Abb. 2), trotz der starken Vereinfachungen. Damit eine Schwingung klimarelevant wird, muss sie ein schwingendes Dipolmoment besitzen wie eine Radioantenne. Das ist bei antisymmetrischen Schwingungen der Fall.

Derartige Überlegungen können vom CO_2 aufs H_2O übertragen werden. Das fehlende Dipolmoment von N_2

und O₂ verursacht ihre Inaktivität im IR. – Hertha Sponer (1895-1968) ist eine der ganz wenigen Frauen, die früh in der Quantenphysik gearbeitet haben. Sie schrieb 1920 bei Peter Debye die Dissertation «Über ultrarote Absorption zweiatomiger Gase». Mit der Arbeit «Anregungspotentiale der Bandenspektren von Stickstoff» wurde sie die erste Professorin in Göttingen. Sie flüchtete 1933 vor den Nazis nach Oslo und dann in die USA. An der Duke University forschte und lehrte sie weiter in ihrem Spezialgebiet *Molekülspektren und ihre Anwendung auf chemische Probleme* und heiratete spät den verwitweten James Franck.

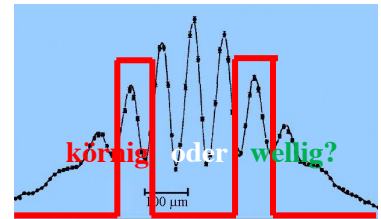
Das Atommodell, das Niels Bohr 1913 publizierte, liegt ebenfalls in diesem geistigen Umfeld: klassische Mechanik plus Energiequantisierung mit h . Das war schon für Rutherford dubios. Er schrieb am 20. März 1913 an Bohr: *I have received your paper safely and read it with great interest, but I want to look it over again (...). Your ideas as to the origin of the spectrum of hydrogen are very ingenious, and seem to work out well; but the mixture of Planck's ideas with the old mechanics makes it very difficult to form a physical idea of what is the basis of it. There appears to me one grave difficulty in your hypothesis (...) How does an electron decide what frequency it is going to vibrate. (...) You have to assume that the electron knows beforehand where it is going to stop.* Max von Laue und Otto Stern, damals beide in Zürich, leisteten deshalb den «Üetlischwur»: *Wenn sich dieses verrückte Modell [von Bohr] als richtig herausstellte, würden sie die Physik an den Nagel hängen.*



5 Eine neue Mechanik mit Quanten

2023 feiert de Broglies Idee ihren 100. Geburtstag: [Il faut] *unifier les points de vue corpusculaire et ondulatoire et approfondir un peu le sens véritable des quanta.* 2025 wird Werner Heisenbergs Idee *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen* 100 Jahre alt. Und 2026 wird es 100 Jahre her sein, seit Schrödingers Produkt aus den Skiferien in Arosa,

Quantisierung als Eigenwertproblem, die Öffentlichkeit erreicht hat. Diese Öffentlichkeit ist allerdings nicht diejenige des RLP 20, wo die Quantenphysik im Grundlagenfach weiterhin ein Nischendasein als «Ausgewählter Aspekt moderner Physik oder aktueller Forschung» erscheint. Ein solcher Lehrplan ist wie einer, der den Geschichtsunterricht im Zeitalter der Sultane, Zaren und Kaiser enden lässt. Es ist wie Astronomie, die mit dem geozentrischen Weltbild zufrieden ist. Was schon im RLP von 1994 schlecht war, muss jetzt verbessert werden: Es ist für das Gymnasium des 21. Jahrhunderts unumgänglich, wenn auch anspruchsvoll, die anschauliche, aber – wie schon Rutherford erkannt hat – unklare physikalische Basis von Bohrs rein körnigem Atommodell über Bord zu werfen und auch im Physikunterricht nach einem quantenphysikalischen Atomverständnis zu suchen.



Gar Manches rechnet Erwin schon
Mit seiner Wellenfunktion.
Nur wissen möchte' man gerne wohl
Was man sich dabei vorstell'n soll.

Das kleinere Problem ist, die nötige Unterrichtszeit zu finden. Das ewige Dilemma, etwas Bewährtes zugunsten von etwas Neuem aufzugeben, stellt sich erneut. Mir scheint, es wäre auch von Nutzen für die Mathematik, wenn sie im Bereich der Kinematik und der Vektoren fachübergreifend «physikalischer» würde. Ein grösseres Problem ist, dass in der Quanten-

physik wenig «klassische» Rechenaufgaben gestellt werden können und Übungen ebenso wie Prüfungen in diesem Bereich intensivere Spracharbeit bedeuten. Das Hauptproblem ist aber die Vermittlung des unanschaulichen und kontra-intuitiven Konzepts «Dualität», das *zugleich* Teilchen- und Wellenaspekt beinhaltet. Es gibt immer neue Versuche, dieses Problem zu lösen. ReleQuant aus Norwegen ist einer; [1] ist ein anderer.

Quantenobjekte wirken auf uns paradox, aber sie selbst sind es nicht. R. Feynman sagt:
The 'paradox' is only a conflict between reality and our feeling of what reality 'ought to be'.

Die Elektronenbeugung an Graphit ist das einzige Experiment, mit dem im Gymnasium der Wellenaspekt der Materie gezeigt werden kann. Informativer als die vielen Simulationen ist das Studium von realen Doppelspaltexperimenten, beispielsweise die Experimente mit Neutronen von Zeilinger et al. Im Bild nebenan

sind den Daten vom Realexperiment mit den «welligen» Neutronen fiktive Daten gegenübergestellt, die «klassisch-körnige» Neutronen erzeugten. Experimente zum Tunneleffekt könnten überleiten zu den mysteriösen stehenden Psi-Wellen, mit denen Schrödinger das H-Spektrum hergeleitet hat und die Erich Hückel zum abgedruckten Spottgedicht motiviert haben. Für die Lernenden ist die Unsicherheit des Erfinders tröstlich, der 1926 dem *Hochverehrten Herrn Geheimrat Planck* nach Berlin schrieb: (...) *Ich meine selbstverständlich nicht, dass nun alles wieder mit Mechanik zu erklären sei, dass etwa jene ψ -Schwingungen Massenschwingungen im Sinne der gewöhnlichen Mechanik sind. Im Gegenteil: sie oder etwas ihnen Ähnliches scheint aller Mechanik und Elektrodynamik zugrunde zu liegen.*

Um mit der Bedeutung der ψ -Schwingungen im Gymnasium vertraut zu werden, kann man etwa die Zustandsfunktion $\psi_1(r) = C \cdot e^{-r/a}$ für den 1s-Zustand des Wasserstoffs untersuchen. Im Grundlagenfach geht es «nur» um die Erkenntnis, dass die Dualität einen stabilen Grundzustand garantiert, ohne dass irgendetwas umlaufen muss: Der nach aussen drückende Wellenaspekt (Impuls, resp. kinetische Energie) kompensiert den innen wirkenden Teilchenaspekt (elektrische Ladung, resp. Energie). Während im Schwerpunkt sicher das Quantenobjekt im unendlich tiefen Potentialtopf und Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen eine Rolle spielen, wird man sich im Grundlagenfach darauf konzentrieren, die «Flauschigkeit» der Atome zu betonen und darauf hinweisen, dass die Vielfalt der Orbitale mit der Vielfalt der Drehimpulse zu tun hat. Zur Quantenphysik auch im Grundlagenfach gehört die Auseinandersetzung mit Borns Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Nicht das ψ sondern erst das Quadrat davon hat eine physikalische Bedeutung:

$$\psi^2(x) = w(x) \quad (\text{F})$$

Max Born schrieb 1926, Heisenberg, Jordan und er hätten zuerst die Auffassung vertreten, dass *eine exakte Darstellung der Vorgänge in Raum und Zeit überhaupt unmöglich sei. (...) Schrödinger auf der anderen Seite scheint den Ψ -Wellen eine Realität von der selben Art zuzuschreiben, wie sie Lichtwellen besitzen. (...) Keine dieser beiden Auffassungen scheint mir befriedigend. (...) Ich möchte versuchen, hier **eine dritte Interpretation** zu geben und ihre Brauchbarkeit an den Stossvorgängen zu erproben. Dabei knüpfe ich an eine Bemerkung Einsteins über das Verhältnis von Wellenfeld und Lichtquanten an. (...) Dieses ‘Gespensterfeld’ bestimmt die **Wahrscheinlichkeit** dafür, dass ein Lichtquant (...) einen bestimmten Weg einschlägt.*



Dass im Innersten der Natur der Zufall eine Rolle spielen soll, irritiert nicht nur die Lernenden heute. Schon Born berichtet über einen hitzigen Gedankenaustausch mit Schrödinger: *Sie [Born's neue Ideen] machten ihn wütend, weil er das nicht wollte. Wir hatten eine heftige Diskussion. (...) Die [von mir, Born] vorgeschlagene Theorie [entspricht] nicht der Folgerung der kausalen Bestimmtheit des Einzelereignisses.* Kausalität, die in der klassischen Physik grundlegende Beziehung zwischen Ursache und Wirkung, gilt in der Quantenphysik nicht. *Der Gedanke, dass ein einem Strahl ausgesetztes Elektron aus freiem Entschluss den Augenblick und die Richtung wählt, in der es fortspringen will, ist mir unerträglich. Wenn schon, dann möchte ich lieber Schuster oder gar Angestellter einer Spielbank sein als Physiker,* meinte Albert Einstein. – Doch genau das macht ein Lichtquant, das von einem angeregten CO₂-Molekül der Atmosphäre weggeht.

6 Epilog: Weitere Highlights im Quantenland

Die Klimafrage ist natürlich nicht der einzige Zugang zur Quantenphysik, respektive die einzige Anwendung, die fürs Gymnasium interessant ist. Bildgebung mit Röntgenstrahlen oder Magnetresonanz sind attraktive Themen, weil sie den eigenen Körper betreffen. Schrödingers Katze ist vielen Lernenden aus der Populärwissenschaft bekannt. Von Kryptographie mit verschränkten Zuständen haben die Nerds, die nicht nur in P & AM anzutreffen sind, schon gehört. Der Diodenlaser begleitet uns ebenso wie der Barcode. Die Halbleiterphysik, die den Computer ermöglicht, ist angewandte Quantenphysik. Erst recht weisen die milliardenschweren «Quantum flagship» Projekte auf die Bedeutung dieser «modernen» Physik hin. Kurz: Es gibt keinen Grund, sich im Gymnasium nicht mit dem Gebiet zu beschäftigen, das unseren Alltag ebenso verändert hat wie unser Denken.

Hinweise und einige Quellen

- [1] Dreyer, H. P. (2021). *FACETTEN DER QUANTENPHYSIK*. 3 Module für je 8 Lektionen im 10., 11. und 12. Schuljahr des Grundlagenfachs; Aktivitäten & Ergänzungen; pdf kostenlos bei hanspeter.dreyer@uzh.ch
- [2] Dreyer, H. P. (2021). Ein Versuch, die chemische Bindung im gymnasialen Physikunterricht zu verstehen. *chemie + biologie*, 106, S. 34-45. http://www.vsn.ch/cundb/21_1/cundb_21_1.pdf (17.05.21)
- Ångström K. (1900). Über die Bedeutung des Wasserdampfs und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre. *Annalen der Physik*, 3, S. 720–732.
- Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*. Series 5, Volume 41, April 1896, S. 237-276.
- IPCC. Einstieg über: <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/ipcc-ar6/uebersicht-ar6.html> (17.05.21)
- Pais, A. (1986). *Raffiniert ist der Herrgott - Albert Einstein - Eine wissenschaftliche Biographie*. Braunschweig: Vieweg. (Für alle Informationen, die AE betreffen, mit vielen Quellen zur Quantenphysik.)
- Planck, M. (1901). Über die Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik* 3. S. 553-563.
- ReleQuant (2016). *Quantum Physics*. Oslo: University. <https://filarkiv.viten.no/quantum-physics> (17.05.21)
- RLP 20 (2020). *Fach-Rahmenlehrpläne für Grundlagen-, Schwerpunkt- und Ergänzungsfach Physik (Entwurf)* https://matu2023.ch/images/PDF/DE/F-RLP_d.pdf (17.05.21)