

Quantenphysik und Astronomie – mehr als nur bunte Farben?

Tobias Reinsch¹, Lukas Maczewsky², Holger Cartarius³, Ronny Nawrodt¹

¹ 5. Physikalisches Institut, Abt. Physik und ihre Didaktik, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

² Experimentelle Festkörperphysik, Universität Rostock, Albert-Einstein-Str. 23, 18059 Rostock

³ AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena

treinsch@pi5.physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Die Beobachtung des Sternenhimmels gehört nicht nur zu den ältesten Wissenschaften, sondern bietet einen interessanten Einstieg in moderne Fragestellungen der Physik für Schüler*innen und Studierende. Die Analyse von Stern- und Sonnenspektren bietet einen motivierenden und vielfältigen Einstieg in die Quantenphysik. In diesem Beitrag wird eine unterrichtstaugliche experimentelle Herangehensweise auf Basis einfacher spektroskopischer Messungen der Linien im Sonnenspektrum vorgestellt. Quantenphysikalische Grundkonzepte wie Spin, Wellen- und ferner Teilchencharakter lassen sich damit direkt experimentell aus den Spektren ableiten. Zusätzlich können diskrete Übergänge als Lösungen der Schrödingergleichung hergeleitet werden. Aus der Beobachtung weit entfernter Prozesse in unserem Universum lassen sich also Rückschlüsse auf die mikroskopischen Prozesse quantenmechanischer Natur auf Atomebene schließen und umgekehrt.

1. Einleitung

Die moderne Physik, insbesondere die Quantenphysik, ist aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Berichte über Quantencomputer machen regelmäßig Schlagzeilen [1]. Von Kryptografie bis hin zur Problemlösung spezifischer Probleme wird von Erfolgen berichtet. Zumindest Grundbegriffe der Quantenphysik kommen auch bei Schüler*innen an. Um die Quantenphysik in der Schule einzuführen, gibt es unzählige Möglichkeiten. Ein historischer Weg über die Quantenhypothese oder dem Photoeffekt wird traditionell gewählt. Auch ein Einstieg über die Quantenoptik und Einzelphotonenstatistik wird zunehmend populärer [2]. Aufgrund der Komplexität der Experimente und den damit verbundenen hohen Anschaffungskosten ist ein experimenteller Zugang in der Quantenoptik nicht breitflächig realisierbar. Analogieexperimente mit Interferometern lassen sich bereits kostengünstig dem 3D-Drucker erstellen [3]. Nichtklassische Experimente, welche die Quantenphysik veranschaulichen sind hingegen rar. Aus dem Teilbereich der Astronomie lässt sich bereits kostengünstig oder mit vorhandenen Mitteln einer Physiksammlung ein Einstieg in die Quantenphysik umsetzen. Ausgehend von einem breiten Interesse an der Astronomie [4] und einer technisch einfacheren Umsetzbarkeit als über die Quantenphotonik, soll folgendes Paper die Möglichkeiten, Vorteile und Einschränkungen eines solchen Zugangs aufzeigen.

2. Herausforderungen in der Didaktik der Quantenphysik

Es gibt gute Gründe, warum in gängigen Physikcurricula eines Studiums die Quantenphysik nicht im ersten Semester vorgesehen ist. Das mag sowohl an der Vielseitigkeit anderer Themen liegen,

aber vor allem an der mathematischen Komplexität, die die Quantenphysik unweigerlich mitbringt. Eigenwertgleichungen, Skalarprodukte und Vektorräume seien an dieser Stelle nur wenige Grundvoraussetzungen, die beherrscht werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Modelle in der Quantenphysik zunehmend komplex und abstrakter als in der klassischen Physik sind. Obwohl Quantencomputer in den Medien präsent sind [1], gibt es keinen wirklichen Alltagsbezug. Phänomene und Prinzipien lassen sich selten direkt ohne aufwendige und teure Experimentsetups beobachten. Quantenphysik lässt sich zwar zur Erklärung von beinahe Allem nutzen, aber nur auf mikroskopischer Ebene. Makroskopisch bereitet die Beobachtung Schwierigkeiten. Trotz der Schwierigkeiten wird die Lehre der Quantenphysik in den Bildungsplänen der Bundesländer gefordert. Im Bildungsplan des Landes Baden-Württembergs Stand 2016 hat die Quantenphysik zum Beispiel seit der jüngsten Neuerung wieder an Umfang zugenommen [5]. Der Fokus wird hierbei explizit auf quantenmechanische Experimente gelegt. Es sollen Aussagen zu diesen getroffen werden und mit Wahrscheinlichkeitsinterpretationen erklärt werden. Die Entwicklung der Bildungspläne aus Baden-Württemberg spiegelt die zunehmende Wichtigkeit moderner Physik für die Gesellschaft wieder. Aufgrund der genannten Schwierigkeiten ist das tiefere Verständnis leistungstärkeren Schüler*innen oftmals vorbehalten. Ziel eines allgemeinbildenden Gymnasiums sollte eine Grundbildung auch in der Quantenphysik sein. Gesellschaftliche Interessen, aber auch die Forderung nach einer Mündigkeit von jungen Menschen, machen dies erforderlich. Die Kenntnis der Grundzüge der Quantenmechanik kann der gezielten Täuschung durch Halbwissen vorbeugen.

3. Einstieg in die Quantenphysik ab Sekundarstufe II über die Astronomie

Um den Herausforderung der Lehre der Quantenphysik entgegenzuwirken, soll an dieser Stelle ein Einstieg in die Quantenphysik über die Astronomie vorgestellt werden. Dabei wird ein der Fokus auf einen experimentellen Zugang gelegt. Der Einstieg empfiehlt sich aufgrund der nötigen Vorkenntnisse für die Sekundarstufe II. Einige Prinzipien lassen sich jedoch bereits in der Sekundarstufe I andeuten und diskutieren. Im Folgenden sollen nun Themen diskutiert werden, die sich für einen Einstieg in die Quantenphysik über die Astronomie anbieten.

Aus den Absorptionspektren von Sternen und der Sonne lassen sich nicht nur die Elemente in der Sternatmosphäre nachweisen, sondern auch auf diskrete Übergänge in der Struktur der Energieniveaus der Atome schließen. Das Schalenmodell der Atome wird bereits in der Sekundarstufe I in der Chemie behandelt. Für die Erklärung der Herkunft diskreter Niveaus wird die Quantenphysik benötigt. Aus der Lösung der Schrödingergleichung für das Wasserstoffatom ergeben sich diskrete Werte. Der hierfür notwendige Separationsansatz und die Anwendung von Laguerre-Polynomen wird aus gutem Grund erst im Physikstudium behandelt. Mathematisch geht das deutlich über das Anforderungsniveau eines allgemeinbildenden Gymnasiums hinaus. Dennoch bleibt die Grundidee bestehen. Aus einer postulierten Gleichung, die experimentell sehr gut bestätigt ist:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi + V\psi = E\psi \quad \{1\}$$

folgt die Quantisierung physikalischer Größen wie Energie E , Drehimpuls L , die durch natürliche Zahlen, den Quantenzahlen, beschrieben werden kann:

$$E_n = -E_R \frac{1}{n^2}, \quad \vec{L}^2\psi = \hbar^2 l(l+1)\psi \quad \{2\}$$

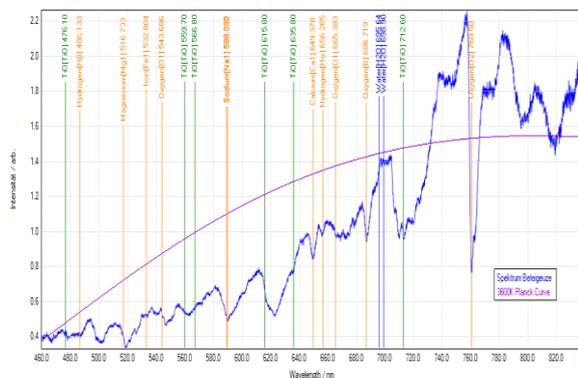


Abb. 1: Spektrum des Sterns Beteigeuze mit Molekülbanden und diskreten Elementlinien. ($f = 500 \text{ mm}$, 10 Bilder mit $t = 374 \text{ ms}$ Belichtungszeit, Transmissionsgitter, CCD)

Die Quantisierung der Energien kann des Weiteren durch das Nachvollziehen der Quantenhypothese experimentell untersucht werden. Auch hierfür sind ausschließlich die Spektren der Sterne als Daten notwendig. Durch Annäherung des Sternenspektrums als schwarzer Strahler kann die Oberflächentemperatur der Sterne abgeschätzt werden. Die zugrundeliegende Formulierung des Planck'schen Strahlungsgesetzes beruht auf der Annahme, dass die Energieabgabe eines schwarzen Strahlers nicht kontinuierlich, sondern als Vielfache der Energie einzelner Lichtquanten abhängig ihrer Frequenz geschieht. Die Quantisierung ist hierbei weniger versteckt als aus der Herleitung aus der Schrödingergleichung. Auch ist die Einführung von Quantenzahlen nicht erforderlich.

Je nach Auflösung des Spektrometers kann des Weiteren die Natrium-D-Linie beobachtet werden. Es handelt sich hierbei um ein prominentes Beispiel einer Feinstrukturaufspaltung, die durch die Spin-Bahn-Wechselwirkung hervorgerufen wird. Der Spin als intrinsische quantenphysikalische Größe kann hier zwar nicht direkt beobachtet werden, aber die Aufspaltung gibt einen Hinweis darauf, dass zu den bisherigen Quantenzahlen weitere Quantenzahlen existieren, die in der klassischen Physik nicht vorkommen.

Die Wellennatur von Photonen kann über die Beobachtung des Dopplereffekts entdeckt werden. So ist mit passenden Messinstrumenten die Beobachtung der Sonnenrotation beobachtbar. Auch die kosmologische Rotverschiebung entfernter Galaxien oder Quasare ist bereits mit einfacher astronomischer Ausrüstung messbar.

4. Experimentelle Umsetzung

Zur Aufnahme eines Sternspektrums ist in einfachster Ausführung ein Transmissionsgitter und eine Kamera (idealerweise eine Spiegelreflexkamera mit großer Objektivöffnung) erforderlich. Auch kann in den Strahlengang eines Teleskops ein Transmissionsgitter und der Body einer Spiegelreflexkamera eingebracht werden. Der Chip wird dann als Projektionsfläche verwendet. Sterne erscheinen uns als Punktquellen, weshalb nicht zwingend ein Spaltspektrometer erforderlich ist. Sollen ausgedehnte Objekte spektroskopiert werden, wird man um die Anschaffung eines Spaltspektrometers nicht herumkommen. Eine schulpraktische Möglichkeit, die auch tagsüber bei nahezu jedem Wetter durchführbar ist, ist die Aufnahme des Sonnenspektrums via USB-Spektrometers. Diese Methode funktioniert auch zuverlässig bei bewölktem Himmel. Absorptionslinien sind direkt auslesbar. Die Fraunhoferlinien können bereits mit einem Handspektroskop beobachtet werden. Eine

Auflösung der Natrium-D-Linie ist damit aber nicht möglich.

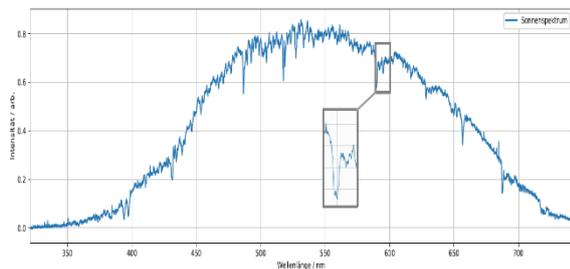


Abb. 2: Spektrum der Sonne aufgenommen an einem bewölkten Tag mit USB-Spektrometer. Die Natrium-D-Doppellinie ist schwach erkennbar.

Die Bestimmung der Sterntemperatur ist zwar mit Daten eines Spektrometers möglich, aber erfordert einiges an Geschick und ist je nach Stern sehr ungenau. Eine sehr kostengünstige Variante, die wiederum mit einer

Spiegelreflexkamera umsetzbar ist, ist die Bestimmung des sogenannten Farbindex. Dabei handelt es sich um einen Helligkeitsindex, der die Differenz der scheinbaren Helligkeit eines Objektes bei unterschiedlichen Farben angibt. Aus dem Index ist mit Hilfe einer mathematischen Näherung ebenfalls die Sterntemperatur berechenbar. Der theoretische Hintergrund ist das Planck'sche Strahlungsgesetz. Am weitesten verbreitet ist das UBV-System. Für dieses existieren photometrische Farbfilter, die im Bereich von wenigen hundert Euro liegen. Günstiger sind einfache Farbfolien (grün und blau) aus dem Lichttechnikbedarf. Diese stimmen von der Transmission zwar nicht mehr exakt mit dem UBV-System überein, aber bei passender Auswahl sind vergleichbare Transmissionskurven zu finden. Allerdings lässt sich der Farbindex einfacher ohne zusätzliche Filter ermitteln. Hierfür wird nur eine Farbkamera benötigt, die Bilder im Raw-Format abspeichern kann. In komprimierten Bildformaten gehen zu viele erforderliche Daten verloren. Die Transmissionspektren der Farbfilter pro Farbpixel stimmen häufig sehr gut mit den Transmissionsprofilen des UBV-Systems überein. Es genügt ein Bild eines Sterns aufzunehmen. Im Anschluss werden aus der ersten Aufnahme zwei Bilder erstellt. Das erste Bild besitzt nur noch den Grün-Kanal (V) und das zweite Bild nur noch den Blau-Kanal (B). Aus der Integration der Intensität des Sterns pro Bild und aus der anschließend berechneten Differenz lässt sich der B-V-Index ermitteln. Die Bildbearbeitung und Helligkeitsintegration kann über die Freeware Fitswork stattfinden.

Für die direkte Beobachtung des Dopplereffekts ist ein Sonnenteleskop obligatorisch. Dazu gehören passende scharfe Bandpassfilter um den Kontrast zu erhöhen. Aufgrund der kleinen Verschiebung von unter 0,1nm ist ein hochauflösendes Spektrometer erforderlich, wenn ein solches verwendet werden soll. Auch für die Beobachtung der kosmologischen Rotverschiebung wird ein richtiges Teleskop benötigt. Objekte mit großer Rotverschiebung sind entsprechend weit entfernt, weshalb sie zum einen klein erscheinen und sehr lichtschwach erscheinen. Ohne ein nachführbares Teleskop und mehrminütiger Belichtungszeit sind diese nicht zu beobachten.

5. Vor- und Nachteile eines solchen Einstiegs

Ein Vorteil eines solchen Einstiegs ist, wie bereits erwähnt, ein hohes, breites Interesse an der Astronomie unabhängig des Geschlechts der Schüler*innen [4]. Als Unterkategorie der Astronomie knüpft die Astrophysik direkt an das Beobachten an und sucht Erklärungen für die beobachteten Himmelsphänomene. In diesem Konzept werden primär Phänomene beobachtet, die mit der Quantenphysik in Verbindung gebracht werden können, wodurch ein differenziertes Weltbild vermittelt werden kann.

Erste Experimente sind ohne großen finanziellen Aufwand realisierbar. Das Spektrum eines Sterns kann bereits mit einem Transmissionsgitter vor einer Spiegelreflexkamera aufgenommen werden. Einige Schulen verfügen zusätzlich über ein Schulteleskop in der Physiksammlung. Die Beobachtung mit einem Teleskop ist für die meisten Schüler*innen zwar eine neue Erfahrung, dennoch ist das Funktionsprinzip eines Teleskops einfacher verständlich als ein Interferometer mit Einzelphotonenmessungen und möglicherweise von Ferngläsern bereits bekannt.

Nachteile der Himmelsbeobachtung sind schlechte Wetter- und Lichtverhältnisse und ein größerer Aufwand durch eine außerunterrichtliche Veranstaltung. Sollen die Daten vielseitiger und höherwertiger werden liegen die Anschaffungskosten zusätzlich schnell im Bereich mehrerer tausend Euro. Ein möglicher Ausweg können Originaldaten modernster terrestrischer Teleskope und Weltraumteleskope sein, die kostenlos von der ESA (siehe ESASky [6]) oder der NASA [7] bereitgestellt werden. Rohdaten und aufgearbeitete Daten der großen Messinstrumente von Gaia bis Hubble oder dem Spitzer-Teleskop sind dort archiviert und abrufbar. Es existieren Daten von allen Himmelsbereichen und sämtlichen Spektralbereichen frei zugänglich in genannten Archiven. Mit diesen Daten lassen sich auch neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewinnen. Hierfür ist jedoch eine umfassende Datenanalyse erforderlich, was wiederum nur mit leistungsstarken Rechnern und thematisch eher im Informatikunterricht umsetzbar ist. Eine Beobachtung auf dem Schulhof dient

hingegen zur reinen Lehre und bietet gegenüber der reinen Datenanalyse durch die direkte Arbeit an einem Teleskop die Möglichkeit zum Erlernen praktischer Kompetenzen.

6. Erforderliche Vorkenntnisse

Um den Messprozess eines Teleskops und einer Fotokamera zu verstehen sind grundlegende optische Kenntnisse erforderlich. Dies umfasst die Ausbreitung von Licht, die Strahlenoptik in Linsen, die Lichtbrechung und -beugung. Um diskrete Energieniveaus zu diskutieren ist das Schalenmodell der Atome aus der Chemie Voraussetzung. Dazu gehört auch der Aufbau der Atome mit Atomkern und Elektronen in der Hülle. Auch sollte die Zuordnung einer Schale zu einer spezifischen Energie bereits bekannt sein. Mathematisch ist die Schrödingergleichung auf Operatorebene mit Zeit- und Ortsableitungen auf Schulniveau zu abstrakt. Eine rein qualitative Diskussion kann dennoch stattfinden.

7. Ausblick

Ausgehend von den in der Astronomie erlernten Prinzipien und Techniken lässt sich der Unterrichtsverlauf in Richtung moderner quantenphysikalischer Forschungsobjekte fortsetzen. Über die Untersuchung von Fluoreszenz in Festkörpern lässt sich zum Beispiel auf die Forschung an NV-Zentren in Diamanten leiten. Auch hier treten diskrete Energieniveaus und der Spin mit seiner Wechselwirkung direkt auf, die spektroskopisch untersucht werden können. Kostengünstige Aufbauten zu Experimenten an NV-Zentren kommen mittelfristig auf den Markt [8] und werden auch für Schulen verfügbar sein. NV-Zentren werden bereits in der Sensorik eingesetzt. An ihnen lassen sich die Spinzustände des Systems manipulieren und daraus echte Überlagerungszustände umsetzen. Aktuell wird daran geforscht, wie mit NV-Zentren Quantencomputer aufgebaut werden können. Einzelne Qubits sind mit, für die Forschung geringem, Aufwand bereits aufbaubar. Als Einzelphotonenquelle werden Diamanten mit NV-Zentren bereits eingesetzt. Die erlernten Methoden aus der Astronomie können also passend für die Arbeit an quantenphysikalischen Objekten angewandt werden und sollen keinen Ersatz, sondern vielmehr eine Ergänzung darstellen.

8. Literatur

- [1] Quantencomputer: “Wir sind in einer Übergangsphase“: <https://www.mdr.de/wissen/quantencomputer-stand-quantentechnologien-forschung-foerderung-zukunft-100.html> (Stand 5/2021)
- [2] Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2020). A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. In: Physics Education 55 055031, URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aba208>
- [3] 3D-printable Laserlab, S’Cool LAB: <https://scoolab.web.cern.ch/laserlab3D> (Stand 6/22)
- [4] Elster, Doris (2010): Zum Interesse Jugendlicher an den Naturwissenschaften. Ergebnisse der ROSE Erhebung aus Deutschland und Österreich. In: Shaker Verlag, URL: <http://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=OND-00000-0000091>
- [5] Bildungsplan Baden-Württemberg für das allgemeinbildende Gymnasium 2016: <http://www.bildungsplaene-bw.de/.Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/PH/IK/11-12-BF-QUANTEN/06> (Stand 5/2021)
- [6] Archivübersicht der ESA: https://www.esa.int/About_Us/ESAC/The_archives_a_scientific_treasure_trove (Stand 6/2022)
- [7] NASA Open Data Portal, Überblick der Archive: <https://www.nasa.gov/open/data.html>
- [8] Webseite von Advanced Quantum: <https://www.advanced-quantum.de/products> (Stand 6/2022)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der gemeinsamen Qualitätsoffensive Lehrerbildung von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Projekt „Lehrerbildung PLUS“ (Förderkennzeichen 01JA1907A) unterstützt. Zusätzlich wird das Projekt durch den IQST-Verbund sowie durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert.