

Einführung in die Quantenphysik über die Astronomie

Tobias Reinsch*, Lukas Maczewsky+, Philipp Scheiger#, Holger Cartarius#, Ronny Nawrodt*

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

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

#AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena
treinsch@pi5.physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Die Quantenrevolution 2.0 erfordert neben einem vertieften theoretischen Verständnis von Verschränkung, Wellenfunktionen und deren Eigenschaften vor allem praktische Fähigkeiten, um diese Technologien in der Praxis umsetzen zu können. Für die Arbeit an Quantentechnologien müssen Studierende daher ein breites Spektrum experimenteller Fertigkeiten erlernen. Damit dies einer breiten Gruppe an Studierenden zugänglich gemacht wird, bedarf es einem aktivierenden Einstieg. Erfahrungsgemäß haben Schüler*innen und Studierende ein hohes Interesse an der Astronomie, unabhängig ihrer schulischen Leistungen. Wir stellen daher einen Einstieg in die Quantenphysik über die Astronomie vor. Fertigkeiten aus den Bereichen Photonik, Messtechnik und Atomphysik werden anschließend für das Kennenlernen moderner Quantensensoren aus NV-Zentren in Diamanten angewendet. Des Weiteren verknüpfen wir auf klassischem Weg mehrere Bereiche der modernen Physik mit der Quantenphysik. Dieser Zugang eignet sich für Schüler*innen, Lehramtsstudierende sowie für Ingenieure, die bisher wenig Berührungspunkte mit der Quantenphysik hatten.

1. Einleitung

Die Lehre der Quantenphysik lässt sich vielschichtig und diverse Wege bestreiten. Aus einer wirtschaftlichen Sichtweise sind Fertigkeiten, die Elemente der Quantenrevolution 2.0 bespielen, von besonderer Relevanz. Grundprinzipien der Quantensensorik, des Quantencomputings sowie der Quantenkryptographie nehmen hierbei einen hohen Stellenwert ein, da aus diesen Bereichen bereits zeitnah Applikationen in der Industrie eingesetzt werden sollen [1],[2]. Die Wesenszüge der Quantenphysik, wie sie nach Müller und Küblbeck beschrieben werden, haben sich für die Lehre in der Sekundarstufe II bereits etabliert [3]. Die Grundkonzepte daraus sind die statistische Vorhersagbarkeit, die Fähigkeit zur Interferenz, eindeutige Messergebnisse und das Komplementaritätsprinzip. Diese Wesenszüge zielen besonders auf Interferometer- und Einzelphotonenexperimente ab. Eigene Experimente, welche nicht auf Simulationen oder Analogien beruhen sind nach wie vor komplex aufzubauen, teuer und oder ohne einen merklichen Zugewinn praktischer Fertigkeiten verbunden [4]. In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, das die Lücke zwischen Theorie und experimentellen Fertigkeiten aus der Quantenphysik etwas schließen soll. Es dient als Ergänzung bereits vorhandener Lehrkonzepte und orientiert sich an einer experimentell, technischen Perspektive der Quantensensorik und baut dabei auf dem Beitrag auf [5]. Da es nicht den einen Quantensensor und es auch vielseitige Kandidaten für

Qubits gibt, werden in diesem Beitrag nur Experimente mit NV-Zentren in Diamanten diskutiert, welche in Kombination mit dem Einstieg über die Astronomie einige Vorteile bieten.

2. Astronomie und NV-Zentren?

Ein experimenteller Einstieg in die Quantenphysik bietet natürlicherweise einige Hürden. Zum einen sind es komplexe theoretische Überlegungen, um Daten zu interpretieren zu können, zum anderen sind interdisziplinäre Fertigkeiten aus verschiedenen Teilbereichen der Physik erforderlich, dazu gehören Optik, Atom- und Festkörperphysik und Messtechnik. Wie bereits in [5] beschrieben, eignet sich ein Einstieg in die Quantensensorik über die Astronomie besonders gut, da grundlegende Konzepte wie die Quantisierung der Energieniveaus, der Spin, der Zeeman-Effekt, aber auch Datenanalysen rund um Spektren bereits behandelt werden. Die Astronomie dient dabei als Einstieg, nutzt das häufig hohe Interesse [6] und bereitet die Lernenden auf das anspruchsvollere Gebiet der Quantensensorik vor. Als Quantensensor dient hierbei ein mit NV-Zentren besetzter Diamant. NV-Zentren sind Bereiche in Diamanten, bei denen ein Stickstoffatom und eine benachbarte Fehlstelle den Platz zweier Kohlenstoffatome einnehmen. Diese Zentren kommen mit unterschiedlicher Ladung vor. Aufgrund der optischen Eigenschaften wird in aktueller Forschung überwiegend mit dem [NV]⁻-Zentrum gearbeitet, welches mit zwei freien Elektronen ein System mit Gesamtspin $S=1$ ausbildet und für eine leicht rosafarbene Erscheinung des Diamanten sorgt

[7]. Mit NV-Zentren besetzte Diamanten können als Einzelphotonenquellen, Qubits und Magnetfeldsensoren eingesetzt werden und sind Teil aktueller Forschung. Dabei werden die Diamanten optisch angeregt und die Fluoreszenzintensität gemessen. Durch eine gezielte Einstrahlung von Mikrowellenstrahlung lässt sich der Grundzustand der NV-Zentren manipulieren, was sich in einer Abnahme der Fluoreszenzintensität bemerkbar macht. So lassen sich ODMR-Spektren, wie in Abbildung 1 dargestellt, aufnehmen. Äußere Magnetfelder beeinflussen durch eine Aufweitung der Energieniveaus diese Spektren. Auch lässt sich in gepulsten Aufbauten Rabi-Streuung sowie Manipulierung und Überlagerung von Spinzuständen zeigen.

3. Didaktische Vorteile der NV-Diamanten für den Einsatz in der Lehre

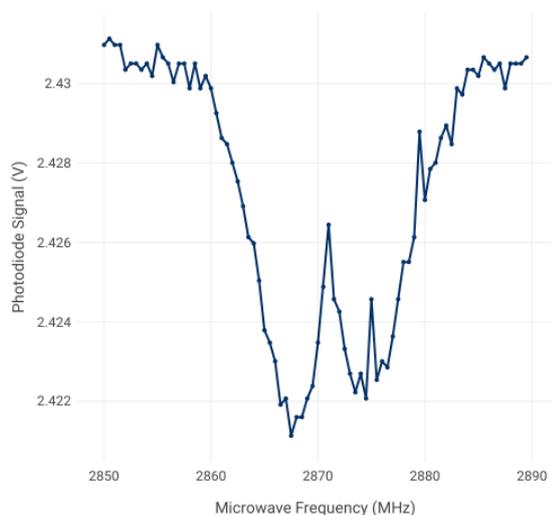


Abb. 1: ODMR Spektrum eines mit NV-Zentren besetzten Diamanten. Die Aufspaltung der Energieniveaus kommt durch innere und äußere Magnetfelder zustande. Zu sehen sind die $m_s = \pm 1$ Zustände des Triplet-Grundzustands zu sehen. Die Daten wurden am nebenstehenden Aufbau und der dazugehörigen Software aufgenommen und visualisiert.

Die Verwendung von NV-Zentren Diamanten in der Lehre bietet einige Vorteile gegenüber anderen Experimenten. Die Fluoreszenz des NV-Zentrums kann mit 637 nm visuell beobachtet werden. Die Anregung kann über eine grüne LED oder Laserdiode geschehen. Anregungen mit einer UV-LED lassen zudem direkte Beobachtungen der Fluoreszenz zu, die auch ohne Filterung des Anregungslichts beobachtet werden kann. Gleichzeitig sind die benötigten Komponenten für erste Gehversuche vergleichsweise günstig einzukaufen, da die Anregung der Grundniveaus bei etwa 2,8 GHz liegen. Ein weiterer Vorteil ist die mögliche Differenzierung. Beginnend mit der Fluoreszenz als Einstieg für die Diskussion diskreter Energieniveaus hin zu programmierbaren Qubits in aufwändigeren Aufbauten ist die Bandbreite an Möglichkeiten für die Adressierung verschiedener Zielgruppen von

Sekundarstufe II über Praktikumsexperimente an Hochschulen bis hin zu Fortbildungen mit Industriepartnern groß.

4. Einfacher Aufbau für die Magnetfelddetektion

In Abbildung 2 ist ein einfacher Aufbau dargestellt, der für die Untersuchung der NV-Zentren bis hin zur ODMR-Spektroskopie zulässt. Links im Aufbau ist eine Laserdiode eingebaut, deren Licht auf den Diamanten in der Mitte mittels einer Linse gebündelt wird. Direkt am Diamanten ist eine Mikrowellenantenne montiert. Das Fluoreszenzlicht wird über eine weitere Sammellinse auf eine Photodiode gebündelt und dort detektiert. Der Aufbau bietet trotz seiner Einfachheit bereits die Möglichkeit den Zeeman-Effekt direkt zu beobachten. In aufwändigeren Aufbauten können zusätzliche Aspekte des Quantencomputings untersucht werden.



Abb. 2: Einfacher NV-Aufbau der Firma Advanced Quantum für die Lehre. Die Datenaufnahme erfolgt über ein lokales Netzwerk und die Steuerung über einen beliebigen Browser [8].

5. Inhaltliche und methodische Kompetenzen

Am zuvor vorgestellten Aufbau lassen sich methodische wie inhaltliche Kompetenzen herausarbeiten, die am Experiment erlernt werden können und sich auch teilweise in der Einführung über der Astronomie wiederfinden und vorbereitet werden können. Dazu gehört der Aufbau einfacher optischer Aufbauten sowie das Verständnis von Strahlenoptik, Sammellinsen und der Einsatz von Farbfiltern. Auch die Messung von Lichtintensität spielt in der Astrophysik, genauer den Photometriemethoden, eine entscheidende Rolle. Generell hat das Aufnehmen, Verarbeiten und Interpretieren von Spektren in der Astrophysik einen hohen Stellenwert. Die Messwerterfassung findet sich ebenso in beiden Bereichen wieder. Während der Arbeit mit diesem Aufbau lassen die zuvor erlernten Fertigkeiten anwenden und vertiefen. Inhaltlich werden in der Astrophysik Themen wie die diskreten Energieniveaus, Schwarzkörperstrahlung, der Zeeman-Effekt und Spin bei der Interpretation der Spektren vorbereitet. Im Quantensensorikteil werden diese Themen um Elemente der Festkörperphysik, dem Potentialtopf, die Superposition von Zuständen und der Spinmanipulation ergänzt. Experimentell wird am NV-Experiment der Umgang mit Lasern, das

Arbeiten mit Mikrowellenquellen und Messmethoden, wie die Arbeit am Oszilloskop zusätzlich gelehrt.

6. Ausblick

Abhängig von den speziellen Anforderungen verschiedener Zielgruppen können verschiedene Schwerpunkte gesetzt werden. Für die Sekundarstufe II bietet sich ein solcher Unterrichtseinstieg sicherlich an. Auch hier sind die Schwerpunkte nicht festgelegt und flexibel einsetzbar. So lässt sich in einem interdisziplinären Unterrichtskonzept beispielsweise der Schwerpunkt auf die Programmierung legen. Sowohl in der Astrophysik (Datenauswertung der Beobachtungsdaten) sowie in der Quantenphysik (Spektren und Intensitäten aufnehmen, aufbereiten und darstellen bis hin zur hardwarenahen Implementierung von Quantenalgorithmen) ist die Informatik nativ verankert und ein fester Bestandteil. Das Konzept stellt eine Möglichkeit dar, echte experimentelle Kompetenzen anhand von Objekten mit aktuellem Forschungsbezug zu erwerben und ist daher ein lohnenswerter Weg für die Lehre, um ergänzend zu bisherigen Lehrmethoden flexibel eingesetzt zu werden.

7. Literatur

- [1] Quantensensoren – Auf dem Weg in die Anwendung: https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichungen/publikationen/physikkonkret/pix/pk_39-2019_quantensensoren_entwurf_2019-11-13-web.pdf (Stand 5/2023)
- [2] Müller, R., Greinert, F., Quantentechnologien: Für Ingenieure. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, (2023),
Url: <https://doi.org/10.1515/9783110717211>
- [3] milq und die Wesenszüge der Quantenphysik: <https://www.milq.info/milq-und-die-wesenszuege-der-quantenphysik/> (Stand 5/2023)
- [4] Quantenphysik im Experimentierkoffer: <http://www.quantenkoffer.com/quantenkoffer/> (Stand 5/2023)
- [5] Reinsch, T., Maczewsky, L., Cartarius, H., & Nawrodt, R. (2022). Quantenphysik und Astronomie – mehr als nur bunte Farben?. In: PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung, URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1295>
- [6] 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>
- [7] Siyushev, P. et al. (2013): Optically Controlled Switching of the Charge State of a Single Nitrogen-Vacancy Center in Diamond at

Cryogenic Temperatures. In: Physical Review Letters, URL:

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.167402> (Stand 5/2023)

- [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 im Rahmen des IQST-Verbunds und QPhoton durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert. Des Weiteren wird diese Arbeit durch das Graduiertenkolleg GRK 2642 gefördert