

NV-Zentrum Magnetometer und sein didaktisches Konzept

Simon Koppenhöfer*, Philipp Mauz*, Philipp Scheiger*

*Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart
koppe@pi5.physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Dieser Konferenzbeitrag stellt ein NV-Zentrum Magnetometer Aufbau für den Lehrkontext vor. Im Vergleich zu anderen Anwendungen (bspw. kalte Atome, Ionen oder Supraleiter) der Quantenmechanik kann ein solches Experiment günstig, ungiftig, bei Raumtemperatur, ... also didaktisch vielversprechend aufgebaut werden. Mit ansprechenden Kontexten aus der Biologie und der Medizin, versucht das hier vorgestellte didaktische Konzept die Motivation für quantenmechanische Inhalte zu generieren. Weil diese Inhalte im Bereich der NV-zentren Magnetometer über die Lehrpläne in Deutschland hinausgeht, wird in ein Basis- und ein Expertenniveau unterteilt. In Letzterem sind ebenfalls zusätzliche verwandte Experimente in Entwicklung, die das erweiterte didaktische Konzept zum Beispiel für außerschulische Lernorte attraktiv gestalten soll.

1. Motivation

Durch einen stärkeren Fokus auf die Entwicklungen zu mehr Quantenmechanik (QM) in den deutschen Lehrplänen [1,2], steigt die Nachfrage von Lehrkräften zu passenden didaktischen Experimenten für den Schulunterricht. Besonders gerne werden SuS historisch an die Quantenmechanik herangeführt, dadurch könnten die Anwendungen der (QM) im Schulunterricht an den Rand gedrängt werden. Doch gerade diese Stunden könnten den SuS helfen die QM als relevant zu empfinden. Das NV-Magnetometer und seine Anwendungen in der Biologie und Medizin könnten hier Abhilfe schaffen und ebenfalls aufzeigen/erweitern welche experimentellen Möglichkeiten im QM-Unterricht bestehen.

Dieser Beitrag wird im folgenden Kapitel das NV-Zentren Magnetometer näher betrachten, um danach die extrahierten Elemente jeweils ihren eigenen Platz im einhüllenden didaktischen Konzept einzuräumen. Auf diese Weise schließen schließt sich ein Kapitel zu Fluoreszenz an, in dem es um die Energieniveaus im NV-Zentrum geht. Es wird für diese Niveaus die Spineigenschaft von Quantenobjekten im Messablauf relevant, sodass auch hier ein Kapitel folgt. Um den Bogen zur Magnetfeldmessung inhaltlich ganz abzudecken, wird der Zeeman Effekt im nächsten Kapitel besprochen. Der Beitrag schließt mit einer Betrachtung der Adressaten.

2. NV-Zentren Magnetometer

NV-Zentren sind Gitterfehler in Diamanten siehe hierzu Abbildung 1. Hier steht das N für ein Stickstoffatom das ein Kohlenstoff ersetzt, das V steht für eine Fehlstelle. Diese punktförmige Fehlstelle bindet Elektronen an sich, die innerhalb der Bandlücke des Diamanten verschieden gebundene Zustände annehmen können, die in Abbildung 2 visualisiert sind.

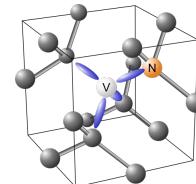


Abb. 1: Schemata eines Ausschnitts des Diamantgitters mit NV-Zentrum. N symbolisiert ein Stickstoffatom und V eine Gitterfehlstelle. (Eigene Darstellung)

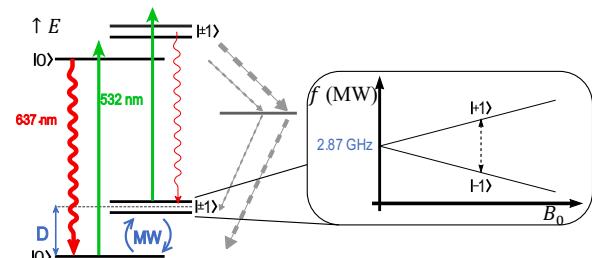


Abb. 2: Energieleveldiagramm eines NV-Zentrums. Grüne Pfeile zeigen optische Anregung an und rote Pfeile optische Emission jeweils in der charakteristischen Farbe mit Wellenlängenangaben. Graue Pfeile zeigen nichtoptische Übergänge an. Generell gilt je Farbe für jeweils den rechten/linken Satz eine andere Übergangswahrscheinlichkeitsaufteilung angedeutet mit der Dicke der Pfeile. Im rechten Inset ist der Zeeman Effekt für die spinversetzten Zustände angedeutet. (Eigene Darstellung)

Grünes Licht wird hier verwendet um Elektronen aus dem Grundzustand anzuregen. Durch Fluoreszenz kann mit bestimmter Wahrscheinlichkeit daraufhin rotes Licht emittiert. Dieser Prozess findet ebenfalls für die spinversetzten Zustände statt, nur dass sich die Helligkeit unterscheidet [3]. Mit Mikrowellen der richtigen Frequenz und Auslesen der Helligkeit kann man so mit einem Spektrum wie in Abbildung 3 zu sehen, die Energie der Spin ± 1 Niveaus abtasten und über den Zeeman-Effekt daraus das Magnetfeld

bestimmen. Diese Messmethode wird Optical Detected Magnetic Resonance (ODMR) genannt und findet allmählich ihren Platz in der Industrie [4].

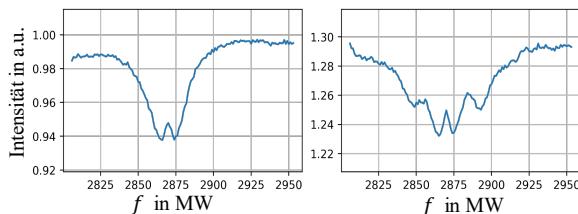


Abb. 3: Beispielhafte ODMR-Spektren für zwei verschiedenen Magnetfeldzustände gemessen mit dem Laborinspirierten offenen Messaufbau. Mehr als zwei Intensitätsminima geben zusätzlich Auskunft über die Richtung des Magnetfeldes [3]. (Eigene Darstellung)

In der Biologie und Medizin sind die biokompatiblen Diamanten mit vernachlässigbarem Ausbleichen zum Beispiel bereits bekannte Biomarker [5].

In der Didaktik gibt es einige Bemühungen die ODMR als Anwendung der Quantenmechanik gewinnbringend in die Lehre einzubetten [6-8]. Die Bemühungen speziell hierfür sind wohl dadurch begründet, dass die NV-Zentren Anwendung wenig Konkurrenz genießt, immerhin zeigt sich QM typischerweise erst sobald es kalt, klein, kurzwellig, sehr teuer, sehr dunkel, oder giftig wird. NV-Zentren allerdings setzen erhöhte Ansprüche an die fachliche Tiefe der Lerneinheit, denn Begriffe wie Fluoreszenz, Übergangswahrscheinlichkeit, Spin oder Zeeman-Effekt bleiben in deutschen Lehrplänen unberücksichtigt.

Die fachlichen Hürden können als Anlass genommen werden, um das NV-Zentren Magnetometer als Black-Box Messinstrument zu verwenden und/oder es inhaltlich allenfalls oberflächlich zu behandeln. Ergänzend stellen wir in den nächsten Kapiteln hauptsächlich vor wie eine didaktische Aufbereitung des physikalischen Inhalts gelingen kann.

2.1. Fluoreszenz

Fluoreszenz ist alltagsnah und optisch einfach zugänglich, deshalb ist ein Experiment didaktisch angenehm gestaltbar. Physikalisch sind diskrete Energien von Zuständen mit optischen Übergängen relevant. Diskrete Energien z.B. im eindimensionalen unendlich hohen Potentialtopf sind Teil deutscher Lehrpläne (KMK-Standards) und können im Kontext von Fluoreszenzmolekülen wie (Aesculin in Kastanien siehe hierzu Abbildung 4, Chlorophyl im Blattgrün, Betacarotin) behandelt werden. Auch Quantenpunkte, F-Zentren in Salzen, oder das Wasserstoffatom mit der Balmerreihe sind erwähnenswert. Die Farbzentren (F-Zentren) in Salzen sind genauso wie die NV-Zentren im Diamanten Störungen der Gitterstruktur. Diese Ähnlichkeit lässt sich gewinnbringend für den Verständnisaufbau verwenden. Mit dem Auge sichtbare Fluoreszenz ist hingegen bei den oft verwendeten Fluoreszenzmolekülen anzutreffen. Die Fluoreszenz kann z.B. durch einfache UV-

Bestrahlung hervorgerufen werden, sodass sie Schüler und Schülerinnen (SuS) ermöglicht Experimente zu machen. Je nach Molekül gibt es hier bereits Bezüge zu anregenden Kontexten aus Biologie und Medizin [9,10].



Abb. 4: Zu sehen ist ein Fluoreszenzexperiment mit dem Molekül Aesculin aus einem Kastanienast. Angeregt wird der in warmen Wasser gelöste Stoff mit einer UV-Lampe bei 365 nm Wellenlänge. (Eigene Darstellung)

Um am NV-Zentren im Diamanten die Fluoreszenz vorzustellen, ist bereits das Fluoro-Kit entstanden. Kern dieses SuS Experimentiersetups ist ein günstiger Mikrodiamond, der wahlweise mit blau, grün, orange oder rotem LED-Licht angestrahlt werden kann. Ein typisches Problem bei Experimenten zu NV-Zentren ist es das Anregungs- vom Fluoreszenzlicht zu separieren. Das geschieht hier mit einem Farbfilter, der vorwiegend rotes Licht transmittiert. Die begleitende Experimentieranleitung zum Fluoro-Kit fokussiert auf Farbwahrnehmung, Spektren und die Auswirkungen eines Farbfilters. Beispielhafte Spektren sind in Abbildung 5 abgebildet.

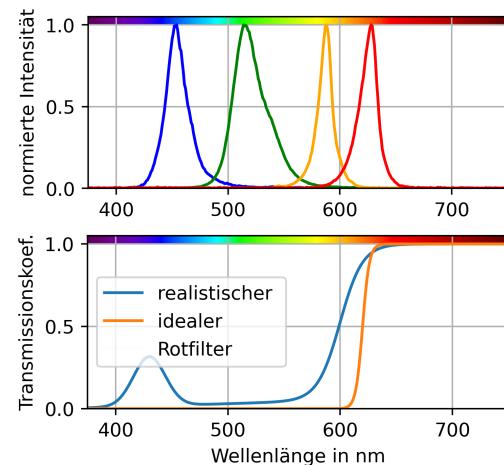


Abb. 5: Zu sehen sind Auszüge aus dem Begleitmaterial zum Fluoro-Kit. Das obere Bild zeigt gemessene Spektren der verbauten LEDs. Das untere Bild zeigt beispielhafte Transmissionskurven von Rotfiltern. Eine Fragestellung im Begleitmaterial fragt nach den resultierenden Spektren hinter den Farbfiltern. (Eigene Darstellung)

Mit diesem Hintergrundwissen können am Ende des Experiments SuS mit Überzeugung behaupten einen leuchtenden Diamanten zu sehen. Die verwendeten Mikrometer großen Diamanten sind günstig (<1 Euro

[11]) und erlauben es über einen Klassensatz Experimentierkits nachzudenken.

2.2. Spin

Weil sie nicht explizit in den Bildungs- und Lehrplänen Physik stehen, sind Berührungspunkte von SuS mit dem Spin Begriff aus der QM spät bzw. gar nicht vorhanden. Die wahrscheinlichsten Berührungspunkte sind zu finden in der Medizin (Magnet Resonanz Tomographie MRT) und in der Chemie beim Einordnen von Elektronen in Orbitale. Für die Behandlung der NV-Zentren bieten sich hier interessante Anknüpfungspunkte, aber auch die Notwendigkeit für weiterführende didaktische Konzepte. Ein gern gewählter Ansatz ist das Elektron, oder besser sein magnetisches Moment, mit einem Stabmagneten zu vergleichen und dadurch erklärbar zu machen, dass es ausrichtende bzw. anziehende Kräfte im Magnetfeld bzw. Magnetfeldgradienten gibt. Die Namensgebung des Spins und der Drehimpuls des Elektrons bleiben so unberücksichtigt. Auch die Quantisierung von Drehimpuls und magnetischem Moment sind zunächst didaktisches Autoritätswissen.

Mit einem Aufbau zum Einstein-de-Haas Effekt, wie in Abbildung 6 abgebildet, kann auf die Verknüpfung von magnetischem Moment und Drehimpuls hingearbeitet werden. Der Aufbau ermöglicht es außerdem über (mechanische) Resonanzmessmethoden zu sprechen, und bietet sich auch deshalb an, da Relevanz und Interesse an medizinischen MRT-Aufnahmen genutzt wird.

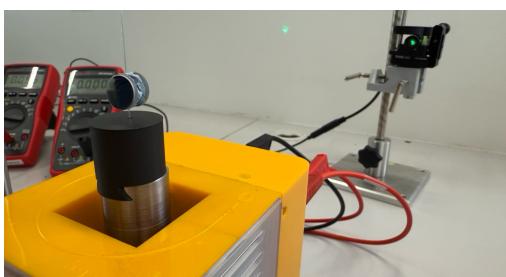


Abb. 6: Gezeigt wird ein vorläufiger Aufbau zum Einstein-de-Haas Experiment. Um die Auslenkung des Pendels zu verdeutlichen, wird ein Laserstrahl vom Pendel an die Wand reflektiert. (Eigene Darstellung)

Eine didaktische Vorstufe des bildgebenden MRT-Verfahrens ist die Elektronen Spin Resonanz (ESR) zum Beispiel aus dem Bereich der analytischen Biologie [12]. Bei der ESR werden ungepaarte Elektronen magnetisch ausgerichtet, sodass die Entartung der beiden Spinzustände aufgehoben wird. Die Quantenzung der Zustände des Spins im Kontrast zu beliebiger Orientierung eines Stabmagneten gehen aus diesem Experiment hervor.

2.3. Zeeman Effekt

Durch ein Experiment zur ESR soll für die didaktische Aufbereitung des NV-Zentren Magnetometers auch der nötige Zeeman-Effekt isoliert und anschaulich dargestellt werden. Außerdem sind

mechanische abstrahierte Analogieexperimente in Planung, um das Verständnis zu erleichtern.

3. Adressatenfeld und Umsetzung

Die höchste Sichtbarkeit lässt sich mit dem NV-Zentren Magnetometer als Exponat auf Messen, Veranstaltungen, oder bei Vorträgen generieren. Für solche physikalisch recht oberflächlichen Lernumgebungen sind, prägnante Demonstratoren wie das Fluoro kit und TheLämp entstanden. Zweiteres ist eine modifizierte Taschenlampe um einen Mikrodiamenten im Kern. Geplant ist für diese Zwecke noch eine miniaturisierte Variante, um den Diamanten in einer Messsonde anwendungsbezogen zum Nachweisen von Magnetfeldern zu nutzen.

Ein zweiter Ansatz beginnt im Kontext einer freiwilligen zweiwöchigen Schülerakademie mit offenen forschenden Aufgabenstellungen um das NV-Zentrum im Kontext der Bioquantenphysik. Basierend auf diesem außerschulischen Lernort wird versucht hilfreiche Konzepte abzuleiten, um Materialien für das NV-Zentrum Magnetometer zu erarbeiten. Da einige physikalische Inhalte dieses Magnetometers nicht in Lehrplänen zu finden sind, zielen die Materialien auf den Einsatz in einem halbtägigen Schülerlabortermin ab, oder werden für Lehrkräfte in der Aus- und Fortbildung eingesetzt.

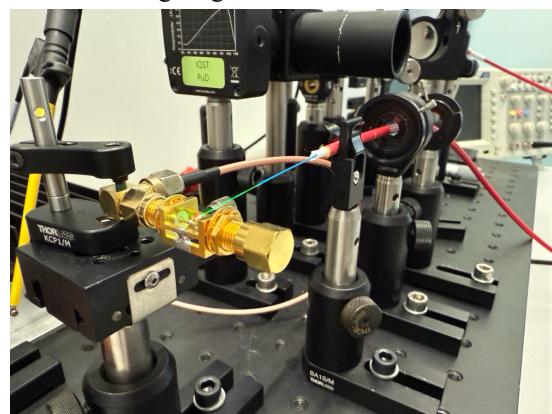


Abb. 7: Laborinspirierter ODMR Aufbau mit diskret gebauter Mikrowellenantenne und rot fluoreszierendem Diamant im Vordergrund. (Eigene Darstellung)

Der zweite inhaltlich tiefere Ansatz basiert aktuell auf einem authentischen offen aufgebauten ODMR Messstand, wie in Abbildung 7 gezeigt. Im Hintergrund verwendet dieser eine Kombination aus einer interaktiven (H5P-basierten) Lernplattform und einem interaktiven Steuerungspanel für das Experiment. Diese Werkzeuge führen die Lernenden durch jeden Schritt des NV-Zentrum-Experiments – unabhängig davon, ob sie vor Ort sind oder virtuell auf den Versuchsaufbau zugreifen. Die Lernplattform soll weitergehend sowohl praktische Anleitungen zum Aufbau und zur Justage als auch im Wechsel theoretische Hintergründe zum NV-Zentrum-Experiment sowie zu den ergänzenden Experimenten enthalten.

4. Literatur

- [1] Kultusministerkonferenz Deutschland (Hrsg.) (2020): Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. Url: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand: 4/2025)
- [2] Stadermann, H. K. E.; van den Berg, E.; Goedhart, M. J.; (2019): Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. In: Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 15, 1, Url: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130> (Stand: 4/2025)
- [3] Ziem, Florestan; (2019): Nanometric magnetic resonance imaging with a wide field of view. In: Online Publications of University Stuttgart, Url: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10497> (Stand 3/2025)
- [4] Homepage von Quantum Design (Verkäufer industrieller NV-Zentren basierten Messinstrumente): <https://qd-europe.com/de/de/produkte/magnetismus/nv-mikroskopie-stickstoff-vakanz-mikroskopie/> (Stand: 5/2025)
- [5] Bondon, Nicolas; Raehm, Laurence; Charnay, Clarence; Boukherroub, Rabah; Durand, Jaen-Oliver; (2020): Nanodiamonds for bioapplications, recent developments. In: Journal of Materials Chemistry B, 8, 48, S. 10878-10896, Url: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/tb/d0tb02221g> (Stand: 10/2024)
- [6] Haverkamp, Nils; Pusch, Alexander; Heusler, Stefan; Gregor, Markus (2022): A simple modular kit for various wave optic experiments using 3D printed cubes for education. In: Phys. Educ., 57, 2, Url: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/ac4106> (Stand: 1/2025)
- [7] Mariani, G.; Umemoto, A.; Nomura, S.; (2022): A home-made portable device based on Arduino Uno for pulsed magnetic resonance of NV centers in diamond. In: AIP Advances, 12, 065321, Url: <https://doi.org/10.1063/5.0089161> (Stand: 2/2024)
- [8] Stegemann, Jan; Peters, Marina; Horsthemke, Ludwig; Langels, Nicole; Glösekötter, Peter; Heusler, Stefan; Gregor, Markus; (2023): Modular low-cost 3D printed setup for experiments with NV centers in diamond. In: Eur. J. Phys., 44, 3, Url: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6404/acbe7c> (Stand: 10/2025)
- [9] Autschbach, Jochen; (2007): Why the Particle-in-a-Box Model Works Well for Cyanine Dyes but Not for Conjugated Polyenes. In: J. Chem. Educ., 84, 11, Url: <https://doi.org/10.1021/ed084p1840> (Stand: 11/2024)
- [10] McPherson, Peter A. C.; Alphonso, Lynsey; Johnston, Ben M.; (2024): The quantum mechanics of skincare: A context for the biochemistry curriculum. In: Biochemistry and Molecular Biology Education, 52, 4, S. 403-410, Url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bmb.21827> (Stand: 5/2025)
- [11] Homepage von Adamasnano (Hersteller NV-dotierter Mikrodiamanten): <https://www.adamasnano.com/fluorescent-microdiamond> (Stand: 5/2025)
- [12] Sahu, Indra D.; McCarrick, Robert M.; Lorigan, Gary A.; (2013): Use of EPR to Solve Biochemical Problems. In: Biochemistry, 52, 35, Url: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3839053/> (Stand: 5/2025)

Danksagung

Wir danken den Kooperationspartnern von der Hahn-Schickard-Gesellschaft, dem Institut für Intelligente Sensorik und theoretische Elektrotechnik und re:edu für die fruchtbare Zusammenarbeit. Wir danken dem BMFTR für die Förderung unter dem Förderkennzeichen 13N16731.