

# Günstige Quantenexperimente für Schulen, Hochschulen und die Industrie

## Hintergrund

Unser Konglomerat aus FH und Uni Münster, HRW-Fablab, Universität des Saarlandes und der openUC2 GmbH hat ein Würfelsystem entwickelt, mit dem, unter vielem anderem, günstige Quantenexperimente aufgebaut werden können. Ziel ist es, die Zugangsschwelle zur modernen Quantentechnologie für SchülerInnen und StudentInnen zu senken, sowie eine Prototypingplattform für die Industrie anzubieten. Eins der Experimente, die mit dem Würfelsystem aufgebaut werden können, heißt **Optically Detected Magnetic Resonance (ODMR)**. Dabei handelt es sich um einen Quantensensor, mit dem die Intensität von Magnetfeldern gemessen werden kann. Kernstück des Sensors ist ein kleiner Diamant mit NV-Zentren.

## Diamanten mit NV-Zentren

Bei NV-Zentren (nitrogen vacancy center, Stickstoff – Fehlstellen - Zentren) handelt es sich um Fehlstellen im Diamantgitter, bei denen ein Kohlenstoffatom gegen ein Stickstoffatom ausgetauscht ist und ein benachbartes Kohlenstoffatom fehlt (siehe Abb. 1). NV-Zentren fluoreszieren rot, wenn sie mit grünem Licht bestrahlt werden. Die Fluoreszenz enthält Informationen über das anliegende Magnetfeld.

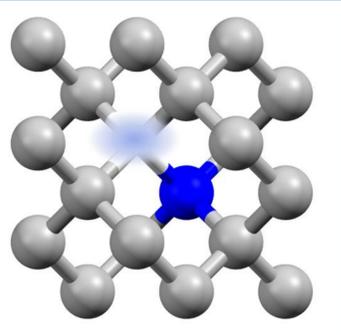


Abb. 1: NV-Zentrum, Kohlenstoffgitter mit einem Stickstoffatom (blau) und einem fehlendem Kohlenstoffatom (weiß) [1].

## Ausrichtung des NV-Zentrums

Im Kristallsystem des Diamanten gibt es vier mögliche Achsen entlang derer sich das NV-Zentrum ausbilden kann. Vor allem der parallel zur NV-Achse liegende Anteil eines angelegten Magnetfelds trägt zur Aufspaltung der Spinzustände mit  $m_s = +1 / -1$  bei.

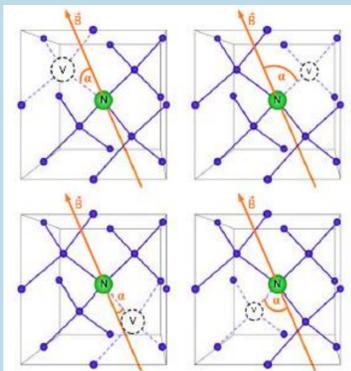


Abb. 2: Vier Ausrichtungen der NV-Zentren [2].

## Anregung und Zerfall

Durch Bestrahlung der NV-Zentren des Diamanten mit grünem Licht (532 nm) wird ein Elektron vom Grundzustand ( $^3A$ ) in den angeregten Zustand ( $^3E$ ) unter Erhaltung seines Spins angeregt. Dieser angeregte Zustand klingt unter Aussendung von rotem Licht (650 - 750 nm) oder infrarotem Licht (1042 nm) ab. Dabei zerfallen die Elektronen mit Spins  $m_s = +1 / -1$  verstärkt über den Zustand  $^1A$  unter Aussendung von infrarotem Licht. Zudem hat dieser Kanal eine längere Lebensdauer. In Konsequenz daraus vermindern Elektronen, die über diesen Kanal herabfallen, die Intensität der Fluoreszenz. Mit resonanter Mikrowellenstrahlung (blaue Pfeile) erfolgt eine Spinmanipulation von  $m_s = 0$  nach  $m_s = +1 / -1$ . Ein externes Magnetfeld führt zur Aufspaltung der  $m_s = +1 / -1$  Niveaus (Zeeman Splitting). Dadurch verschiebt sich die resonante Mikrowellenstrahlung.

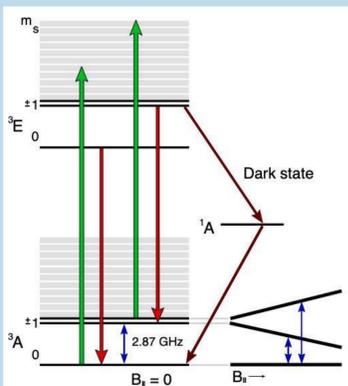


Abb. 3: Anregung und Zerfall. Der Übergang vom Grundzustand ( $^3A$ ) zum angeregten Zustand ( $^3E$ ) wird durch einen grünen Laser (typisch 532 nm, grüne Pfeile) induziert. Die rote Fluoreszenz, die vom angeregten Zustand zum Grundzustand emittiert wird, ist durch den roten Pfeil gekennzeichnet [2].

## Unsere zwei ODMR-Aufbauten

Ein Aufbau basiert auf dem Würfelsystem von openUC2, ein weiterer auf dem Morph3dBot-System. In den Aufbauten sind alle Komponenten zum Vermessen von Magnetfeldstärken verbaut:

- Diamant mit NV-Zentrum auf XY-Stage
- 532 nm Laser zur optischen Anregung
- Rotfilter zum Rausfiltern des Grünanteils
- Linsen zur Bündelung des Fluoreszenzlichtes
- Photodiode zur Detektion der Fluoreszenz
- Magnet
- Mikrowellenquelle
- Elektronik zur Auswertung und Ausgabe

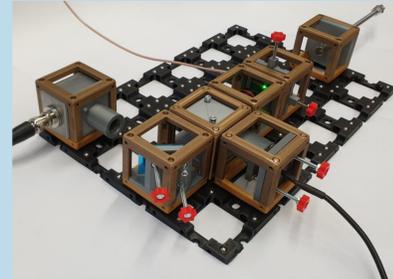


Abb. 4: ODMR Aufbau FH Münster [2].

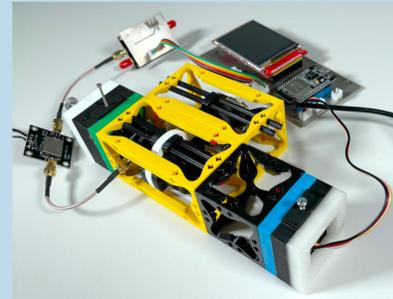


Abb. 5: ODMR-Aufbau HRW-Fablab.

## Was bewirkt die Mikrowellenanregung?

Die Bestrahlung von NV-Zentren mit Mikrowellenstrahlung im GHz Bereich regt den Übergang der Spins mit  $m_s = 0$  zu  $m_s = +1 / -1$  an, sofern die genau passende Mikrowellenfrequenz einstellt wird (Resonanz). Trifft diese Resonanzfrequenz, so nimmt die Intensität der Fluoreszenz ab.

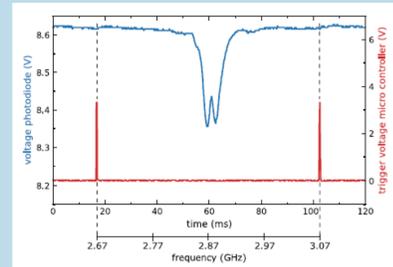


Abb. 6: ODMR Signal ohne anliegendes Magnetfeld (Zero Field Splitting) Intensitätseinbruch bei 2,87 GHz [2].

## Resonanzfrequenz und Magnetfeld

Durch ein an den Diamanten angelegtes Magnetfeld verändert sich die Frequenz der Mikrowellenstrahlung bei der die Spins von  $m_s = 0$  zu  $m_s = +1 / -1$  übergehen. Je stärker das Magnetfeld, desto mehr splitten sich die Resonanzfrequenzen für die Spins  $m_s = +1 / -1$  auf. Dies nennt man Zeeman-Aufspaltung. Da die Aufspaltung von der Ausrichtung des NV-Zentrums zum Magnetfeld abhängt, bilden sich bei einem steigenden Magnetfeld acht verschiedene Resonanzfrequenzen aus (vier räumlichen Ausrichtungen jeweils für  $m_s = +1$  und  $-1$ ).

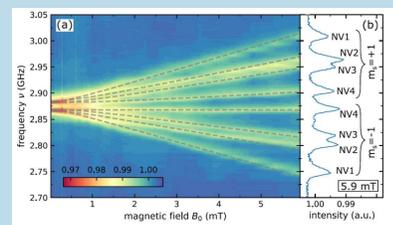


Abb. 7: Zeeman-Aufspaltung aufgrund des zunehmenden Magnetfelds. (a) Farbkiertierte ODMR-Spektren gegen das entsprechende Magnetfeld aufgetragen. (b) Das ODMR-Spektrum für ein maximales Magnetfeld von 5,9 mT zeigt die acht unterscheidbaren dips [2].

## Quellen

- [1] Badgerchap ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NV\(100\)withVacancy.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NV(100)withVacancy.png)), <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>.  
[2] Jan Stegemann et al. „Modular low-cost 3D printed setup for experiments with NV centers in diamond“. In: *European Journal of Physics* 44 (2023), S. 035402. DOI: 10.1088/1361-6404/acbe7c.