

Stickstoff-Fehlstellen-Diamant als Grundlage für Quantensensoren zweiter Generation

Stickstoff-Fehlstellen(NV)-Zentren in einem Diamantgitter sind erfolgreich in diversen Versuchen als Quanten-Magnetfeldsensoren zweiter Generation eingesetzt worden. Die Elektronenspinzustände der Elektronen in den Fehlstellen können bei Raumtemperatur durch Mikrowellenpulse manipuliert und optisch ausgelesen werden. Das Auslesen der Spinzustände erlaubt potentiell hochsensible Messungen die Vergleichbar sind mit denen von etablierteren Methoden wie supraleitenden Quanteninterferenzgeräten (SQUID), oder optisch gepumpte Magnetometer (OPM) [1]. Aufgrund der vergleichsweise Temperaturunabhängigkeit, und der prinzipiell nur aus wenigen Atomen bestehenden Messspitze, ist ein deutlich kompakterer, räumlich sehr hoch aufgelöster und genauer Sensor möglich.

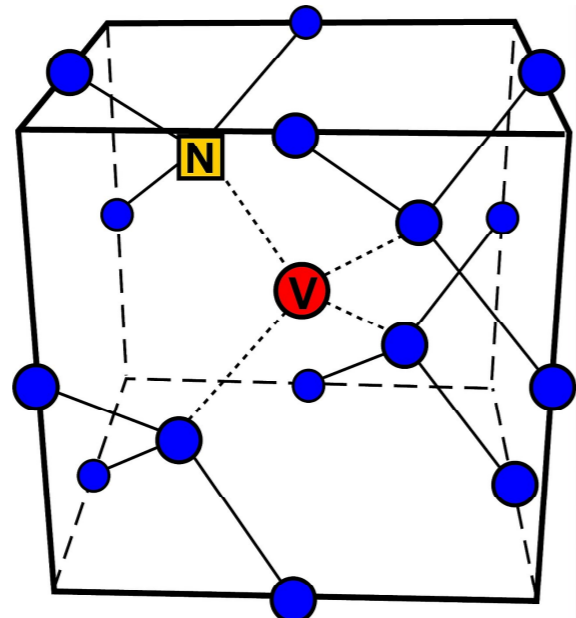


Abbildung 1: Darstellung eines Kohlenstoff-Diamantgitters mit einem Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum.

Stromverteilungen treten in allen Lebensbereichen auf. Neben technischen Anwendungen finden sich komplexe räumliche Stromverteilungen auch in natürlichen und biologischen Prozessen wieder. Strom fließt auch im menschlichen Körper an vielen Stellen und kann wichtige Aussagen über Gesundheit und Funktion liefern. Der Strom im Herzen ist noch besonders stark und wird entsprechend häufig in Form eines Elektrokardiogramms (EKG) indirekt betrachtet. In den Muskeln und im Gehirn fließen Ströme in kleineren Größenordnungen auf räumlich verteiltem Raum. Hier ist das Messen, besonders das der Hirnströme, schwieriger. Der Strom einzelner Nerven befindet sich am untersten Ende der Stärkeskala und eine räumliche Trennung einzelner Stränge wird wegen der geringen Größe stark erschwert [2].

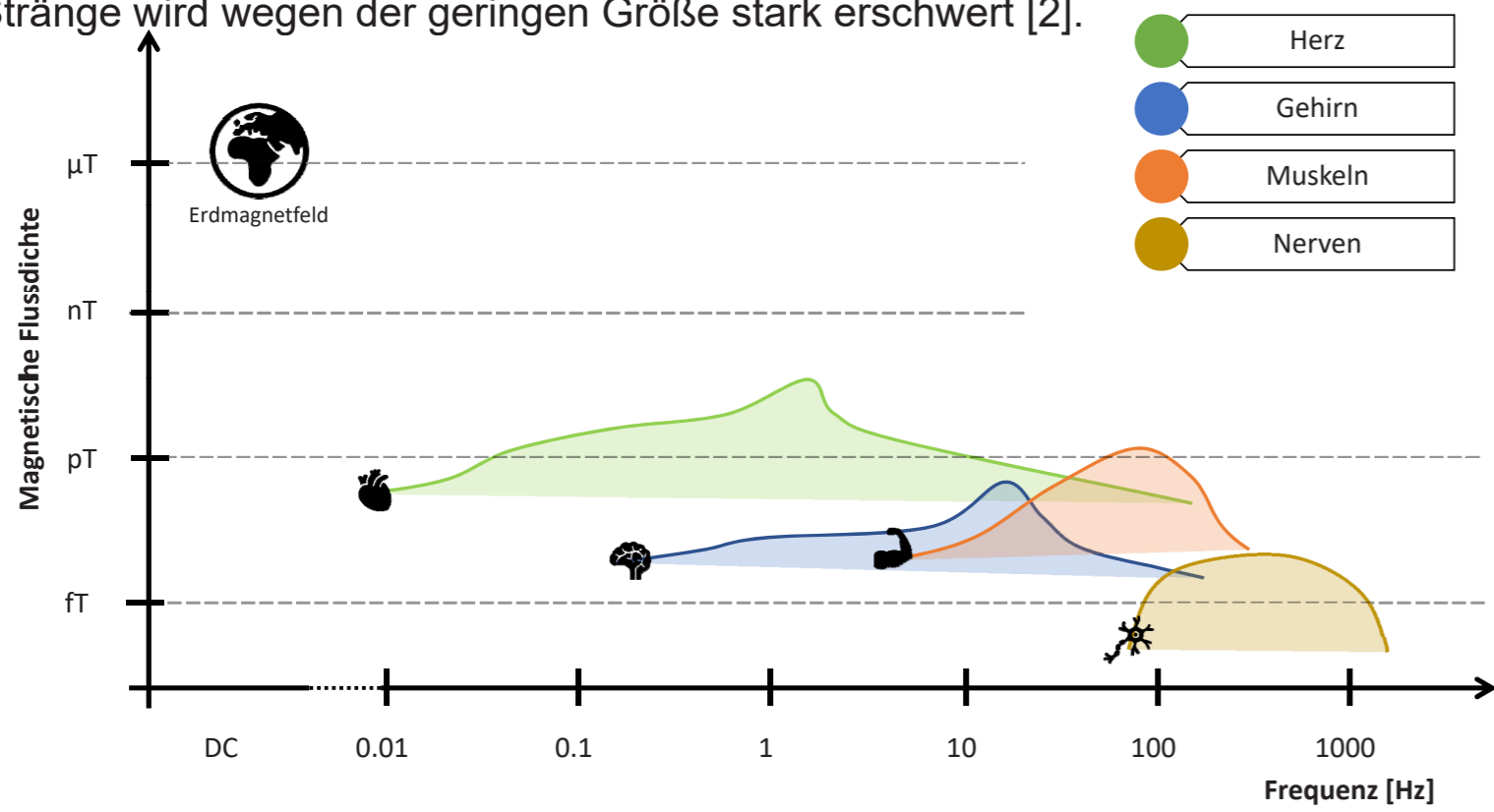


Abbildung 2: Magnetische Flussdichten von biologischen Strömen gemessen an der Hautoberfläche.

Quantenbasierte Magnetographie

Das indirekte Messen kardialer Ströme über Magnetfelder an der Oberfläche hat gegenüber anderen Methoden einige Vorteile. Ein wichtiger Vorteil ist das die Messung nicht-invasiv stattfinden kann und die räumliche Auflösung im Vergleich zu anderen Methoden sehr hoch sein kann. Allein durch diese Besonderheiten, ist es möglich eine genauere und einfachere Kontrolle oder Diagnose an biologischen Strömen durchzuführen. Unser Ziel ist die Messung von biologischen Strömen über das Magnetfeld in Form der Magnetkardiographie (MKG), oder Magnetoenzephalographie (MEG) [3]. Dazu verwenden wir die magnetometrischen Eigenschaften der NV-Fehlstellen und erreichen potentiell ein Messgerät das ohne Extremkühlung und Vakuum auskommt und so in der Zukunft teure und sperrige Geräte wie einen SQUID ersetzen kann.

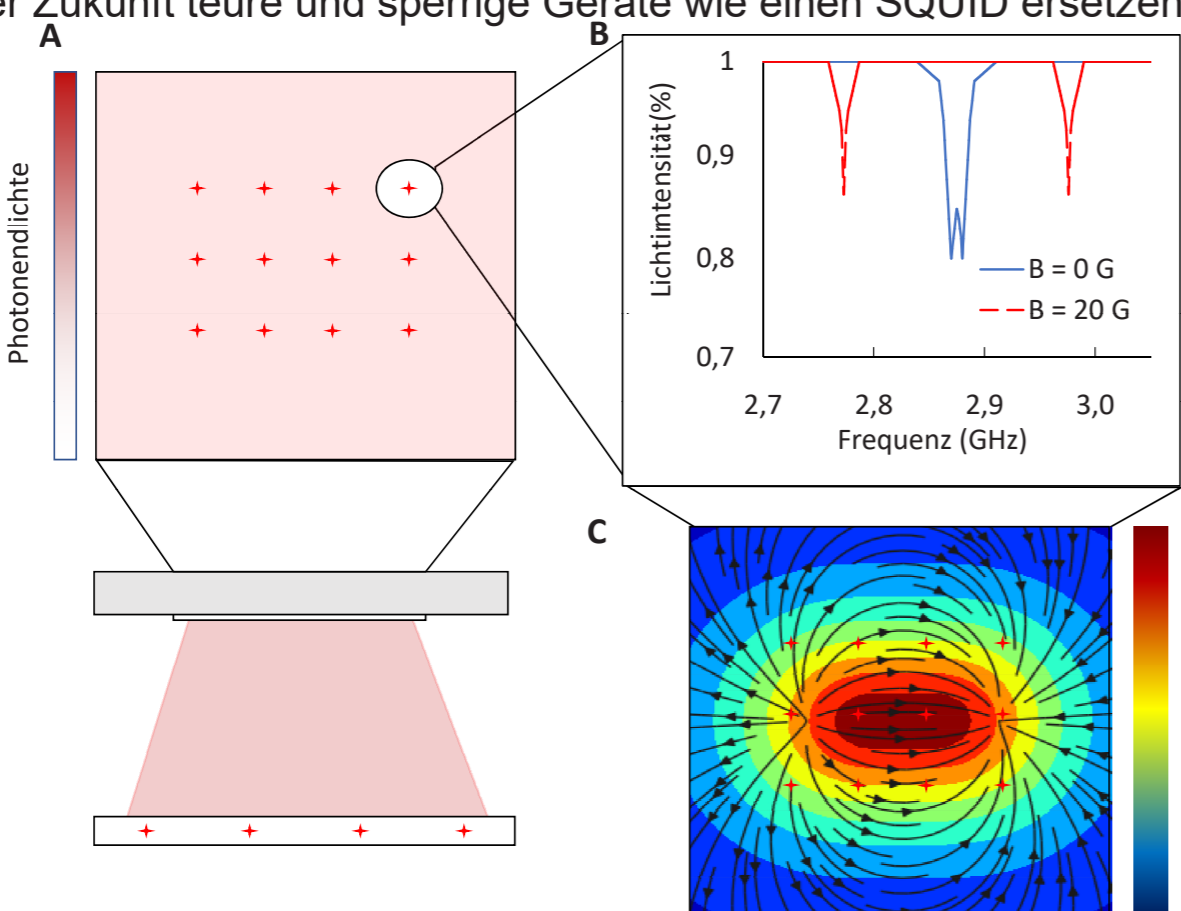


Abbildung 3: (A) Optische Darstellung der NV-Zentren auf dem Bildsensor. (B) Auswertung einer einzelnen Fehlstelle. Die Distanz zwischen den Intensitätsminima in der Frequenz ist proportional zu dem angelegten Magnetfeld. (C) Aus allen Fehlstellen rekonstruiertes Magnetfeld.

Ansatz und Aufbau

Üblicherweise werden Laborversuche zur Erforschung der NV-Fehlstellen-Magnetometrie mit kontrolliert gezüchteten CVD(Chemical Vapor Deposition)-Diamanten durchgeführt. In diesen Diamanten ist die Ausrichtung der Elektronenspins bekannt. Für den vorliegenden Ansatz verwenden wir hingegen Mikrodiamanten, in denen die Fehlstellen unbekannt orientiert und in größeren Mengen vorliegen. Die NV-Ensembles haben eine stärkere Fluoreszenz, aber die Auswertung und Übertragung von optischer Messung in Magnetfeldstärke ist aufwändiger. Die Mikrodiamanten kosten jedoch nur einen Bruchteil (Faktor 1000) der kontrollierten Diamanten und eignen sich so besonders für industrielle Anwendungen, sofern es gelingt die Nachteile durch eine intelligente Auswertung auszugleichen. Die Fluoreszenz wird durch den Zeeman-Effekt bei unterschiedlichen, bestimmten Mikrowellenfrequenzen abhängig vom externen Magnetfeld, gedämpft. Auf dem angeschlossenen Kamerasystem wird die Fluoreszenz der einzelnen Mikrodiamanten räumlich getrennt deutlich abgebildet.

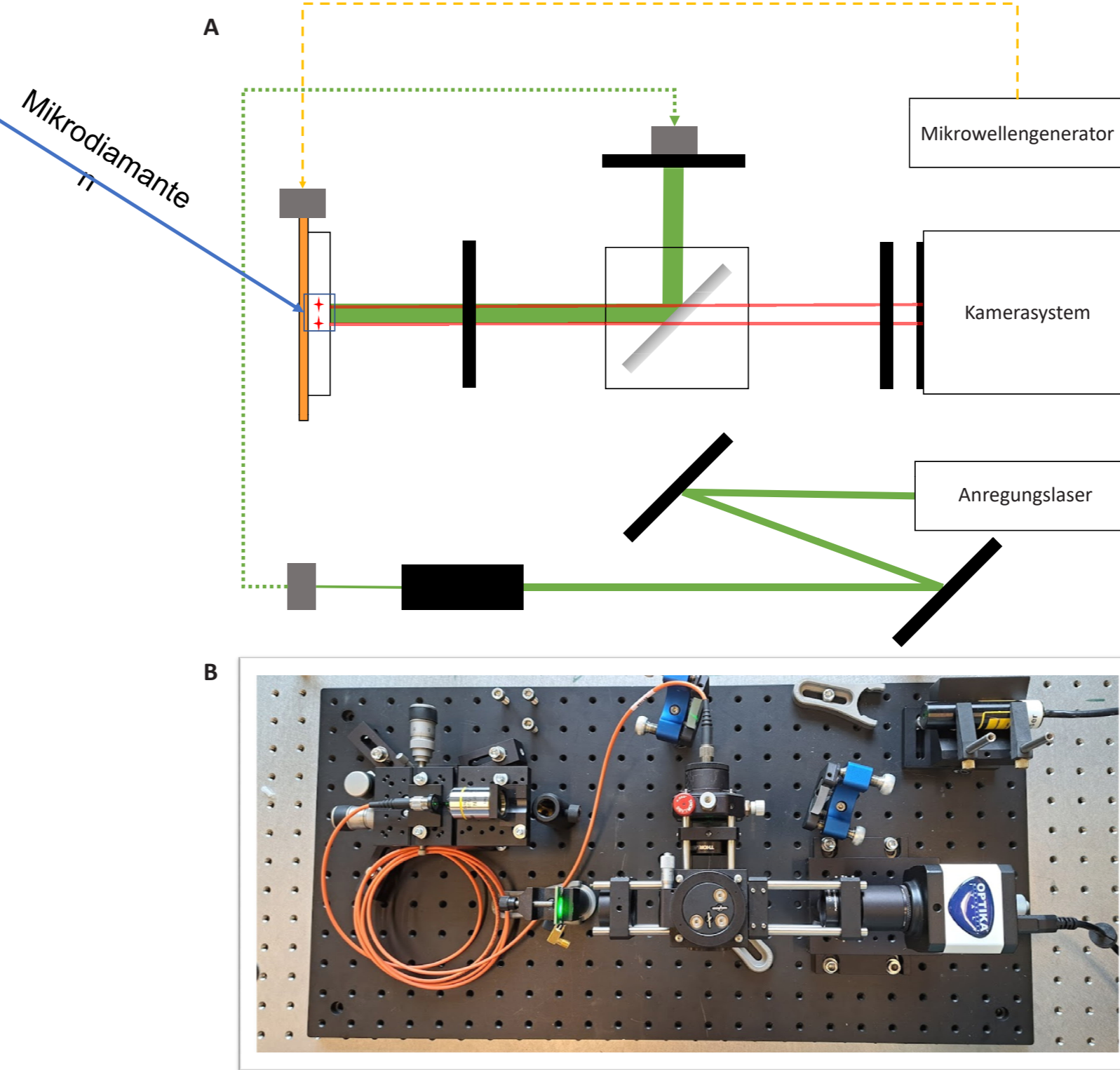


Abbildung 4: (A) Schematischer Aufbau des Quantensensoraufbaus. (B) Draufsicht auf den Aufbau. Ein 532 nm DPSS Laser (ca. 5 mW) wird über mehrere Optiken in eine Faser eingekoppelt und vergrößert über einen dichromatischen Spiegel auf NV-Fehlstellen-Mikrodiamanten geführt. Die Fluoreszenz der Fehlstellen (ca. 623 nm) wird durch den Spiegel geleitet und durch einen 600 nm Hochpassfilter auf eine Kamera gelenkt. Die Mikrowellenanregung wird über eine Stripline übertragen, auf die die Mikrodiamanten aufgeklebt sind.

Ausblick

Für eine **stabile Fluoreszenz** ist eine Anregung mit einem stabilen Laser nötig. Bei manchen nicht Temperaturregulierten, oder bei bestimmten gepulsten Laser, ist es nötig nicht nur die Fluoreszenz, sondern auch die Stärke des Anregungslasers zu messen und in der Auswertung Schwankungen zu kompensieren. Dafür kein ein Bruchteil der Laserleistung einer Photodiode zugeführt und Leistungsschwankungen überwacht werden. Das für die Auswertung nötige **Kamerasystem** muss mehrere besondere Anforderungen erfüllen. Zum einen ist eine hohe Bittiefe nötig, um die Fluoreszenz ausreichend zu diskretisieren. Je nach Dichte an Mikrodiamanten ist auch eine hohe Auflösung nötig, um die Fluoreszenz ausreichend voneinander abzugrenzen. Ist das Ziel nicht statische Magnetfelder zu betrachten kommt eine extreme Anforderung an die Bildrate hinzu. Für eine Messung eines Feldes mit 50 Hz, muss eine Kamera in der Lage sein, mit mindestens doppelter Rate von 100 Hz, die Fluoreszenz bei ausreichenden Messpunkten der Mikrowellenfrequenz durchzuführen. Ausgehend davon, dass wir einen kleinen Mikrowellenbereich betrachten, ist immer noch eine Bildrate zur Erfassung von deutlich über Zehn Mikrowellensamples pro Hz nötig, um eine Messung durchzuführen. Durch die zufällige Verteilung der NV-Fehlstellen in den Mikrodiamanten und den zu erwartenden hohen Bildraten, ist eine **intelligente Signalverarbeitung** zwingend notwendig. Ziel ist eine Echtzeit-Rekonstruktion des gemessenen Magnetfeldes.

Literatur

- Casola, F., van der Sar, T. & Yacoby, A. Probing condensed matter physics with magnetometry based on nitrogen-vacancy centres in diamond. *Nat Rev Mater* 3, 17088 (2018). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.88>
- Malmivuo, Jaakko & Plonsey, Robert. *Bioelectromagnetism - Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*. (1995). <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195058239.001.0001>.
- Zuo, S., Heidari, H., Farina, D., Nazarpour, K., Miniaturized Magnetic Sensors for Implantable Magnetomyography. *Adv. Mater. Technol.* 5, 2000185 (2020). <https://doi.org/10.1002/admt.202000185>

Thomas Thuilot, Thomas.Thuilot@hs-ruhrwest.de
Andreas Hennig, Andreas.Hennig@hs-ruhrwest.de