

Nullfeld-Magnetfeldkamera

Ronja Rasser^{1,2}, Peter A. Koss¹, Svenja Knappe^{3,4} und Karsten Buse^{1,2}

¹*Fraunhofer Institut für physikalische Messtechnik IPM, Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg im Breisgau, Deutschland*

²*Laboratory for Optical Systems, Institut für Microsystems Engineering IMTEK, University of Freiburg, Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg im Breisgau, Deutschland*

³*Paul M. Rady Department of Mechanical Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1111 Engineering Drive, 80309, USA*

⁴*FieldLine Inc., Boulder, 371 Centennial Parkway, Louisville, Colorado 80027, USA*

Zusammenfassung

Optisch gepumpte Magnetometer (OPMs) ermöglichen hochempfindliche Magnetfeldmessungen im Pikotesla-Bereich ohne kryogene Kühlung. In dieser Arbeit wird eine abbildende Magnetfeldkamera vorgestellt, die auf einem optisch gepumpten Nullfeldmagnetometer basiert und räumlich aufgelöste Magnetfeldmessungen erlaubt. Das System nutzt eine optische Lock-in-Kamera mit über 270.000 Pixeln zur bildgebenden Detektion des einem Lichtstrahl aufgeprägten Magnetfeldsignals einer MEMS-gefertigten Rubidiumdampfzelle. Ein speziell entwickeltes nichtmagnetisches Baukastensystem ermöglicht die Montage und Justage der Optik innerhalb der magnetischen Abschirmung. Erste Charakterisierungen zeigen Bandbreiten von bis zu 560 Hz und eine Rauschdichte von 270 pT/√Hz bei einer Mittelung über 20×20 Pixel. Diese Mittelung entspricht einem Dampfvolumen von 80 μm × 80 μm × 300 μm. Im Ausblick wird ein neuartiges Abschirmkonzept vorgestellt: Eine kompakte Spritzbeschichtungs-Abschirmung, die nur die Dampfzelle und die zu vermessende Probe umschließt. Dies ermöglicht zukünftig eine deutliche Reduzierung des Volumens von Systemen mit Nullfeldmagnetometern. Die Kombination aus orts aufgelöster Magnetfeldmessung und kompakter Bauweise eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten in der zerstörungsfreien Prüfung und Materialcharakterisierung.

Keywords: Magnetometer, Kamera, Magnetische Abschirmung, Magnetfeldbildgebung

Einleitung

Die hochempfindliche Messung magnetischer Felder ist in zahlreichen Anwendungsbereichen von Bedeutung – von der biomedizinischen Diagnostik über die zerstörungsfreie Prüfung bis zur Grundlagenforschung. Optisch gepumpte Magnetometer (OPMs) haben sich in den letzten Jahren als vielversprechende Alternative zu supraleitenden Quanteninterferenz-Detektoren (SQUIDs) etabliert, da sie vergleichbare Empfindlichkeiten erreichen können, ohne auf kryogene Kühlung angewiesen zu sein [1,2]. Neben Einzelpunktmessungen gewinnt die orts aufgelöste Abbildung von Magnetfeldern zunehmend an Bedeutung. Durch die Verwendung einer einzelnen großflächigen Dampfzelle in Kombination mit Mehrkanaldetektoren können räumliche Magnetfeldverteilungen simultan erfasst werden [3,4].

Das Funktionsprinzip eines OPMs basiert auf der Wechselwirkung zwischen polarisiertem Licht und einem atomaren Dampf, typischerweise Rubidium oder Cäsium. Ein

zirkular polarisierter Laserstrahl wird durch ein mit Alkalidampf gefülltes Volumen geleitet. Das optische Pumpen versetzt die Atome in einen spinpolarisierten Zustand: Durch die Absorption von Photonen wird der Drehimpuls des Photons auf die Alkaliatome übertragen und orientiert den atomaren Spin entlang der Strahlrichtung.

In Anwesenheit eines externen Magnetfeldes präzedieren die atomaren Spins um die Magnetfeldrichtung (Larmor-Präzession). Diese Präzession verändert die optischen Eigenschaften des Dampfes. Durch Beobachtung der Transmission kann das Magnetfeld gemessen werden. Alternativ kann die Drehung der Polarisation eines zweiten schwächeren linearpolarisierten Lasers zum Messen des Magnetfeldes genutzt werden.

Eine besonders empfindliche Betriebsart ist das Nullfeldmagnetometer. Hierbei wird das Magnetometer in einer Umgebung betrieben, in der das Hintergrundmagnetfeld auf wenige Nanotesla kompensiert ist. In diesem Regime werden störende Spin-Austausch-Relaxationsprozesse unterdrückt, was zu einer drastisch erhöhten Empfindlichkeit führt [5].

Die Notwendigkeit eines nahezu feldfreien Bereichs stellt jedoch eine zentrale Herausforderung dar: Das Erdmagnetfeld von etwa $50 \mu\text{T}$ muss um mehrere Größenordnungen abgeschirmt werden. Konventionelle Lösungen verwenden großvolumige, mehrlagige Abschirmkammern aus hochpermeablem Material (Mu-Metall), was die Systemgröße und -kosten erheblich beeinflusst.

Aufbau der Magnetfeldkamera

Die entwickelte Magnetfeldkamera erweitert das Prinzip des OPMs um die Fähigkeit zur orts aufgelösten Magnetfeldmessung. Anstelle eines einzelnen Detektors wird eine Lock-in-Kamera (Heliotis C4.0-S40U) mit 512×542 Pixeln eingesetzt. Da jeder Pixel das Magnetfeldsignal eines kleinen, ihm zugeordneten Bereichs des projizierten Dampfolumens detektiert, entsteht eine zweidimensionale Magnetfeldkarte. In die Dampfzelle wird zusätzlich Stickstoff gefüllt, um die Diffusion der Rubidiumatome zu verlangsamen und dadurch die Mischung der Signale benachbarter Pixel zu vermeiden.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des optischen Systems. Der Laserstrahl wird aus einer optischen Faser ausgekoppelt und auf einen Durchmesser von etwa 8 mm kollimiert. Nach Passage durch einen polarisierenden Strahlteiler und einer $\lambda/4$ -Wellenplatte wird das Licht zirkular polarisiert. Der Strahl durchläuft die Rubidiumdampfzelle, wird an einem rückseitigen dielektrischen Spiegel reflektiert und passiert die Zelle ein zweites Mal (Doppelpass-Konfiguration). Dies verdoppelt die effektive Wechselwirkungslänge. Nach erneuter Passage durch Wellenplatte und Strahlteiler wird der Strahl auf die Lock-in-Kamera abgebildet. Die Kamera befindet sich aufgrund ihres Magnetfelds außerhalb der Abschirmung. Die Koordinatenachsen sind so definiert, dass sich der Laserstrahl entlang der z-Achse ausbreitet. Das Magnetfeld wird in der xy-Ebene gemessen.

Da sich das optische System innerhalb der magnetischen Abschirmung befindet, müssen alle Komponenten nichtmagnetisch sein. Standardoptikhalterungen aus Stahl sind aufgrund des Eisengehalts ungeeignet. Auch Aluminiumlegierungen können problematisch sein, da große Metallvolumina durch Wirbelströme magnetisches Rauschen erzeugen können. Daher wurde ein modulares Baukastensystem aus gefrästen und 3D-gedruckten Kunststoffhalterungen entwickelt. Abbildung 2 zeigt ein Foto des optischen Systems, welches aus nichtmagnetischen Bauteilen konstruiert wurde.

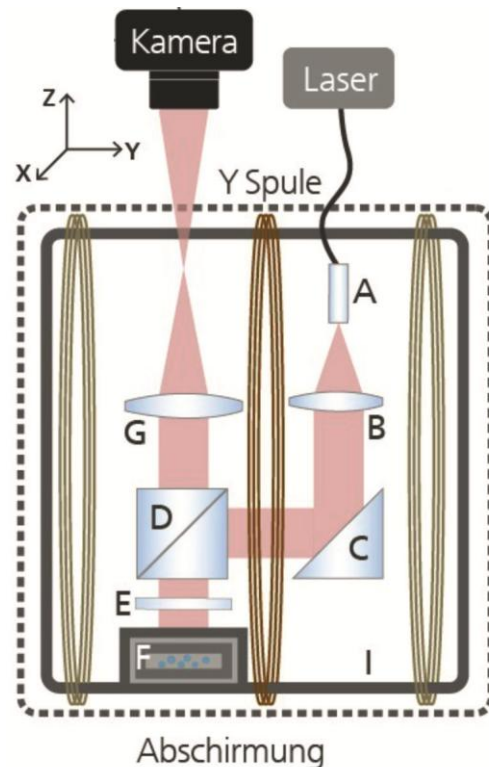


Abb. 1: Optisches System: Faserkoppler (A), Kollimationslinse (B), Spiegel (C), polarisierender Strahlteiler (D), $\lambda/4$ -Wellenplatte (E), Dampfzelle im Gehäuse (F), Abbildungslinse (G) und Halterungen für die Abschirmungsmontage (I).

Das optische System umfasst Halterungen für Linsen, Strahlteiler, Wellenplatten sowie einen Adapter für die optische Faser. Die Halterungen werden mit 6-mm-Stäben verbunden und sind kompatibel zum 30-mm-Cage-System, was die Verwendung von Standard-Ausrichtungswerkzeugen ermöglicht. Vor dem Einbau wurden alle Bauteile in einer geschirmten Kammer mit einem Fluxgate-Magnetometer (Auflösung: $0,1 \text{ nT}$) geprüft. Bauteile, die eine messbare Feldänderung im Nanoteslabereich erzeugten, wurden aussortiert.

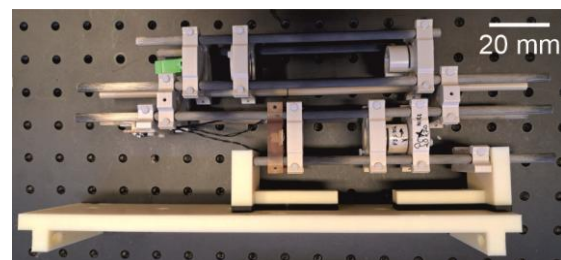


Abb. 2: Foto des nichtmagnetischen optischen Systems

Die Rubidiumdampfzelle wurde mittels MEMS-Technologie gefertigt. Sie besitzt eine nutzbare Fläche von 4 mm Durchmesser. Ein kleiner Abstand zu den zu untersuchenden Objekten und eine geringe Dicke der Zelle sind essenziell für eine gute räumliche Auflösung von Magnetfeldern. Daher wurde die Dicke der Dampfzelle auf 300 µm reduziert. Ein Kamerapixel misst die Magnetfeldreaktion eines Dampf Volumens von etwa $8\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$. Die Zelle wird auf 120 – 160 °C Betriebstemperatur geheizt, um einen ausreichenden Rubidiumdampfdruck zu erzeugen. Die Heizung erfolgt mit einem 100-kHz-Wechselstrom, dessen hohe Frequenz außerhalb des Messbereichs liegt und somit wenige Störsignale verursacht.

Die magnetische Abschirmung besteht aus vier konzentrischen Mu-Metall-Zylindern mit beidseitigen Deckeln [6]. Der Schirmfaktor beträgt im Bereich 0–10 Hz etwa $3\text{--}4 \times 10^6$. Integrierte Spulen ermöglichen die Kompensation des Restfeldes sowie das Anlegen definierter Referenz- und Gradientenfelder. Für die Magnetfeldmessung wird ein Modulationsverfahren eingesetzt: Die zu messende Feldkomponente (Y-Komponente) wird mit einer definierten Frequenz moduliert und das resultierende Signal mittels Lock-in-Technik ausgewertet. Die Lock-in-Kamera führt diese Demodulation parallel für alle Pixel durch.

Erste Ergebnisse

Das System zeigt ein Tiefpassverhalten mit einer 3-dB-Grenzfrequenz von 390 Hz bei einer Modulationsfrequenz von 1330 Hz bzw. 560 Hz bei 2330 Hz Modulationsfrequenz. Die Rauschdichte verbessert sich durch Zusammenfassen mehrerer Pixel („Binning“) proportional zu $1/n$, wobei n die Anzahl der Pixel pro Bin ist. Dies deutet auf räumlich und zeitlich unkorreliertes Rauschen hin. Bei einer Binngröße von 20×20 Pixeln, bzw. Dampf volumen von $80\text{ }\mu\text{m} \times 80\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$, wird eine Rauschdichte von 270 pT/√Hz erreicht. Die Kamera kann räumliche Magnetfeldgradienten auflösen. Messungen eines oszillierenden Gradienten zeigen gute Übereinstimmung mit Simulationsergebnissen der verwendeten Gradientenspule.

Ausblick: Kompakte Spritzbeschichtungs-Abschirmung

Konventionelle magnetische Abschirmungen für OPMs umschließen das gesamte optische Messsystem. Dies führt zu großen Bauvolumina und schränkt die Anwendungsmöglichkeiten ein. Daher entwickeln wir derzeit ein neuartiges

Abschirmkonzept: Eine kompakte Abschirmung, die nur die Dampfzelle und die zu vermessende Probe umgibt (Abbildung 3).

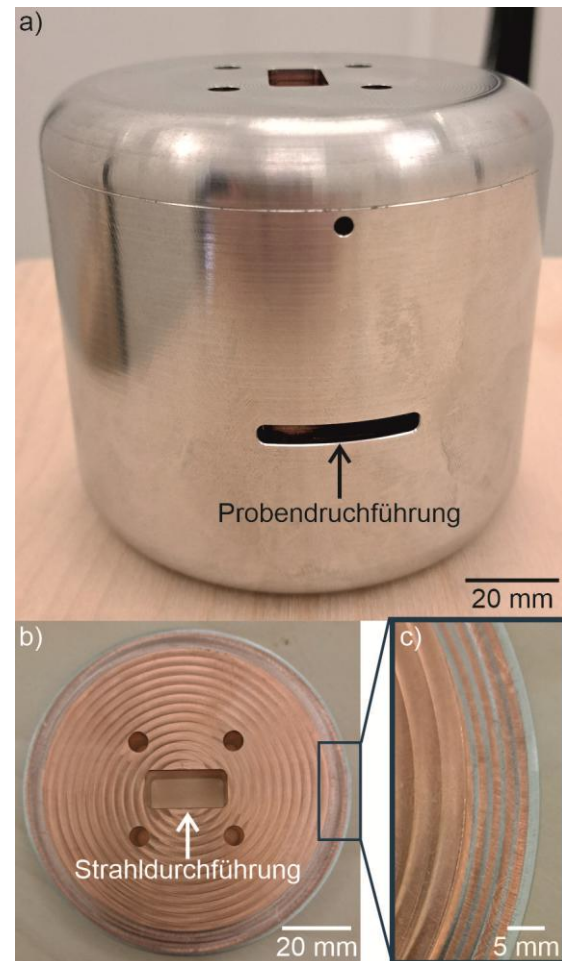


Abb. 3: Kompakte Abschirmung mit Spritzbeschichtung (a). Deckel der Abschirmung von innen (b) und Querschnitt durch Beschichtungen (c). Die Abschirmschichten werden auf einen Kupferträger aufgebracht und umschließen nur Dampfzelle und Probe.

Die Abschirmschichten werden mittels thermischer Spritzbeschichtung aufgebracht. Dieses Verfahren ermöglicht die Beschichtung komplexer Geometrien und bietet Flexibilität bei der Materialwahl und Schichtdicke. Der Schichtaufbau besteht aus vier alternierenden Lagen von 600 µm Reineisen und 1000 µm Reinkupfer. Zum Abschluss wurde eine Schicht 1.4404 Stahl der Dicke 1500 µm aufgetragen.

Die ferromagnetischen Schichten sorgen für die magnetische Abschirmung bei niedrigen Frequenzen durch Flussführung. Die leitfähigen Zwischenschichten tragen durch Wirbelstromeffekte zur Abschirmung bei höheren Frequenzen bei. Die Stahlschicht

dient in erster Linie als Schutzschicht für die Schirmung.

Erste Untersuchungen an Testproben zeigen vielversprechende Ergebnisse [7]: Spritzbeschichtete Eisenschichten auf Aluminiumsubstrat weisen einen signifikanten Abschirmeffekt auf. Die Abschirmwirkung verbessert sich mit zunehmender Schichtdicke und zeigt oberhalb von 100 Hz durch den Beitrag des leitfähigen Substrats eine deutliche Steigerung.

Zusammenfassung

Es wurde eine Magnetfeldkamera auf Basis eines optisch gepumpten Nullfeldmagnetometers entwickelt. Die Kombination aus Lock-in-Kamera-Detektion und nichtmagnetischem Optikbaukasten ermöglicht orts aufgelöste Magnetfeldmessungen mit hoher Pixelzahl. Im nächsten Entwicklungsschritt wird die konventionelle Abschirmung durch eine kompakte Spritzbeschichtungs-Abschirmung ersetzt. Diese umschließt nur die Dampfzelle und Probe, was das Systemvolumen deutlich reduziert und neue Anwendungsmöglichkeiten in der zerstörungsfreien Prüfung eröffnet.

Literaturnachweis

- [1] Budker, D., Romalis, M. Optical magnetometry. *Nature Phys* **3**, 227–234 (2007). DOI: 10.1038/nphys566
- [2] Kominis, I., Kornack, T., Allred, J. *et al.* A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer. *Nature* **422**, 596–599 (2003). DOI: 10.1038/nature01484
- [3] Young Jin Kim, Igor Savukov, Shaun Newman; Magnetocardiography with a 16-channel fiber-coupled single-cell Rb optically pumped magnetometer. *Appl. Phys. Lett.* 8 April 2019; 114 (14): 143702. DOI: 10.1063/1.5094339
- [4] Rasser, R., Koss, P.A., Knappe, S. *et al.* Towards a multi-channel zero-field optically pumped magnetometer for imaging. *EPJ Quantum Technol.* **12**, 101 (2025). DOI: 10.1140/epjqt/s40507-025-00400-y
- [5] T. Tierney, N. Holmes, S. Mellor *et al.* Optically pumped magnetometers: From quantum origins to multi-channel magnetoencephalography, *Neuroimage* **199**, 598-608 (2019), DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.05.063.
- [6] Twinleaf MS-2 Magnetic Shield, <https://twinleaf.com/shield/MS-2/> Abgerufen: 10/04/2026
- [7] P. A. Koss *et al.*, Designing magnetic shielding for space applications using spray coating technology, International Astronautical Congress, IAC-24,C2,6,3,x82727 (2024)