

# Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

## Institut für Physik

### Fachgebiet: Experimentalphysik

Betreuer: Prof. Dr. Friedemann Reinhard  
Paul Leonhard Weinbrenner  
(e-mail: paul.weinbrenner@uni-rostock.de)

## Nanoscale Sensing With Near-Surface Optical Emitters

### Englische Zusammenfassung

Nanoscale sensing with optical emitters holds extraordinary promise across physics, chemistry, biology, and material science. Through the works comprising this thesis, it advances the field on three interconnected fronts, addressing key challenges in sensitivity, spatial resolution, and the development of novel sensing platforms.

First, a new nanoscale imaging technique based on planar scanning probe microscopy with nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond is demonstrated for direct, nanoscale vector magnetic field imaging. By utilizing multiple near-surface NV centers in a single scanning probe the vector field of magnetic vortices in a magnetic multilayer structure is resolved with sub-100 nm resolution. Compared to conventional tip-based scanning probe microscopy, the new approach allows better reconstruction of nanoscale magnetization and current densities. More broadly, the work paves the way for advanced multi-NV measurement schemes, highly parallel imaging and a new generation of planar sensors for scanning probe microscopy.

The second work improves the efficiency of optical readout of near-surface NV centers and solid-state emitters in general. Quantitative photon emission analysis and analytical modeling show that the planar diamond surface strongly modifies the emission of shallow NV centers. Because of this dielectric antenna effect, high photon collection efficiencies, surpassing solid-immersion lenses by up to 96 % are achieved in a back-side detection geometry, which is well suited for nanoscale sensing applications. Furthermore, spherical aberrations are identified as a bottleneck for exploiting this effect with confocal detection and correction optics are proposed to overcome this problem.

The last part of this work advances the development of encapsulated organic dye molecules, located directly at the surface as new, highly promising nanosensors. Microspacing in-air sublimation is introduced as a new method for the simple and clean deposition of perylenetetracarboxylic diimide (PTCDI) on hexagonal boron nitride (hBN) surfaces. Fluorescence and atomic force microscopy combined with simulations show the formation of few-layer molecular islands, aligned with respect to the hBN substrate. Scaling to the single-molecule level and subsequent encapsulation with hBN can produce photostable optical emitters with extreme surface proximity. The potential for optical spin state readout positions this platform as a new quantum sensor with unprecedented spatial resolution.

With the development of a new measurement technique and sensing platform, these contributions advance nanoscale sensing within their specific fields and more broadly, because of the generality of the results and developed methods for other types of optical emitters.

## Deutsche Zusammenfassung

Nanoskalige Sensorik mit optischen Emittlern hat außerordentliches Potenzial für Physik, Chemie, Biologie und Materialwissenschaften. Die Arbeiten dieser Dissertation stellen einen Fortschritt des Forschungsfeldes in drei miteinander verbundenen Gebieten dar. Dabei befassen sie sich mit zentrale Herausforderungen hinsichtlich Empfindlichkeit, räumlicher Auflösung sowie der Entwicklung neuartiger Sensoren.

Erstens, wird ein neues nanoskaliges Bildgebungsverfahren basierend auf planarer Rastersondenmikroskopie mit Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren) in Diamant für die direkte, nanoskalige Vektormagnetfeldbildgebung demonstriert. Durch die Verwendung mehrerer oberflächennaher NV-Zentren in einer Rastersonde wird das Vektorfeld magnetischer Vortizes in magnetischen Schichten mit einer Auflösung unter 100 nm abgebildet. Verglichen mit konventionellen Rastersonden ermöglicht der neue Ansatz eine bessere Rekonstruktion nanoskaliger Magnetisierungs- und Stromdichteverteilungen. Weiterhin ermöglicht diese Arbeit fortgeschrittene Multi-NV Messverfahren, parallelisierte Bildgebung und eine neue Generation planarer Sensoren als Rastersonden.

Die zweite Arbeit verbessert die optischen Auslese oberflächennaher NV-Zentren und anderer Festkörperemitter. Quantitative Analyse der Lichtemission und analytische Modellierungen zeigen, dass die Diamantoberfläche die Emission flacher NV-Zentren erheblich beeinflusst. Aufgrund dieser dielektrischen Antenne erreicht die rückseitige Detektion eine hohe Photonensammeleffizienz, welche Festkörperimmersionslinsen um bis zu 96 % übertrifft. Sphärische Aberrationen werden als limitierender Faktor bei der Ausnutzung dieses Effekts mit konfokaler Detektion identifiziert und Korrekturoptiken werden vorgeschlagen, um dieses Problem zu überwinden.

Der letzte Teil widmet sich der Entwicklung eingekapselter organischer Farbstoffmoleküle, unmittelbar an der Oberfläche, als vielversprechende Nanosensoren. Mikropalt-Sublimation an Luft wird als neues Verfahren zur einfachen und sauberen Abscheidung von PTCDI Molekülen auf hexagonalen Bornitrid Oberflächen (hBN) eingeführt. Fluoreszenz- und Rasterkraftmikroskopie zusammen mit Simulationen zeigen die Bildung von wenige Lagen dicker, molekularer Inseln, welche relativ zum hBN-Substrat ausgerichtet sind. Eine Skalierung hin zu einzelnen Molekülen und anschließende Einkapselung mit hBN kann photostabile optische Emitter direkt an der Oberfläche erzeugen. Das Potenzial der optischen Auslese von Spinzuständen verspricht Quantensensorik mit bisher unerreichter räumlicher Auflösung. Mit diesen Entwicklungen trägt diese Arbeit nicht nur innerhalb ihrer jeweiligen Fachgebiete bei, sondern auch darüber hinaus, aufgrund der Allgemeinheit der Ergebnisse und der entwickelten Methoden für andere optische Emitter.