

Forschungsschwerpunkte – Professor Jörg Wrachtrup

Die Verbindung von Quanten- und Atomoptik mit der Festkörperphysik hat zu einem neuen Forschungsfeld geführt: der Festkörper-Quantenoptik und Quantenspintronik. Durch eine hochpräzise Herstellung beziehungsweise Strukturierung von Festkörpern und ihre Einbettung in photonische Strukturen kann beispielsweise die Licht-Materie-Wechselwirkung sehr genau kontrolliert werden. Auf diese Weise lassen sich vollkommen neuartige Lichtquellen herstellen. In bestimmten Systemen können darüber hinaus Photonen mit internen Freiheitsgraden wie Ladungen oder Spins verschränkt werden, die zum Beispiel dazu dienen, beliebige Photonenzustände zu speichern oder weiter zu verarbeiten. Aktuell gibt es weltweite Forschungsanstrengungen, um optimal geeignete Festkörpersysteme aus den verschiedensten Bereichen von Halbleitern bis hin zu Supraleitern für diese Funktionen zu identifizieren.

Jörg Wrachtrup hat dem sich stürmisch entwickelnden Feld der Quantenspintronik entscheidende Impulse gegeben. Basierend auf seinen Erfahrungen, die er auf dem Gebiet der Spektroskopie einzelner Moleküle gewonnen hat, und hier insbesondere durch den erstmals optischen Nachweis der magnetischen Resonanz an einzelnen Elektronen- und Kernspins, gelang ihm die Detektion einzelner Defektzentren in Diamant. Er erkannte als Erster die Bedeutung dieser Systeme für die Quantentechnologie und hat damit international einen Forschungsboom ausgelöst (zum Beispiel *Scientific American*, October 2007, „The Diamond Age of Quantum Spintronics“). Durch ihre besonderen optischen und magnetischen Eigenschaften erweisen sich diese Diamantdefekte als vielversprechende „Hardware“ für eine Reihe von Anwendungen, von der Quanteninformationstechnologie bis zur Bioanalytik oder Medizintechnik.

Die Quantensysteme, die von Wrachtrup und seiner Forschungsgruppe hergestellt und benutzt werden, sind optisch aktive Defekte in Diamant. Diamant, ein in Reinform farbloses Material, wird durch diese Defektzentren eingefärbt, wodurch sie ihren Namen Farbzentren erhalten haben. Die Defekte sind zumeist einfache atomare Verunreinigungen, das heißt, ein Kohlenstoffatom des Diamanten wird durch ein chemisch unterschiedliches Atom, zum Beispiel Stickstoff, ersetzt. Viele der atomaren Eigenschaften des Atoms bleiben dabei erhalten, sodass das umgebende Festkörpermateriale im Wesentlichen dafür sorgt, dass das Atom an seinem Platz fixiert bleibt und gleichzeitig durch die optische Anregung erzeugte Wärme abgeführt wird. Im Gegensatz zu zum Beispiel Farbstoffmolekülen oder Quantenpunkten sorgt

der Festkörper außerdem dafür, dass einzelne Defekte photostabil bleiben. Das macht sie zu perfekten und vielseitigen Festkörperlichtquellen. Entsprechend basieren die ersten kommerziellen Einzelphotonenquellen auf Diamantdefekten. Es gelang der Gruppe um Jörg Wrachtrup außerdem, Defektzentren gezielt, das heißt mit einer räumlichen Genauigkeit von wenigen 10nm, zu implantieren und dadurch die Defekte in einer photonischen Struktur oder in der Nähe einer plasmonischen Antenne hochgenau zu positionieren. Einige Defekte sind paramagnetisch und erlauben damit eine Kontrolle der Spinzustände einzelner Elektronen und sogar Kerne. Durch die Herstellung von hochreinem Diamantmaterial sowie einer sorgfältigen Kontrolle des Implantationsprozesses gelang es der Gruppe in jüngster Zeit, Ketten von miteinander wechselwirkenden Spins herzustellen und damit erste Schritte in Richtung eines funktionsfähigen Quantenregisters zu gehen.

Während sich Jörg Wrachtrup besonders für die physikalischen Grundlagen der Quantenmechanik und deren Nutzung für die Quantentechnologie interessiert, könnte eine andere Entwicklung, die von ihm und seinem Wissenschaftlerteam angestoßen wurde, vollkommen neue Perspektiven im Bereich der Sensorik bis in die Bioanalytik oder medizinische Diagnostik eröffnen. Jörg Wrachtrup konnte nämlich zeigen, dass Diamantdefekte hervorragende Sensoren für äußere Magnetfelder oder sogar elektrische Felder sind. Im Gegensatz zu allen bisherigen Verfahren erlauben die Systeme den Nachweis zum Beispiel des magnetischen Feldes einzelner Elektronen unter Umgebungsbedingungen. Dies hat wiederum dazu geführt, dass mittlerweile weltweit an der Herstellung und dem Einsatz derartiger Sensorsysteme geforscht wird. Mithilfe dieser Sensoren ließe sich die Funktion und Struktur einzelner Proteine oder von zellulären Strukturen anhand der von ihnen erzeugten magnetischen Felder untersuchen. Besonderes Augenmerk gilt dabei derzeit der Abbildung der Funktion neuronaler Zellverbände in Echtzeit, was einerseits Aufschluss über die Interaktion und Signaltransduktion in solchen Zellverbänden liefert, andererseits bereits als Testsystem für pharmakologisch wirksame Substanzen weiterentwickelt wird und für die Alzheimerforschung zum Einsatz kommen soll.

Verpackt man die Defektzentren in sehr kleine Diamanten von einigen Nanometern Durchmesser, so lassen sich die Sensoren sogar in Zellen oder Zellgewebe einschleusen. Dies kann nicht nur für die Weiterentwicklung der Zellmikroskopie genutzt werden – es wurden bereits Rekorde bei der räumlichen Auflösung in der Fluoreszenzmikroskopie (STED) mithilfe von Defektzentren in Nanodiamanten erreicht – sondern auch für die Zellsensorik und den Transfer von genetischem Material oder Wirkstoffen in Zellen. Ein amerikanisches Wissenschaftlerteam zeigt jüngst beispielsweise, dass mithilfe der Nanodiamanten die Wirksamkeit von Medikamenten, die für die Tumorthherapie zum Einsatz kommen, um einige zehn Prozent

gesteigert werden kann. Es zeigt sich außerdem, dass die Nanodiamanten keinerlei cytotoxisches Verhalten aufweisen, sodass sie als Markersubstanzen nicht nur in den Biowissenschaften, sondern auch in der Geoexploration zum Einsatz kommen sollen. So kooperiert das Wissenschaftlerteam um Wrachtrup mit Geowissenschaftlern, die sich auf die Erkundung von Erdöllagerstätten spezialisiert haben, um mittels dotierter Nanodiamanten die geologische Beschaffenheit der Lagerstätten zu untersuchen.