

Quantenmagnetometer erkennen frühzeitig kleinste Materialdefekte

Quantenmagnetometer sind in der Lage, winzige Schädigungen in ferromagnetischen Materialien aufzuspüren und sichtbar zu machen. In der Luft- und Raumfahrttechnik oder der Automobilindustrie können sie dazu beitragen, die Resilienz und Sicherheit von Systemen und Werkstoffen erheblich zu steigern. Zu diesem Ergebnis sind Forschende im kürzlich beendeten Fraunhofer-Leitprojekt »QMag« gekommen. Darüber hinaus haben sie den Einsatz von Quantenmagnetometern in der Biomedizin, Durchflussmessung und der Chipherstellung untersucht.

Strukturdefekte wie Risse, Ausscheidungen oder weitere Unregelmäßigkeiten in metallischen Materialien führen zu lokalen Veränderungen im Magnetfeld, welche sich mit Magnetometern zerstörungsfrei prüfen lassen. Quantenmagnetometer sind deutlich empfindlicher und können selbst winzige magnetische Veränderungen in Materialien detektieren. »In der Automobil- oder Luft- und Raumfahrttechnik ist es essentiell, die Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit der Werkstoffe sicherzustellen, allerdings sind die bisherigen Technologien entweder zu groß oder stehen der Industrie nicht zur Verfügung«, sagt Prof. Dr. Rüdiger Quay, Projektleiter von »QMag« und Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik IAF.

Im Projekt »Quantenmagnetometrie«, kurz »QMag«, haben Fraunhofer-Forschende Quantensensoren für konkrete industrielle Anwendungen untersucht und weiterentwickelt. Dafür arbeiteten sie mit zwei komplementären Ansätzen: Zum einen nutzten sie optisch gepumpte Magnetometer (OPMs), die sich durch ihre extrem hohe Magnetfeldempfindlichkeit auszeichnen, zum anderen verwendeten sie bildgebende Quantenmagnetometer auf der Basis von NV-Zentren in Diamant mit extrem hoher Ortsauflösung.

Beide Technologien funktionieren bei Raumtemperatur und eignen sich für die industrielle Anwendung. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Quantenmagnetometer bereits Veränderungen im Magnetfeld der Proben detektieren, wenn die Materialermüdung noch nicht sichtbar ist. Die Forschenden haben mittels OPMs die Änderungen des Magnetfelds ferromagnetischer Materialproben gemessen, während diese zyklisch ermüdet wurden. So haben sie gezeigt, dass Quantenmagnetometer kleinste Materialdefekte viel früher erkennen als herkömmliche Technologien. Zudem konnte die Messdauer verkürzt werden, was für den Einsatz in industriellen Prozessen wie der Bauteilprüfung sehr wichtig ist.

In der Materialprüfung können OPMs und NV-Magnetometer komplementär eingesetzt werden: Während die OPMs ein dynamisches Signal aus der ganzen Probe liefern, können mittels NV-Magnetometrie die magnetischen Eigenschaften einzelner Schädigungen auf der Mikro- und Nanoskala im Detail gemessen werden. »In der Materialprüfung können Quantenmagnetometer dazu beitragen, das Versagen von ferromagnetischen Bauteilen abzuschätzen, bevor die Materialien erkennbare Risse aufweisen. Dies spielt insbesondere bei sicherheitskritischen Bauteilen eine wesentliche Rolle«, sagt Dr. Simon Philipp, Forscher am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM.

Weitere Anwendungen in der Biomedizin, Durchflussmessung und Chipindustrie

Den Forschenden ist es zudem gelungen, ein neues NV-Magnetometer zu entwickeln, das bei der Materialprüfung zu schnelleren Ergebnissen führt und sogar weitere Anwendungen ermöglicht: Das Weitfeldmagnetometer misst Magnetfelder über einen großen Probenbereich in sehr kurzer Zeit und eignet sich damit für schnelle Messungen im industriellen Einsatz. »Das Weitfeldmagnetometer kann für die Charakterisierung und Optimierung von ferromagnetischen Werkstoffen eingesetzt werden, aber es eignet sich auch sehr gut für Anwendungen in der Biomedizin und der Medizintechnik. Organische Proben können damit zerstörungsfrei und bildgebend untersucht werden«, sagt Niklas Mathes, Forscher am Fraunhofer IAF.

Einen weiteren Erfolg erzielten die Forschenden beim Einsatz von OPMs in der Durchflussmessung: Sie haben ein gänzlich neues Verfahren zur Messung der Fließgeschwindigkeiten von Flüssigkeiten in einem Rohr entwickelt, das auf OPMs basiert. Die magnetometrische Durchflussmessung ist ein kontaktloses Verfahren, das auf eine Vielzahl von Medien anwendbar ist und sich für den Einsatz in der Prozesskontrolle eignet. Dieses Verfahren stellt einen bedeutenden Fortschritt dar, weil bisherige Methoden zur Durchflussmessung meistens invasiv sind.

Außerdem hat das Projektteam den Einsatz von Quantenmagnetometern in der Mikro- und Nanoelektronik sowie der Chipherstellung untersucht und enormes Potenzial festgestellt: Bei der Qualitätskontrolle lassen sich mit Quantenmagnetometern elektrische Schaltkreise vermessen und beispielsweise fehlerhafte Transistoren sofort identifizieren.

Testmöglichkeiten für die Industrie

Um die Forschungsergebnisse der Industrie zugänglich zu machen und die entwickelten Technologien für spezifische Anwendungen zu testen, wurden im Rahmen des Projekts zwei Technika errichtet. Am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM wurde ein magnetisch abgeschirmter Raum installiert, der für Testmessungen genutzt werden kann. »Die magnetische Umgebung im Technikum weist ein Restfeld von weniger als 5 Nanotesla auf und bietet eine sehr hohe Rauschunterdrückung. So ist es hier sogar möglich, kleinste Magnetfelder zu messen, die von Hirnströmen erzeugt werden. Diese Umgebung stellen wir der Industrie für Messdienstleistungen zur Verfügung«, erklärt Dr. Peter Koss, Forscher am Fraunhofer IPM.

Um den Transfer der Quantenmagnetometer in die Industrie zu erleichtern, wurde am Fraunhofer IAF ein weiteres Technikum errichtet, das mehrere NV-Magnetometer enthält. Es ermöglicht interessierten Unternehmen, insbesondere KMU und Start-ups, den Nutzen und das Potenzial von Quantenmagnetometern für ihre spezifischen Anforderungen zu evaluieren.

Über das Projekt »QMag«

Im Fraunhofer-Leitprojekt »Quantenmagnetometrie« haben sich fünf deutsche Fraunhofer-Institute der Fraunhofer-Gesellschaft sowie das britische Fraunhofer CAP zusammengeschlossen, um Quantensensoren aus dem Labor in die Industrie zu bringen. Das Projekt lief von 2019 bis 2023 und wurde mit 10 Mio. Euro zu gleichen Teilen von der Fraunhofer-Gesellschaft und dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg gefördert.

Das Projektkonsortium bestand aus:

- Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF
- Fraunhofer-Institut für Physikalisch Messtechnik IPM
- Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
- Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB
- Fraunhofer-Institut für Mikroelektronik und Mikrosysteme IMM

- Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP

Akademisch beraten wurde das Konsortium von Prof. Dr. Jörg Wrachtrup von der Universität Stuttgart und von Prof. Dr. Svenja Knappe von der University of Colorado Boulder.

www.quantenmagnetometrie.de