

Quantenmagnetometrie

Materialschädigungen früher detektieren

Die Quantentechnologie hält Einzug in der Qualitätssicherung. So lassen sich mit Hilfe von hochempfindlichen optisch gepumpten Magnetometern (OPM) Defekte an Metallen analysieren. Das Fraunhofer IPM untersucht an Stählen, wie sich magnetischen Signaturen von Schäden während des Ermüdungsprozesses quantifizieren lassen. Dies würde eine zerstörungsfreie mechanische Prüfung von Werkstoffen ermöglichen.

Ein Blick in die Zukunft der Materialprüfung? Schon heute können hochempfindliche Quantenmagnetometer Materialschädigungen in einem frühen Stadium detektieren.

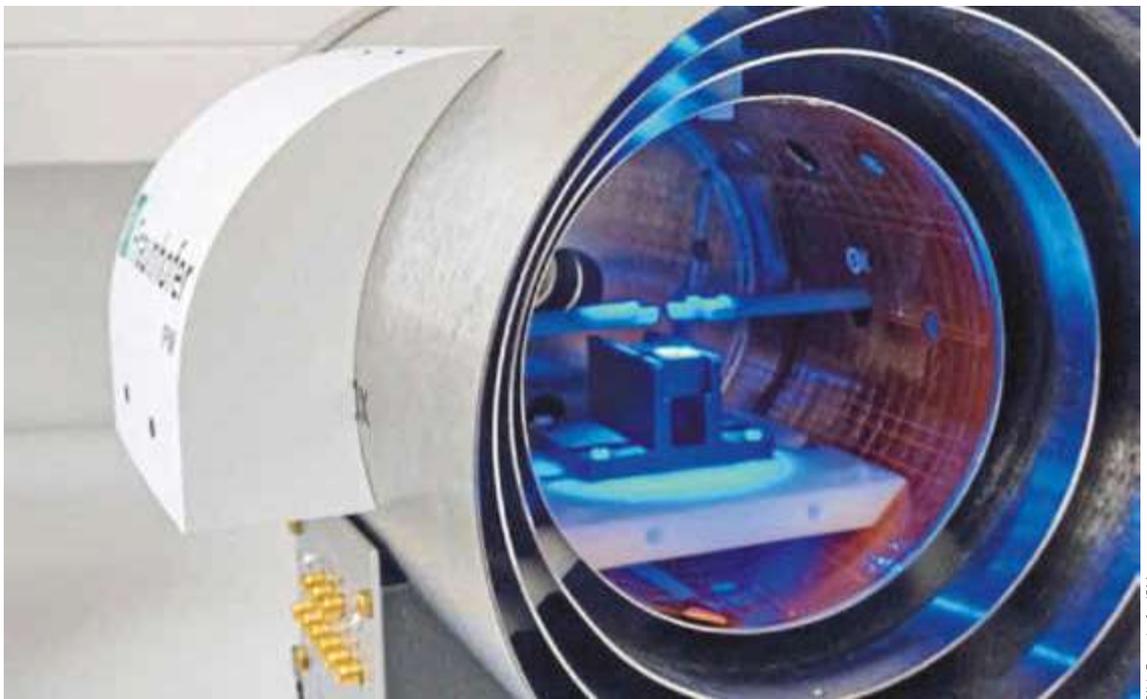


Bild: Fraunhofer IPM



Bild: Fraunhofer IPM

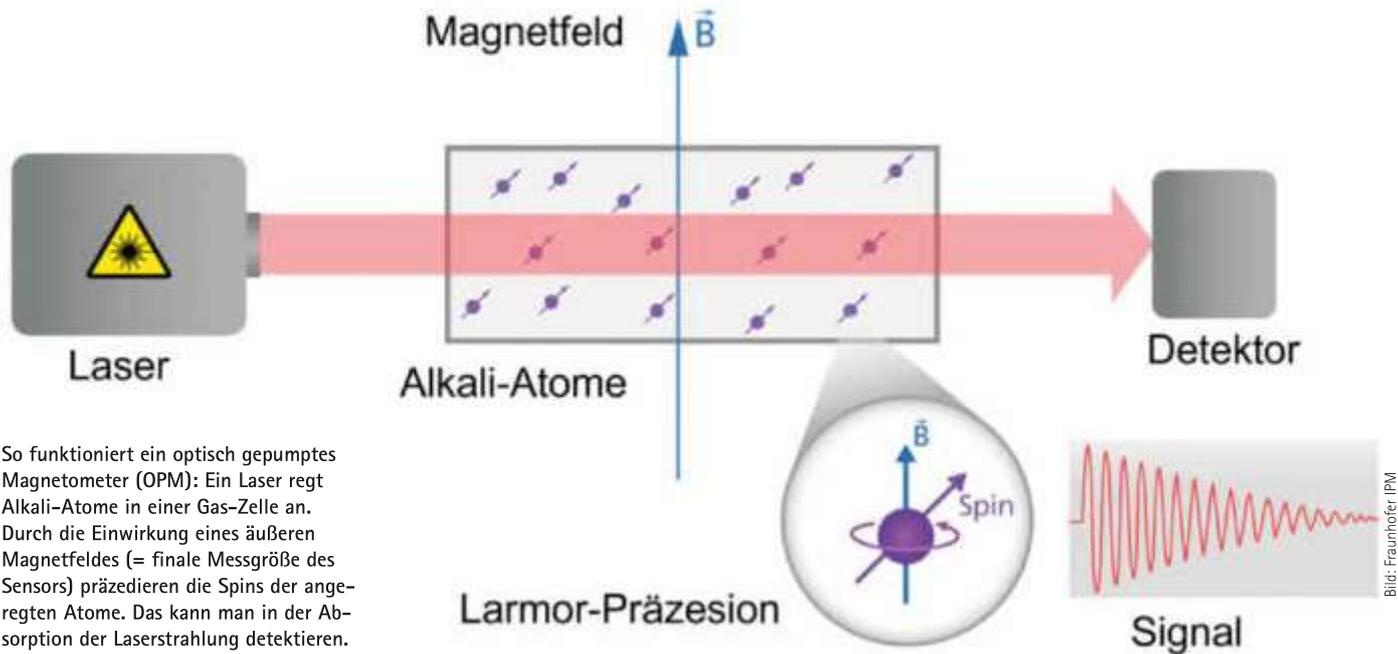
Dr. Alexander Bertz
Gruppenleiter
Geometrische
Inline-Messsysteme
Fraunhofer IPM
www.ipm.fraunhofer.de

Quantentechnologien eröffnen neue Wege zur Lösung technologischer Probleme. Sei es die abhörsichere Datenübertragung mittels verschränkter Photonen in der Quantenkryptographie oder die Qubit-basierten Algorithmen der Quantencomputer – der Mensch macht sich die Welt der Quanten im zunehmenden Maße nutzbar. Das gilt auch für die Messtechnik: Quantenbasierte Sensoren verschaffen Zugang zu immer besseren Genauigkeiten und damit zur Beobachtung und Vermessung bislang unzugänglicher Prozesse. Einige Messsysteme sind bereits kommerziell verfügbar und von einem

Einsatz in der industriellen Qualitätssicherung nicht mehr weit entfernt.

Insbesondere viele materialwissenschaftliche Anwendungen bieten große Chancen für den Einsatz von Quantensensoren – zum Beispiel, um Mechanismen besser zu verstehen, Prozesse weiter zu optimieren oder sicherheitsrelevante Komponenten zuverlässiger zu überwachen.

In der industriellen Qualitätssicherung sind magnetische Prüfverfahren und Sensoren schon lange etabliert. Das wahrscheinlich prominenteste Beispiel stellt die sogenannte Wirbelstromprüf-



So funktioniert ein optisch gepumptes Magnetometer (OPM): Ein Laser regt Alkali-Atome in einer Gas-Zelle an. Durch die Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes (= finale Messgröße des Sensors) präzedieren die Spins der angeregten Atome. Das kann man in der Absorption der Laserstrahlung detektieren.

fung dar, bei der durch Induktion ein magnetisches Moment im Prüfling erzeugt und mittels Magnetsensoren vermessen wird. Diese Prüfung wird beispielsweise zur Schädigungserkennung beim Drahtziehen verwendet. Der Grundgedanke dahinter ist, dass sich durch die Schädigung im Material magnetische „Bezirke“ derart verändern, dass diese Änderung als Anomalie im magnetischen Streufeld zu erkennen ist.

Aktuell gängige Verfahren leiden jedoch unter einer niedrigen Detektionsempfindlichkeit in Kombination mit einer reduzierten Ortsauflösung. Das heißt, die magnetischen Streufelder lassen sich nur gemittelt über relativ große Messvolumina erfassen.

Mit sehr hohem örtlichen Auflösungsvermögen

Quantenmagnetometer, die Magnetfelder mit sehr hoher Empfindlichkeit und sehr hohen örtlichen Auflösungsvermögen vermessen, können bei vielen Herausforderungen Abhilfe schaffen und darüber hinaus viele weitere Fragen beantworten. Dazu gehören:

- Gibt es lokale Spannungskonzentrationen, an denen sich im Betrieb Risse bilden können?
- Können Phasenumwandlungen in Wärmebehandlungsverfahren besser kon-

trolliert werden – beispielsweise zur Produktoptimierung?

- Ist Korrosion zum Beispiel im Sinne der Wasserstoffversprödung detektierbar?
- Lässt sich die Integrität von Batterien überwachen?

Diese und viele weitere industrielle Einsatzmöglichkeiten von Quantenmagnetometern erforschen das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM und das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in enger Kooperation. Aktueller Schwerpunkt der Arbeiten ist es, ein besseres Verständnis über Materialschädigungsmechanismen zu gewinnen. Das daraus abgeleitete Wissen fließt in die Materialoptimierung ein, führt dann zu einer besseren Abschätzung der Wartungszyklen im Sinne der Predictive Maintenance oder findet in der zerstörungsfreien Prüfung von versagenskritischen Bauteilen Anwendung. Zentrales Element sind dabei optisch gepumpte Magnetometer (OPM).

Empfindlichkeiten bis in den Femto-Tesla-Bereich

Mit optisch gepumpten Magnetometern lassen sich externe Magnetfelder durch die Wechselwirkung zwischen resonantem Licht und Atomdampf messen. Im Wesentlichen bestehen OPM aus einer kleinen Gas-Zelle befüllt mit ca. 1 mm³

Helium- oder Alkaliatomen, die durch einen Laser resonant angeregt werden – vergleichbar mit der Funktionsweise von Atomuhren. Die Spins der angeregten Atome präzedieren einheitlich im externen Magnetfeld mit der sogenannten Larmor-Frequenz, die proportional zur magnetischen Flussdichte ist. Dieser zeitabhängige quantenmechanische Effekt wird anschließend spektroskopisch gemessen und auf die finale Messgröße – die magnetische Flussdichte – zurückgeführt.

Kommerziell sind verschiedene Arten von OPM erhältlich:



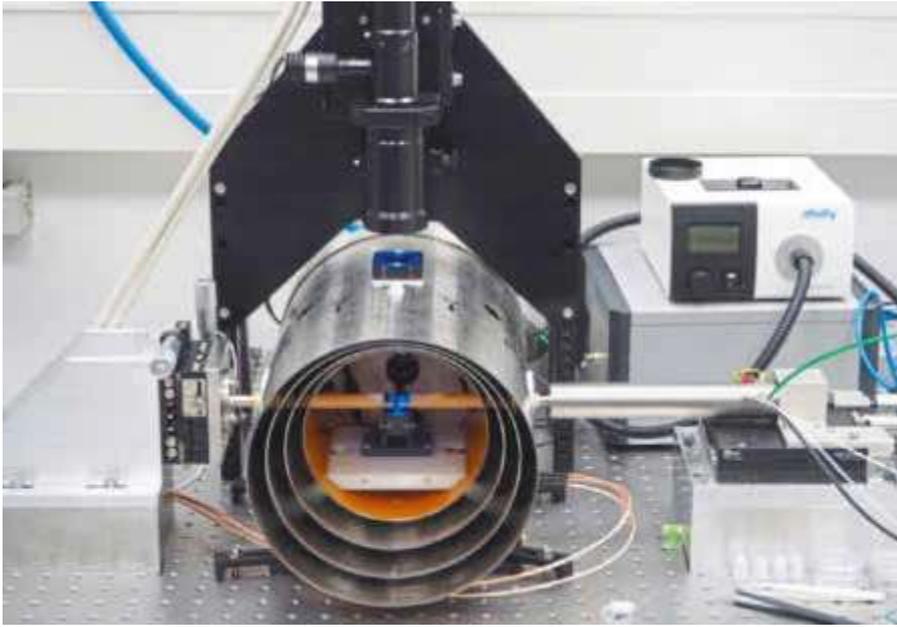
Webhinweis

Die entsprechende wissenschaftliche Veröffentlichung zum Thema – „Optically Pumped Magnetometer Measuring Fatigue-Induced Damage in Steel“ – ist bei Applied Sciences nachzulesen:



<http://hier.pro/mqiq4>

Bild: Fraunhofer IPM



Messaufbau zur magnetischen und optischen Erfassung von Mikrozug-Versuchen: Ein miniaturisierter OPM wird in einen mikromechanischen Zugaufbau eingebettet.

- **Nullfeld-OPM:** Sie erreichen Empfindlichkeiten von unter 50 fT/Hz, benötigen aber auch ein sehr niedriges Umgebungsmagnetfeld von unter 50 nT. Ihre Empfindlichkeit ist vergleichbar mit der von supraleitenden Magnetometern, wie sie beispielsweise in der Magnetresonanztomographie eingesetzt werden. Es sind jedoch keine kryogenen Temperaturen erforderlich und OPM können sehr viel kleiner gebaut werden. Dadurch sind sie im Einsatz flexibler und auch kostengünstiger.
- **Totalfeld-OPM:** Sie sind weniger empfindlich (< 1 pT/Hz), können aber problemlos im Magnetfeld der Erde betrieben werden. Der bekannteste Anwendungsfall ist in der Magnetoenzephalographie zur Erfassung der durch die im menschlichen Gehirn fließenden Ströme erzeugten Magnetfelder.

Die außergewöhnlichen Eigenschaften haben zu einer sehr erfolgreichen Kommerzialisierung dieser Sensoren in den letzten Jahren geführt – insbesondere in Hinblick auf medizinische Anwendungen. Darauf aufbauend werden gerade verschiedenste Anwendungsgebiete für diese Sensoren untersucht: In Bereichen wie der Nullfeld-NMR-Spektroskopie, der elektrochemischen Batteriecharakterisie-

rung und der zerstörungsfreien Prüfung konnten bereits erste Erfolge verzeichnet werden.

Potenzial in der Materialprüfung – etwa bei Stählen

Zum besseren Verständnis von Materialschädigungsmechanismen setzen Forschende von Fraunhofer IPM und Fraunhofer IWM aktuell winzige Proben einer zyklischen Belastung aus, deren Abmessungen ähnlich einem menschlichen Haar sind. Dabei werden verschiedenste ferromagnetische Materialien untersucht, zum Beispiel Stähle. Dort wird die irreversible Wechselwirkung der magnetischen Domänenwände (Bloch-Wände) während des Ermüdungsvorgangs gemessen. Die Defektdichte steigt im Verlauf der Versuche und lässt sich über die Veränderung der magnetomechanischen Hysterese messen.

OPM sind in der Lage, bereits kleinste Veränderungen in der magnetischen Signatur des Materials zu messen. Somit können Schädigungen wie Plastizitätsspuren oder Risse auch deutlich vor dem technischen Anriss anhand von Spannungskonzentrationen detektiert werden. Anders als bei optischen Verfahren können auch Risse im Probeninneren erkannt und vermessen werden.

Für die Untersuchungen wird ein miniaturisierter OPM in einen mikromechanischen Zugaufbau eingebettet. Äußere magnetische Störsignale werden durch eine Magnetfeldabschirmung gedämpft. So entsteht eine geeignete Messumgebung. Komponenten des Aufbaus, die potenziell veränderliche Magnetfelder erzeugen können, sind außerhalb der Abschirmung positioniert. Die mechanische Lastführung erfolgt mittels steifer, hochfester, nicht-magnetischer und nicht leitfähiger Materialien wie Keramiken und Titanlegierungen.

Bauteilüberwachung vor Ort – in-situ oder inline

Erkenntnisse aktueller Versuche zielen vorrangig darauf ab, das Verständnis über Schädigungsvorgänge in verschiedenen Materialien zu verbessern und damit Bauteilauslegung zu optimieren. In den nächsten Schritten soll die Messung näher „an den Ort des Geschehens“ gebracht werden: Das Konsortium ist zuversichtlich, in den kommenden Jahren quantenmagnetometrische Sensoren – insbesondere OPM – näher an den industriellen Einsatz heranzuführen zu können – zur Prozessüberwachung und -regelung, zur Qualitätssicherung in der Linie und zur Bauteilüberwachung und Bestimmung der Restlebensdauer kritischer Komponenten.



Webhinweis

Was Quantensensoren sind und wozu sie – insbesondere optisch gepumpte Magnetometer (OPM) – einsetzbar sind, erklären Experten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in diesem Video:



<http://hier.pro/Gchf>