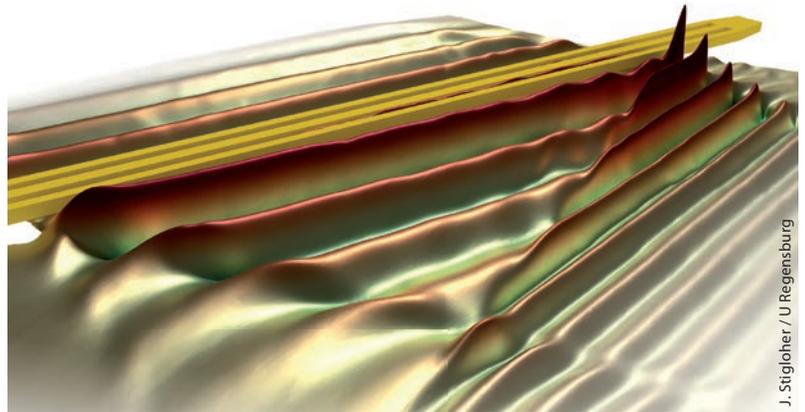


Optik einmal anders

Erstmals konnten Forscher experimentell das Brechungsgesetz für Spinwellen direkt nachweisen.

Optik ist für uns allgegenwärtig. Wir verstehen darunter Reflexion, Beugung und Brechung von Licht an Grenzflächen, für welche die Gesetzmäßigkeiten seit langem bekannt sind. Zwei Annahmen führen zum Snellius'schen Brechungsgesetz: Zum einen ändert sich die Geschwindigkeit des Lichtes beim Übergang zwischen Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Dadurch ist der Wellenvektor im optisch dichteren Medium größer. Zum anderen bleibt die Komponente des Wellenvektors parallel zur Grenzfläche erhalten, um die Stetigkeit der elektromagnetischen Felder entlang der Grenzfläche zu sichern (Abb. 1a). Für Licht führen diese Annahmen aufgrund der isotropen Dispersion zum bekannten Reflexionsgesetz „Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel“ sowie zum Brechungsgesetz. Letzteres bedeutet, dass sichtbares Licht für Materialien mit positivem Brechungsindex beim Übergang ins optisch dichtere Medium zum Lot hingebrochen wird. Mit anderen Worten: Der Fisch im Wasser befindet sich tatsächlich näher am Beobachter, als es den Anschein hat.

Nun ist es Forschern erstmals gelungen, das Brechungsgesetz für Spinwellen in dünnen, ferromagnetischen Filmen experimentell nachzuweisen [1]. Spinwellen, auch Magnonen genannt, sind die Eigen-



J. Stigloher / U Regensburg

Spinwellen werden beim Übergang von dicken zu dünnen ferromagnetischen Filmen gebrochen.

anregungen in Ferro-, Ferri- und Antiferromagneten. Ähnlich den Phononen besitzen sie wohldefinierte Frequenzen und Wellenlängen. Jedoch haben Spinwellen nichts mit schwingenden Gitteratomen zu tun. Vielmehr pflanzen sie sich in Form präzidierender magnetischer Momente durch den Festkörper fort. Die Vision, Spinwellen als Informationsträger für die Datenverarbeitung zu nutzen, hat mit der Magnonik ein neues Forschungsgebiet begründet [2 – 4].

Auf den ersten Blick scheint es nicht schwierig, Spinwellen an Grenzflächen zu brechen. Denn generell vergrößert sich bei gleichbleibender Frequenz die Wellenlänge von Spinwellen, wenn die Stärke der Magnetisierung zunimmt. Somit lassen sich durch eine lokal

scharf begrenzte Variation der Magnetisierung, etwa durch die Implantation mit Fremdatomen, gezielt ein „optisch“ dichteres und ein „optisch“ dünneres Medium für Spinwellen schaffen [5]. Jedoch erhöht sich dadurch meist die Dämpfung von Spinwellen, was den experimentellen Nachweis der Brechung deutlich erschwert.

Die Arbeitsgruppe von Christian Back in Regensburg hat einen anderen Weg gewählt, um die „optische Dichte“ für Spinwellen stufenweise zu ändern. Die Forscher variierten die Dicke des ferromagnetischen Filmes (Abb. 1b). Allerdings ist es in diesem Fall nicht eindeutig, ob das dickere Material das für Spinwellen „optisch“ dichtere oder dünnere Medium ist, da die Dispersionsrelation von Spinwellen stark anisotrop

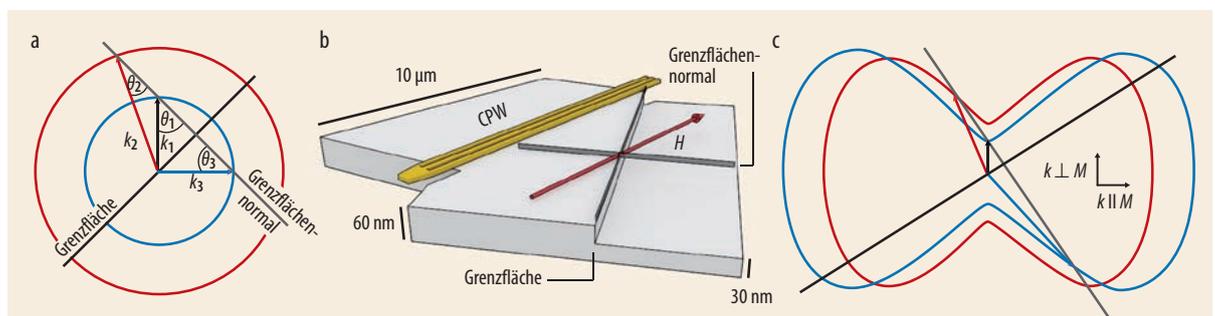


Abb. 1 Für Licht sind im Wellenvektorraum Linien gleicher Frequenz Kreise (a), da die Dispersion isotrop ist. Die Pfeile stehen für die Wellenvektoren von einfallender (k_1 , schwarz), gebrochener (k_2 , rot) und reflektierter Welle (k_3 , blau). Die schwarze Linie zeigt die Grenzfläche zwischen optisch dünnem (blau) und

dichtem (rot) Material. Einfallswinkel, Beugungs- und Reflexionswinkel (θ_1 , θ_2 und θ_3) sind bzgl. der Grenzflächennormalen (grau) definiert. Im Experiment wurde die Dicke des ferromagnetischen Filmes gezielt variiert (b). Der rote Pfeil zeigt die Richtung des Magnetfeldes an, die parallel zum koplanaren Wellenleiter (CPW)

steht. Dieser dient dazu, Spinwellen zu erzeugen, die sich senkrecht zum CPW ausbreiten. Für Spinwellen sind die Isofrequenzlinien im reziproken Raum keine Kreise mehr (c). Sie hängen von der Dicke ab, wie hier für den Übergang von dickem (blau) zu dünnem Film (rot) erkennbar ist.

ist. Diese Anisotropie geht sogar so weit, dass je nach Ausbreitungsrichtung die Dispersion von positiv zu negativ wechselt. Für eine Propagation der Spinwellen senkrecht zur Magnetisierung steigen die Frequenzen mit größeren Wellenvektoren, wohingegen die Frequenzen zunächst kleiner werden, wenn sich die Spinwellen parallel zur Magnetisierung ausbreiten (Abb. 1c). Dieser Effekt entsteht durch die magnetischen Dipolfelder, die eine Spinwelle erzeugt und deren Stärke mit der Dicke des Ferromagneten skaliert. Je dicker der Film ist, umso stärker ist die Anisotropie ausgeprägt. Für sehr große Wellenvektoren führt letztendlich die isotrope magnetische Austauschwechselwirkung zu einem quadratischen Anstieg der Spinwellenfrequenzen, auch für den Fall mit der anfänglich negativen Dispersion.

In ihrem Experiment regten die Regensburger Experimentalphysiker Spinwellen in einem 60 Nanometer dünnen Film aus einer Nickel-Eisen-Legierung mit Mikrowellen an (Abb. 1b). Die angeregten Spinwellen breiteten sich mit positiver Dispersion senkrecht zur Magnetisierung aus. Nach wenigen Mikrometern trafen sie auf ein

Gebiet, in dem die Dicke des Ferromagneten gezielt um die Hälfte reduziert wurde. Vom dickeren zum dünneren Film heißt in diesem Fall vom „optisch“ dünnen in das „optisch“ dichte Medium (Abb. 1c). Analog zu Licht war im Experiment die Brechung der Spinwellen hin zum Lot zu beobachten. Bis zu einem gewissen Einfallswinkel stimmt der Beugungswinkel für Spinwellen mit dem überein, der für Licht zu erwarten wäre.

Für größere Einfallswinkel jedoch verhalten sich Spinwellen ganz anders. Nicht nur werden sie weniger stark gebrochen als Lichtwellen, es ändert sich auch ihre Wellenlänge, wenn man den Einfallswinkel variiert. Der Brechungsindex ist somit eine Funktion des Einfallswinkels, und zwar für die gebeugten wie auch die reflektierten Spinwellen. Außerdem gilt aufgrund der anisotropen Dispersion der Spinwellen das für Licht gültige Reflexionsgesetz nicht mehr. Gewissermaßen haben die Forscher also einen Spiegel entdeckt, der die Farbe ändert und das sogar abhängig von der Position des Beobachters.

Neben diesen grundlagenphysikalisch sehr interessanten Aspekten

steht auch die technologische Relevanz dieser Entdeckung außer Frage. Mit ihren Experimenten konnten die Forscher zeigen, dass sich durch Brechung Spinwellen mit Wellenlängen einiger zehn Nanometer erzeugen lassen, die ansonsten mittels Antennenstrukturen nur schwer erreichbar sind [6]. Dies ist für die technische Realisierung von Computern, in denen Magnonen für Logikoperationen zum Einsatz kommen [7], von enormer Bedeutung. Da zudem der Brechungsindex der Spinwellen durch die anisotrope Dispersion vom Einfallswinkel abhängt, ergeben sich für die Konstruktion von Spinwellen-Optiken völlig neue, noch unbekannt Möglichkeiten, die über die klassische Optik hinausgehen werden.

Helmut Schultheiß

- [1] J. Stigloher et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 037204 (2016)
- [2] V. V. Kruglyak et al., J. of Phys. D. **43**, 264001 (2010)
- [3] B. Lenk et al., Phys. Rep. **507**, 107 (2011)
- [4] A. V. Chumak et al., Nat. Phys. **11**, 453 (2015)
- [5] J. Fassbender et al., New J. Phys. **11**, 125002 (2009)
- [6] H. Yu, Nat. Comm. **4**, 2702 (2013)
- [7] B. Leven et al., Physik in unserer Zeit **46**, 34 (2015)

Dr. Helmut Schultheiß, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzener Landstraße 400, 01328 Dresden

■ Vielseitige Quantenbits

Ein 4-Qubit-Quantencomputer ermöglicht es, die Paarerzeugung von Teilchen und Antiteilchen zu berechnen.

Die effiziente Berechnung der Zeitentwicklung von Quanten-Vielteilchensystemen, angefangen bei stark korrelierten Elektronen in Festkörpern bis hin zu stark wechselwirkender Quark-Gluon-Materie, ist eine der fundamentalen Herausforderungen der heutigen Physik. Klassische Computer stoßen bei diesen Problemen oft an ihre Grenzen, da der Rechenaufwand typischerweise exponentiell mit der Zahl der Freiheitsgrade wächst. 1982 stellte Richard Feynman die Vermutung auf, dass ein universeller Quantencomputer in der Lage wäre, beliebige Quantensysteme wesentlich effizienter zu berechnen [1].

In einem Quantencomputer wird Information direkt in Form von Qubits (z. B. Quantenspins $\frac{1}{2}$) gespeichert, anstatt diese in klassischen Bits zu kodieren. Rechenoperationen lassen sich durch die sequenzielle Anwendung von Quantengattern implementieren. Theoretisch gelang es bereits zu beweisen, dass es möglich ist, eine beliebige Zeitentwicklung für ein gegebenes Quantensystem durch eine überschaubare Anzahl von Quantengatter-Operationen zu realisieren [2].

Solche Quantenrechnungen wären für die Hochenergiephysik von immenser Bedeutung, um beispielsweise den zeitlichen Verlauf

von Schwerionenkollisionen mit anschließender Teilchen-Antiteilchen-Produktion rein auf Basis der Quantenchromodynamik (QCD) – der fundamentalen Eichfeldtheorie von Quarks und Gluonen – besser zu verstehen. Derartige nicht-perturbative Probleme lassen sich im Rahmen der Gitterfeldtheorie, in der das Raum-Zeit-Kontinuum durch ein diskretes Gitter approximiert wird, zwar exakt formulieren. Aufgrund des exponentiell großen Rechenaufwands ist es aber nicht möglich, diese Probleme mit klassischen Computern zu lösen.

Wissenschaftler der Universität Innsbruck, des Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation

Dr. David Mesterhazy, Dr. Florian Hebenstreit und Prof. Dr. Uwe-Jens Wiese, Albert Einstein Center for Fundamental Physics, Institut für Theoretische Physik, Universität Bern, Sidlerstr. 5, 3012 Bern, Schweiz