

Maßgeschneiderte Spinwellen

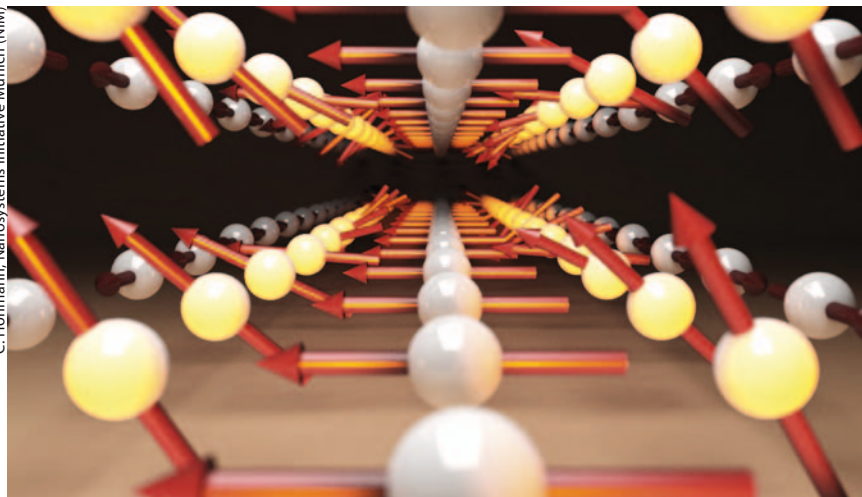
Strukturierte Nanomagnete, in denen Spinwellen propagieren, versprechen vielfältige Anwendungen

Sergej O. Demokritov und Dirk Grundler

Die Wellenlänge von Gigahertz-Strahlung, wie sie in WLAN-Netzen oder Mobiltelefonen verwendet wird, beträgt typischerweise einige Zentimeter. Dass sich diese Strahlung dennoch in handlichen Geräten verarbeiten lässt, verdanken wir der Ankopplung an elementare Festkörper-Anregungen, deren Wellenlänge nur Mikrometer beträgt. Kollektive Spinanregungen in magnetischen Materialien versprechen eine weitere Miniaturisierung bis hinunter auf die Nanoskala und könnten es sogar ermöglichen, die Arbeitsfrequenzen variabel einzustellen.

In unserem Alltag hat die Bedeutung von Mikrowellen rasant zugenommen. Im Mikrowellenofen erwärmen wir Nahrungsmittel mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung der Frequenz 2,455 GHz bzw. Wellenlänge 12 cm. Auf ähnlichen Wellenlängen senden und empfangen sowohl WLAN-Netzwerke als auch Mobiltelefone. In Radargeräten haben diskrete Bauelemente wie Phasenschieber und Zirkulatoren, die Mikrowellen direkt verarbeiten, Baulängen in der Größenordnung der Wellenlänge λ und können ein Kilogramm und mehr wiegen. Diese Eigenschaften sind offenkundig nicht geeignet für mobile Geräte in der Informationstechnologie. Die moderne Mikrowellentechnik zeichnet sich daher auch dadurch aus, die langwellige GHz-Strahlung in Endgeräten auf wenige Mikrometer „schrumpfen“ zu können. Dies gelingt durch Ankopplung an elementare Anregungen in Festkörpern. In Mobiltelefonen werden die elektrischen GHz-Signale mithilfe von z. B. piezoelektrischen Materialien in kurzwellige mechanische Oberflächenwellen (akustische Phononen) gewandelt und in miniaturisierten Bauelementen weiterverarbeitet. Eine Alternative könnten kollektive Spinanregungen in magnetischen Materialien bilden. Diese Anregungen breiten sich in Ferromagneten als Spinwellen oder – im Teilchenbild – als Magnonen aus und bieten technologische Vorteile: Die Arbeitsfrequenzen lassen sich mit Magnetfeldern nachträglich einstellen, und nichtflüchtige magnetische Zustände erlauben sowohl Speicherfunktionen als auch logische Operationen. Existierende Bauelemente ließen sich damit umprogrammieren. Dadurch wäre es prinzipiell möglich, die Trägerfrequenzen in WLAN- und Mobilfunk-Netzwerken flexibel zu ändern. Spinwellen erlauben zudem eine weitere Miniaturisierung bis hinunter auf die Nanoskala.

C. Hohmann, Nanosystems Initiative Munich (NIM)



Blick in einen magnetischen „Streifen“, der modellhaft aus zwei Lagen von Elektronenspins besteht. Die Spins in der mittleren Spalte folgen dem äußeren quer angelegten Feld. In den Spalten

links und rechts davon lassen sich mit einem Mikrowellenfeld geeigneter Frequenz zwei parallel laufende Spinwellenstrahlen anregen.

In einer Spinwelle koppelt die elektromagnetische Welle über das magnetische Wechselfeld mit der Magnetisierung des Ferromagneten (Infokasten). Diese Kopplung findet im GHz-Frequenzbereich statt und reduziert die charakteristische Wellenlänge um mehrere Größenordnungen. Zudem besitzt eine Spinwelle eine nichtlineare Dispersionsrelation, die zu einzigartigen Eigenschaften führt: Im Unterschied zu Photonen oder Plasmonen lassen sich die gesamte Dispersionsrelation von Magnonen mit einem Magnetfeld verschieben (Abb. 1) und die untere Abschnidefrequenz f_0 der Spinwellen sehr einfach zwischen

KOMPAKT

- Spinwellen oder Magnonen sind kollektive Anregungen in magnetischen Materialien, die sich zum Transport und zur Verarbeitung von Informationen eignen. Da die Signalübertragung ohne Ladungstransport geschieht, sind verlustarme Anwendungen möglich.
- In maßgeschneiderten periodisch strukturierten Ferromagneten („magnonische Kristalle“) lässt sich bereits mit geringen Magnetfeldern die Bandstruktur beeinflussen.
- Analog zu Feldeffekttransistoren in der Halbleitertechnologie sind Dreitor-Bauelemente mit Spinwellen möglich. Auch logische Gatter sind denkbar.

Prof. Dr. Sergej O. Demokritov, Institut für Angewandte Physik und Center for Nonlinear Science, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstr. 2–4, 48149 Münster, Prof. Dr. Dirk Grundler, Physik-Department E10, Technische Universität München, James-Frank-Str. 1, 85748 Garching

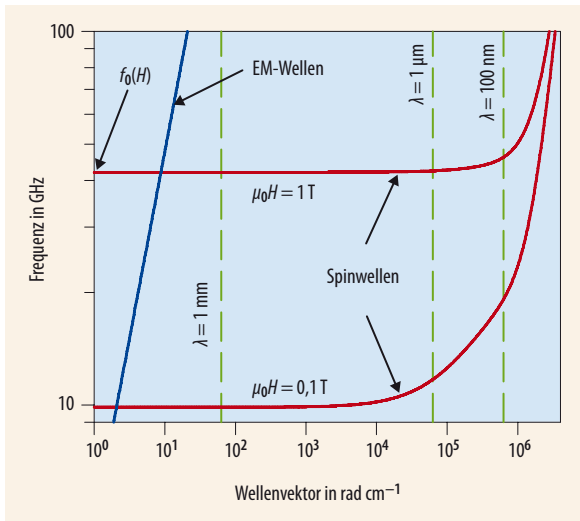


Abb. 1 Die Dispersionsrelation für Spinwellen in einem Ferromagneten ist im Gegensatz zur Dispersionsrelation einer elektromagnetischen Welle (EM) im Vakuum nichtlinear. Mit einem Magnetfeld H lässt sich diese verschieben. $f_0(H)$ bezeichnet die feldabhängige untere Abschneidefrequenz der Dispersionsrelation.

0,1 und 100 GHz einstellen. Bei einer konstanten Frequenz ist es somit möglich, die Wellenlänge stark zu variieren, im gezeigten Beispiel von Millimeter bis unter 100 Nanometer. Im selben GHz-Frequenzbereich würde die Wellenlänge der freien elektromagnetischen Welle von Meter bis Millimeter differieren. Darüber hinaus wird bei der Signalübertragung mit Magnonen im Unterschied zur konventionellen Elektronik oder Spintronik keine Ladung transportiert, was für verlustarme Anwendungen interessant ist.

Insgesamt steht der Begriff „Magnonik“ für ein Forschungsfeld, in dem Grundlagen und technische Anwendungen von Spinwellen in maßgeschneiderten Ferromagneten untersucht werden. Dabei können die Funktionen über die der bisher bekannten elektronischen, photonischen und plasmonischen Bau-

elemente hinausgehen [1]. Für magnonische Anwendungen sind vor allem ferromagnetische Mikro- und Nanostrukturen interessant. Diese erlauben wegen der Symmetriebrechung an der Oberfläche eine nicht-reziproke Wellenausbreitung („Einbahnstraße“), und sind, aufgrund des größeren Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen, durch einen äußeren Parameter, wie einen elektrischen Strom, sehr einfach zu steuern.¹⁾ Zudem sind sie mit der verbreiteten CMOS-basierten Halbleitertechnologie kompatibel. Man kann sich Bauelemente vorstellen, die die Vorteile sowohl der magnetischen als auch der halbleitenden Systeme kombinieren.

Von quantisierten Spinwellen zur Nanooptik

In ferromagnetischen Mikro- und Nanostrukturen verändert die laterale Einschränkung die Eigenschaften von Spinwellen maßgeblich. Je nach Ausrichtung der Magnetisierung sind die Spinwellen aufgrund des räumlichen Einschlusses quantisiert oder es bilden sich lokalisierte Randmoden aus. Da sich Permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) sehr gut mit gängigen Technologien strukturieren lässt und eine geringe intrinsische Spinwellendämpfung aufweist, bildet es die Grundlage für zahlreiche Experimente in der Nanomagnonik.

Vor etwa einem Jahrzehnt gelang es, in longitudinal magnetisierten Mikrostreifen basierend auf Permalloy stehende Spinwellen-Moden nachzuweisen [2]. Die Moden, die durch laterale Quantisierung entstehen, weisen diskrete Eigenfrequenzen bzw. Wellenlängen auf. Erst später stellte sich heraus, dass die erlaubte Wellenlänge λ der Moden durch $w_{\text{eff}} = N\lambda/2$ gegeben ist. Dabei steht N für eine ganze Zahl und w_{eff} für eine effektive Breite des Streifens, welche die dynamischen Streufelder am Rand des Magneten berücksichtigt.

Darüber hinaus ist das innere Magnetfeld einer Mikrostruktur zumeist inhomogen, auch wenn das

1) Eine reziproke Wellenausbreitung ist in der Signalverarbeitung nicht immer erwünscht, da so ein Signal auf einer Leitung in beide Richtungen mit gleicher Amplitude laufen kann. Bauteile, die nur eine nichtreziproke Ausbreitung erlauben, verhindern, dass von einem Empfänger reflektierte Teilsignale in den Sender zurücklaufen.

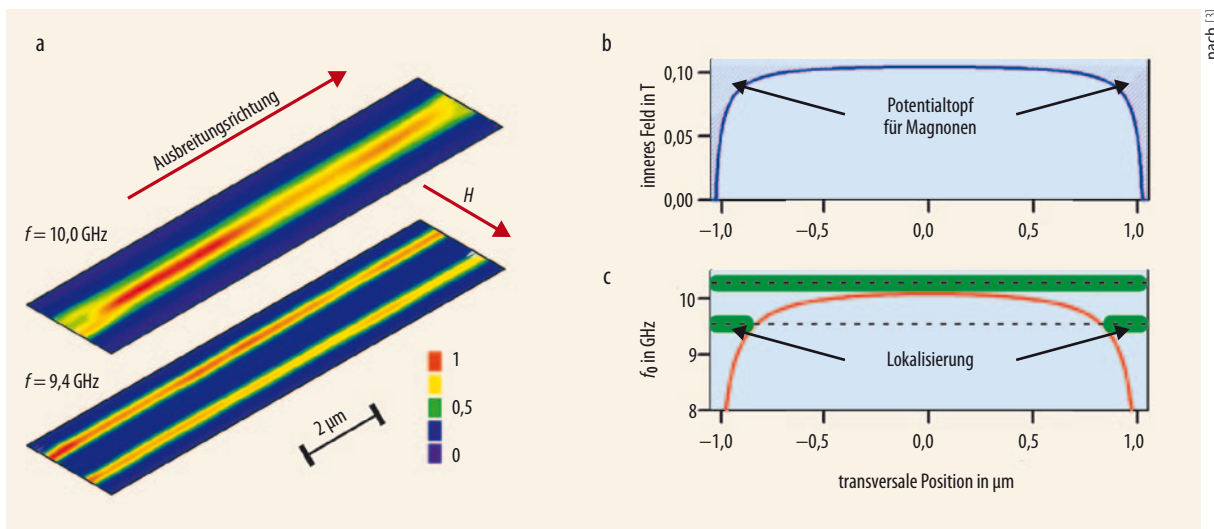


Abb. 2 (a) Mit einem elektromagnetischen Wechselfeld lassen sich in einem 2 μm breiten, quer-magnetisierten Permalloy-Streifen Spinwellen anregen, die sich je nach Frequenz in einem einzigen oder in zwei Strahlen ausbreiten, wie die orts-

aufgelöste Amplitude der Spinpräzession (in Farbe) zeigt. (b) Bei einem homogenen äußeren Feld (hier: 100 mT) ist das innere Feld inhomogen. (c) Dadurch variieren auch die untere Abschneidefrequenz f_0 und die Dispersionsrelation räumlich.

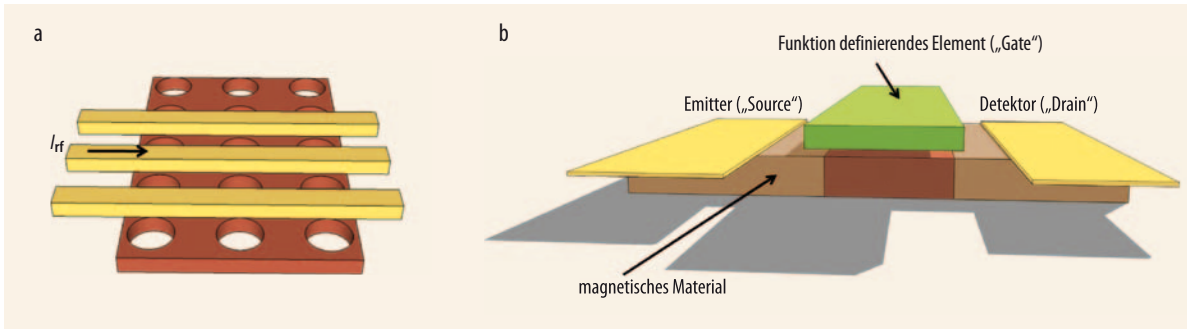


Abb. 3 (a) Ein koplarerer Wellenleiter (CPW) besteht aus einer zentralen Signalleitung und zwei Leitern, die der Abschirmung dienen (gelb). Das vom Strom I_{rf} mitgeführte Mikrowellenmagnetfeld regt Spinwellen in einem magnonischen Kristall an, z. B. einem nanostrukturierten magnetischen Antidot-Gitter (braun), das aus einer periodischen Anordnung von Löchern in

Permalloy besteht. (b) Ein Spinwellen-Bauelement lässt sich als Drei-Tor-Bauelement darstellen, das je nach Ausführung des Gate (grün) entweder passiv oder aktiv ist. Dabei lässt sich z. B. ein magnonischer Kristall (braun) mithilfe des Gate programmieren. Als Source und Drain könnte jeweils ein CPW dienen, um lokal Spinwellen zu erzeugen bzw. zu detektieren.

globale äußere Feld selbst homogen ist. In der Nähe von Rändern kann es dabei fast auf null gehen. Da die Spinwellen-Dispersion mit dem inneren Feld unmittelbar verbunden ist, können Spinwellen an den Rändern von transversal magnetisierten Mikrostreifen lokalisieren oder sich in mikroskopischen Kanälen bewegen [3] (Abb. 2). Die transversale Ausdehnung derartiger „Nanostrahlen“ ist viel kleiner als die Breite des Streifens. Dies ermöglicht eine neuartige Nanooptik für Mikrowellen im GHz-Frequenzbereich, die äußerst flexibel und von außen steuerbar ist.

Im Wellenbild bedeutet das inhomogene innere Magnetfeld, dass der Brechungsindex für Spinwellen räumlich variiert. Dies ist gerade in Nanostrukturen entscheidend, da das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen groß ist. In individuellen magnonischen Streifen (Abb. 2) und Netzwerken von Wellenleitern wie magnetischen Antidot-Gittern (Abb. 3a und Abb. 4) lassen sich damit die räumliche Lage sowie die Anzahl von Nanostrahlen maßgeschneidert einstellen. Im Gegensatz zur Lichtleitertechnik, bei der sich ein variierender Brechungsindex z. B. durch Schichten unterschiedlicher Materialien erzeugen lässt, sind solche Variationen in der Magnonik innerhalb von ein- und demselben magnetischen Material möglich [3].

Anregung und Nachweis von Spinwellen

Die technischen Möglichkeiten, Spinwellen mit hoher Orts- und Zeitauflösung anzuregen und zu detektieren, haben sich in den letzten Jahren rasant entwickelt. Zur Anregung eignen sich neben harmonischen oder gepulsten Radiofrequenz-Magnetfeldern ultrakurze Lichtpulse [4] oder spinpolarisierte Ströme [5]. Oszillierende Magnetfelder erlauben eine effiziente Anregung, wenn Frequenz und Wellenlänge gezielt auf die Spinwelle abgestimmt sind. Früher wurden dazu Mikrowellen-Kavitäten benutzt, da sie eine hohe Messempfindlichkeit aufweisen. Heute arbeitet man zumeist mit koplarenen Wellenleitern (CPW) (Abb. 3a), die die breitbandige Untersuchung von Spinanregungen erlauben. Der Innenleiter des CPW erfüllt dabei eine

Doppelrolle: Er führt das anregende Wechselfeld an die magnetische Probe und leitet das Spannungssignal, das die Spinpräzession im Innenleiter induziert, an den Mikrowellen-Detektor. Moderne Nanolithographie-Techniken ermöglichen es, die Leiterbreite des CPW maßgeschneidert an die Größe des Mikro- oder Nanomagneteten anzupassen. Gleichzeitig ist es damit möglich, das magnetische Wechselfeld räumlich so zu formen, dass sich mit dieser Messtechnik nicht nur die uniforme Präzession untersuchen lässt, sondern auch propagierende Spinwellen mit relativ hohem Wellenvektor erzeugt werden können. Damit ist es bereits gelungen, Prototypen von magnonischen Bauelementen auf Substraten zu integrieren und in elektrischen Schaltkreisen hinsichtlich ihrer Spinwellen-Transmissionseigenschaften umfassend zu charakterisieren

SPINWELLEN

Bereits Felix Bloch hat gezeigt, dass niederenergetische Anregungen in einem Ferromagneten nicht dem vollständigen Umklappen einzelner Spins entsprechen. Stattdessen präzedieren die Spins des Gesamtsystems mit einem bestimmten Öffnungswinkel. Dabei koppelt die Wechselwirkung zwischen den Atomen benachbarte Spins, sodass diese mit einem bestimmten Phasenversatz präzedieren. Diese Anregungen – **Spinwellen** bzw. **Magnonen** – sind charakterisiert durch die Wellenlänge λ , die Ausbreitungsrichtung in Bezug auf die Magnetisierung und die Präzessionsfrequenz. Je nach Wellenlänge und Material liegen typische Frequenzen bei GHz bis THz. Spinwellen können sich in metallischen Ferromagneten wie Permalloy bis einige 10 μm , in iso-

lierenden Ferriten wie Yttrium-Eisen-Granat (YIG) bis zu einige mm weit ausbreiten.

Ohne Magnetfeld und ohne Anisotropie gibt es bei der uniformen Präzession (Wellenvektor $q = 2\pi/\lambda = 0$) keine Rückstellkraft für Spins, und die Eigenfrequenz ist null. Dies ändert sich, wenn ein Magnetfeld anliegt, und die Spins darum präzedieren. Die Dispersion ist dann zu endlichen Frequenzen verschoben (Abb. 1). Die Abschneidefrequenz f_0 hängt vom Magnetfeld ab: Je höher das Magnetfeld, desto größer ist das Drehmoment auf die Spins. Bei größeren Werten von q tritt eine q^2 -Abhängigkeit der Spinwellenfrequenz aufgrund der Austauschwechselwirkung benachbarter Spins auf.



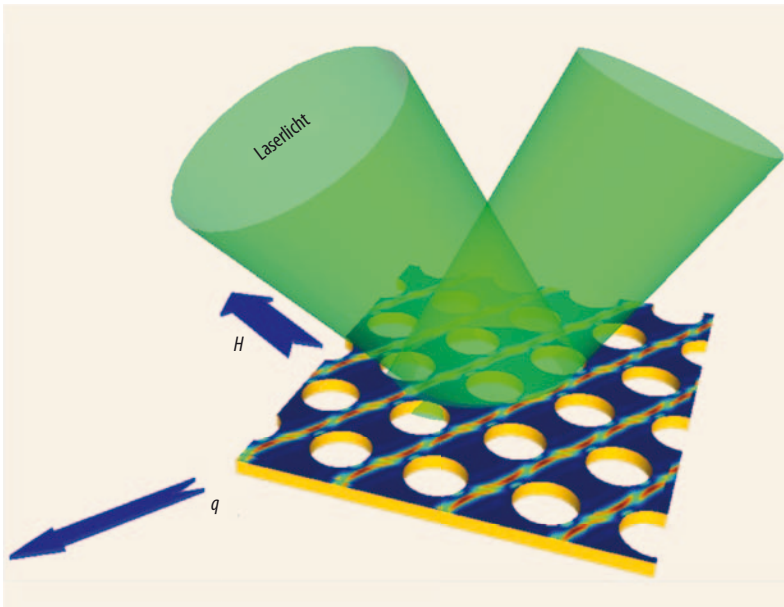


Abb. 4 Die Streuung von Laserlicht erlaubt es z. B., in einem Antidot-Gitter geeigneter Periode Spinwellen-Nanokanäle nachzuweisen. Die Farbkodierung auf der Oberfläche spiegelt die simulierte

räumliche Verteilung der Spinpräzessionsamplitude einer spezifischen Eigenmode wider, die sich einstellt, wenn das angedeutete Magnetfeld angelegt wird.

(Abb. 3b). Jedoch sind die Einkopplung und Spinwellen-Detektion räumlich nicht exakt definiert, da die elektromagnetischen Felder eine lange Reichweite haben.

Messverfahren, die auf der Licht-Materie-Wechselwirkung basieren, erzielen hingegen eine gute räumliche Auflösung von inhomogenen Spinanregungen kombiniert mit einer hohen Empfindlichkeit (Abb. 4). Dabei stehen zwei komplementäre Verfahren im Vordergrund, ein frequenz aufgelöstes mittels Brillouin-Lichtstreuung (BLS) und ein zeitaufgelöstes mithilfe der MOKE-Mikroskopie (magneto-optische Kerr-Effekt-Mikroskopie).

Brillouin-Streuung bezeichnet die inelastische Streuung von Laserlicht, dessen Frequenz dabei durch Elementaranregungen im Festkörper charakteristisch verschoben wird. Damit ist es möglich, Spinwellen

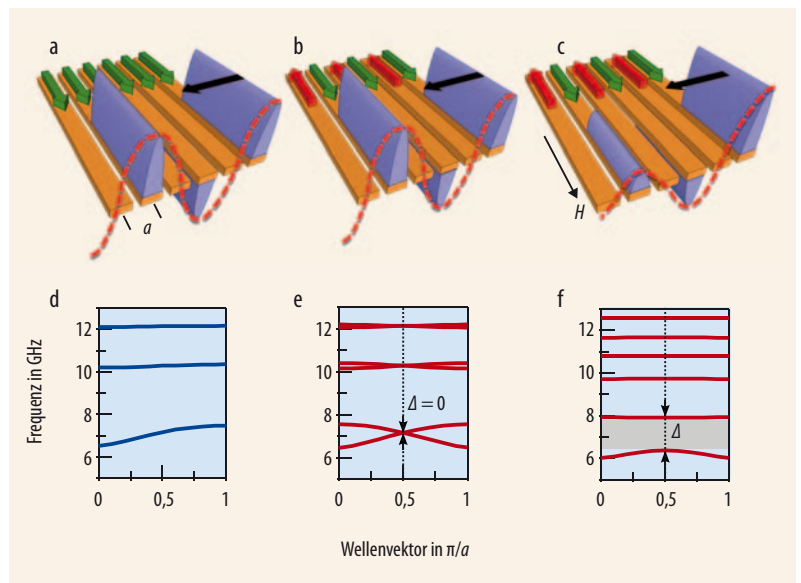
über einen weiten Frequenzbereich von wenigen bis zu einigen 100 GHz zu detektieren. Durch Abrastern der magnetischen Probe lässt sich die räumliche Verteilung von Spinpräzessionsamplituden abbilden. Ein zusätzliches Mikrowellenfeld erlaubt es darüber hinaus, die Amplituden frequenzselektiv zu vergrößern und somit die Messempfindlichkeit zu steigern [6]. Damit ist die nichtlineare Spindynamik in Nanomagnetten ortsaufgelöst zugänglich geworden. Dies ist ein wichtiger Forschungsansatz, wenn man an zukünftige magnonische Bauelemente und deren leistungsabhängige Eigenschaften denkt.

Die MOKE-Mikroskopie nutzt die Drehung der Polarisationssebene eines reflektierten Lichtstrahls aus, die durch die Spinpräzessionsbewegung verursacht wird [7]. Bei einem so genannten pump-and-probe-Verfahren regen ultrakurze Lichtpulse, gepulste Radiofrequenz-Magnetfelder oder auch spinpolarisierte Ströme das Spinsystem mit einer festen Wiederholperiode an, die länger ist als die Spinrelaxationszeit. Zeitversetzt dazu fragt ein ultrakurzer Lichtpuls (stroboskopisch) die Drehung der Polarisationssebene ab. Durch Variation des Zeitversatzes lassen sich Phasenlage und zeitabhängige Amplitude der Spinbewegung detektieren. Abrastern mit fokussiertem Laserlicht ergibt ein detailliertes Bild der Spinanregungen in Nanomagnetten, aber auch Informationen über Spinwellenausbreitung und -interferenz in komplexen magnonischen Bauelementen. Da der Laserpuls die Zeitauflösung begrenzt, haben sich Femtosekunden-Lasersysteme als besonders erfolgreich erwiesen. Damit sind sowohl hochfrequente Spinwellen bis in den THz-Frequenzbereich als auch fundamentale Streuprozesse wie Elektron-Magnon-Streuung zugänglich.

Maßgeschneiderte Bandstrukturen

Periodisch mikro- und nanostrukturierte Ferromagnete sind die Basis für so genannte magnonische Kristalle, in denen die Bandstruktur für Magnonen künst-

Abb. 5 Parallele ferromagnetische Nanostreifen (a–c, orange) mit nanoskaligen Lücken bilden einen reprogrammierbaren eindimensionalen magnonischen Kristall. Aufgrund der Kopplung über dynamische Streufelder bildet sich eine Bandstruktur mit erlaubten Minibändern aus (d–f). Bei paralleler magnetischer Ausrichtung (a, grüne Pfeile) beträgt die Gitterkonstante a , und die Grenze der Brillouin-Zone liegt bei π/a (d). Bei anti-paralleler Orientierung (b, c; rote und grüne Pfeile) ist die Gitterkonstante $2a$; damit ist die Brillouin-Zone halb so groß bei doppelter Anzahl Minibänder (e, f). Eine Spinpräzessionsanregung mit $\lambda = 4a$ (rot gestrichelt bzw. lokale Amplituden in blau) kann sich bei einem Magnetfeld $H = 0$ in beiden magnetischen Konfigurationen ausbreiten (a, b). Für $H \neq 0$ öffnet sich eine Frequenzlücke Δ an der Brillouin-Zonengrenze (f), und die Spinwelle kann wegen der Bragg-Streuung an einem periodisch variierenden inneren Magnetfeld nicht propagieren (c). Die Dispersionsrelationen wurden für 25 nm dicke und 300 nm weite Permalloy-Nanostreifen sowie eine Gitterkonstante von 400 nm gerechnet.



lich erzeugt und durch Geometrieparameter eingestellt wird. Daraus resultieren dynamische Eigenschaften, die in natürlichen Materialien nicht auftreten. Dies ist analog zu photonischen Kristallen aus dielektrischen Materialien, in denen bei geeigneter periodischer Variation des Brechungsindex Bandlücken und erlaubte Frequenzbänder (Minibänder) für Licht auftreten. Dadurch werden die ansonsten transparenten Materialien je nach Frequenz lichtundurchlässig. Entsprechende Bandstrukturen mit künstlichen Frequenzlücken ließen sich in den letzten Jahren auch für Spinwellen maßschneidern [8]. Das Besondere gegenüber photonischen Kristallen ist aber, dass geringe Magnetfelder ausreichen, um die Bandstruktur zu beeinflussen. Damit bilden magnonische Kristalle eine neue Art von künstlichen Kristallen mit flexibleren und zusätzlichen Eigenschaften gegenüber photonischen oder plasmomischen Kristallen.

So ist es mit bistabilen, nichtflüchtigen Magnetisierungszuständen von ferromagnetischen Nanodrähten möglich, die periodisch fortgesetzte Einheitszelle nachträglich einzustellen [9]. Die Einheitszelle eines solchen reprogrammierbaren magnonischen Kristalls besteht dann entweder aus einem einzelnen aufmagnetisierten Nanodraht oder z. B. aus zwei antiparallel ausgerichteten Nanodrähten (Abb. 5). Dadurch ändern sich sowohl die Ausdehnung der Brillouin-Zone als auch die Anzahl der erlaubten Minibänder. Mit einem schwachen Magnetfeld lässt sich zudem die Stärke des Potentials für die Bragg-Streuung der Spinwellen und damit die Größe der Bandlücke präzise einstellen. Zeitabhängige Magnetfelder erlauben es zudem, magnonische Kristalle dynamisch zu kontrollieren (Abb. 6a) [10]. „Auf Knopfdruck“ können propagierende Spinwellenpulse der Amplitude $A_S(t)$ einer maßgeschneiderten Bandstruktur unterworfen werden. Dies öffnet nicht nur eine Frequenzlücke (Abb. 6b) und reduziert die transmittierte Amplitude $A_T(t)$ (Abb. 6c), sondern im reflektierten Signal $A_R(t)$ zeigen sich auch frequenzkonjugierte Spinwellenpulse [10]. Derartige Pulse erlauben ungewöhnliche Signalverarbeitung durch z. B. „front reversal“.

Passive und aktive Bauelemente

Spinwellen-Bauelemente lassen sich in Anlehnung an Feldeffekttransistoren (FET) aus der Halbleitertechnologie als Drei-Tor-Bauelemente realisieren [1] (Abb. 3b). Sie bestehen dann aus Emitter („Source“) und Detektor („Drain“) sowie einem funktionellen Zwischenbereich („Gate“), um die Spinwellen-Eigenschaften kontrolliert zu verändern und so das Ausgangssignal zu steuern. Man unterscheidet passive und aktive Bauelemente. Ein bereits umfassend untersuchtes passives Bauelement besteht zunächst aus einem Wellenleiter für Spinwellen. Dabei wird wie beim dynamischen magnonischen Kristall anstelle von Permalloy häufig Yttrium-Eisen-Granat (YIG) verwendet, das eine äußerst geringe Spinwellen-Dämpfung besitzt. Induktive

Antennen injizieren Spinwellen in den Wellenleiter und detektieren diese am Ende der Laufstrecke. Dabei lassen sich im Gate, d. h. entlang der Laufstrecke, die Phase oder die Amplitude durch verschiedene externe Parameter gezielt verändern, z. B. durch das lokale Magnetfeld einer einzelnen zusätzlichen Leiterbahn. Variiert das Magnetfeld langsam, arbeitet das magnonische Bauelement als Verzögerungsstrecke oder Phasenschieber. Bei Frequenzen im Bereich der Spinwellen-Frequenz oder darüber ändert sich hingegen die Frequenz des Ausgangssignals (Frequenz-Mischer) oder die Amplitude wächst an (Spinwellen-Verstärker). Filter-Bauelemente für Spinwellen entstehen, wenn inhomogene Magnetfelder mit geeigneter Stärke und räumlichem Profil im Gate angelegt werden.

YIG-basierte magnonische Bauelemente wurden bereits so verschaltet und in Rückkoppelschleifen betrieben, dass sie als Spinwellen-Interferometer und logische Gatter arbeiten, beides grundlegende Bauelemente zum Aufbau einer Spinwellen-Logik. Nun beschäftigen sich Forschungsgruppen damit, dies material- und designtechnisch umzusetzen sowie in elektrische Schaltkreise einzubinden [11]. Aufgrund

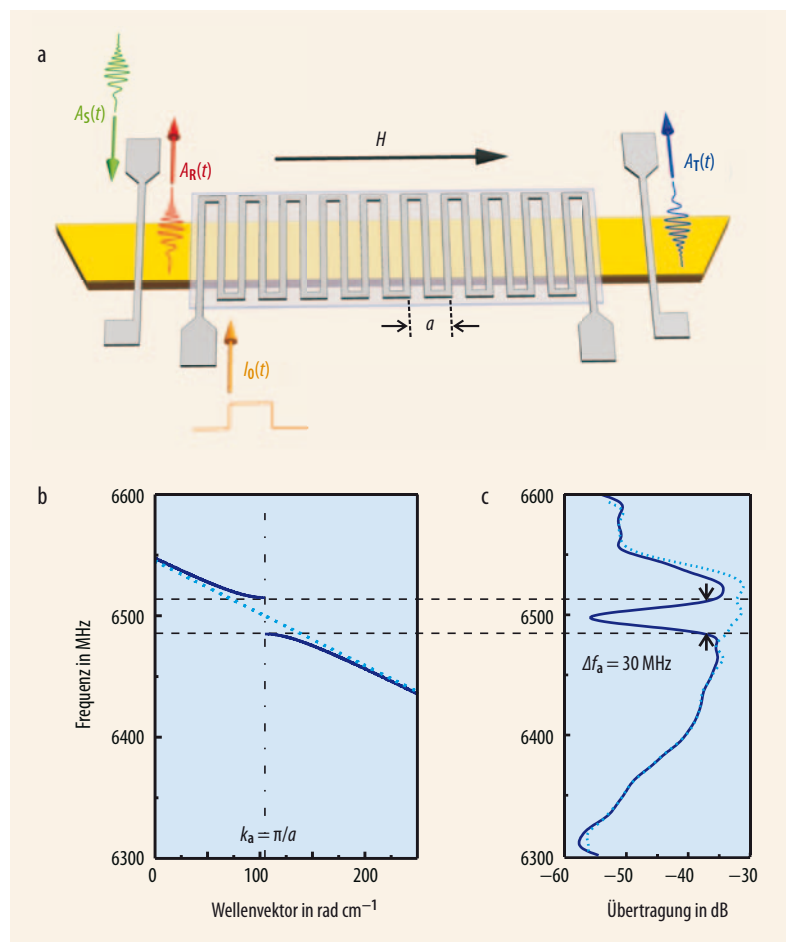


Abb. 6 (a) Eine mäanderförmige Leiterbahn der Periode a , die auf einem magnetischen YIG-Kristall integriert ist, bildet einen dynamischen magnonischen Kristall. Daneben befinden sich zwei Mikrowellen-Antennen, um Spinwellen zu erzeugen und zu detektieren. (b) Die Dispersionsrelation mit einem eingepprägten Strom I_0 von 1 A (durchgezogene Linien) in der Leiterbahn unterscheidet sich von derjenigen ohne Strom (gepunktete Linie) durch eine Frequenzlücke. (c) Im Experiment wird in dieser Bandlücke um 6500 MHz eine stark verminderte Transmission gemessen.

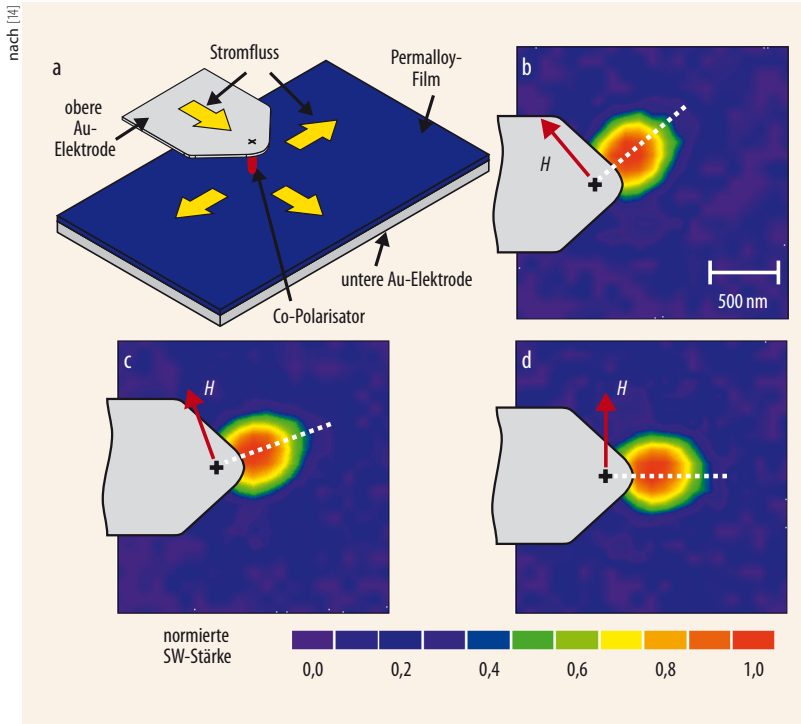


Abb. 7 Mit einem Spin-Transfer-Torque-Nanooszillator lässt sich die Emission von Spinwellen (SW) erzwingen (a). Die Ausbreitungsrichtung der strom-induzierten Spinwellen (gestrichelte Linien

in b–d) ist dabei jeweils senkrecht zum in der Ebene des Films angelegten Magnetfeld H und variiert je nach dessen Orientierung.

der großen Wellenlängen im YIG sind die Prototypen jedoch noch mikro- bis millimetergroß. Externe makroskopische Mikrowellen-Bauteile dienen dabei dazu, die modifizierten Spinwellen-Signale auszuwerten und diese in logische Gatter einzuspeisen. Im Zuge der Weiterentwicklung der Magnonik gilt es, diese makroskopischen Schaltungsteile zu vermeiden. Zudem geht die Umwandlung der Spinpräzession in elektrische Signale einher mit einem großen Signalverlust. Für die Nanomagnonik existieren Vorhersagen, dass eine mikroskopische Domänenwand einen Spinwellen-Phasenschieber ermöglichen sollte [12].

Entwicklungen und Herausforderungen

Eine Motivation der Magnonik besteht darin, Spinwellen zum Transport und zur Verarbeitung von Informationen zu nutzen. Die Nanotechnologie hat dazu bereits interessante Perspektiven geliefert. Noch ist aber die Effizienz der Signalumwandlung zwischen elektrischen Komponenten und magnonischen Prototyp-Bauelementen gering. Hier sind neue Schnittstellen nötig, um das Potenzial der Magnonik auszuschöpfen. Im Bereich der Elektronik könnten mögliche Ansätze auf magnetischen Nanooszillatoren [13] und Nanokontakten aufbauen, die den stromgesteuerten Spin-Transfer-Torque (STT) zur Anregung bzw. den Riesenmagnetowiderstandseffekt zum Auslesen der Spinpräzessionsbewegung ausnutzen. Der STT-Effekt tritt in Nanomagneten auf, in denen ein spinpolarisierter elektrischer Strom fließt. Die Elektronenspins

transferieren ihr Drehmoment auf die Magnetisierung und lenken diese oberhalb eines charakteristischen Schwellenstroms aus. Damit lässt sich die Emission von Spinwellen erzwingen. Bei einem derartigen mit Gleichstrom betriebenen Spinwellen-Emitter stellte sich die Abstrahlung als nicht isotrop heraus und ließ sich insbesondere von einem Magnetfeld räumlich steuern (Abb. 7) [14].

Generell ist immer noch offen, welches magnetische Material sich für die Realisierung von dämpfungsarmer Magnonik und effizienten Schnittstellen zur Optik sowie Elektronik besonders eignet. Die in Isolatoren von Spinwellen hervorgerufenen Spinströme erlauben vermutlich eine Signalausbreitung über viel größere Distanzen als konventionelle leitende spintronische Bauelemente [15]. Die Dämpfungslänge kann in Isolatoren bei Raumtemperatur einige Millimeter betragen, während sie in den entsprechenden Metallen auf Mikrometer begrenzt ist. Den Einfluss von Strukturändern auf die Dämpfung von Spinwellen muss man für metallische und isolierende Ferromagnete jedoch noch grundlegend untersuchen. Die vollständige Kontrolle über Spinwellen würden dreidimensional periodisch strukturierte Ferromagnete versprechen. 3D-magnonische Kristalle mit künstlich erzeugter Bandstruktur harren jedoch ihrem experimentellen Nachweis.

Für technologische Weiterentwicklungen ist es zudem erforderlich, die Simulationswerkzeuge stetig zu verbessern. Das Verhalten der Bauelemente und ihrer Schnittstellen wird zum einen durch mikroskopische Phänomene wie die Austauschwechselwirkung und z. B. den Spin-Transfer-Torque bestimmt. Für diese Phänomene ist die atomistische Längenskala relevant. Zum anderen spielen die Dipolwechselwirkung zwischen Nanomagneten und angelegte elektromagnetische Felder auf makroskopischer Längenskala eine entscheidende Rolle. Diese Spannweite von relevanten Längenskalen erfordert „multi-scale modelling“ und vergrößert den Simulationsaufwand bei immer komplexer werdenden Bauelementen enorm. Hier sind Ansätze erforderlich, die zuverlässige Vorhersagen über zu verwendende Materialien und integrierte magnonische Bauelemente erlauben.

Einzelne Erfolge der Magnonik-Forschung sind bereits in der „International Technology Roadmap for Semiconductors“ aufgeführt, um damit neuartige Bauelemente jenseits der gängigen Halbleiter-Technologie zu definieren („non-FET non-charge based devices“). Angestrebt werden Bauelemente mit neuartigen Funktionalitäten. So erlauben Magnon-basierte Mikrowellenbauelemente die reziproke und nichtreziproke Signalverarbeitung [1]. Generell kann man aber davon ausgehen, dass Anstrengungen über das nächste Jahrzehnt hinaus nötig sind, um relevante technologische Alternativen zu erarbeiten. Das Forschungsfeld „Nanomagnonik“ steht mit allen Herausforderungen und Perspektiven damit sicherlich erst an seinem Anfang.

Danksagung

Wir danken Vladislav Demidov, Burkard Hillebrands und Volodymyr Kruglyak für intensive Diskussionen, Bernhard Botters, Sebastian Neusser und Jesco Topp für mikromagnetische Simulationen und Bandstrukturberechnungen sowie Christoph Hohmann und Henning Ulrichs für Illustrationen. Die Forschung der Autoren wurde unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Exzellenzclusters „Nanosystems Initiative Munich (NIM)“ und des Schwerpunktprogramms 1133 „Ultrafast magnetization processes“ sowie die Europäische Gemeinschaft im 7. Rahmenprogramm (FP7/2007-2013) unter Förderkennzeichen 212257 (MASTER), 228673 (MAGNONICS), und 247556 (NoWaPhen).

Literatur

- [1] V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov und D. Grundler, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 264001 (2010)
- [2] C. Mathieu et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3968 (1998)
- [3] V. E. Demidov et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 232503 (2008)
- [4] A. V. Kimel et al., *Nature* **435**, 655 (2005)
- [5] M. Tsai et al., *Nature* **406**, 46 (2000)
- [6] S. O. Demokritov und V. E. Demidov, *IEEE Trans. on Magn.* **44**, 6 (2008)
- [7] M. Buess et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 077207 (2004)
- [8] Yu. V. Gulyaev et al., *JETP Lett.* **77**, 567 (2003)
- [9] J. Topp, D. Heitmann, M. Kostylev und D. Grundler, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 207205 (2010)
- [10] A. V. Chumak et al., *Nature Commun.* **1**, 141 (2010)
- [11] A. Khitun, M. Bao und K. L. Wang, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 264005 (2010)
- [12] R. Hertel, W. Wulfhekel und J. Kirschner, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 257202 (2004)
- [13] S. I. Kiselev et al., *Nature* **425**, 380 (2003)
- [14] V. E. Demidov, S. Urazhdin und S. O. Demokritov, *Nature Mat.* **9**, 984 (2010)
- [15] Y. Kajiwara et al., *Nature* **464**, 262 (2010)

DIE AUTOREN

Sergej Demokritov (FV Magnetismus) studierte am Moskauer Institut für Physik und Technologie Physik und promovierte am Kapitza-Institut für Physikalische Probleme in Moskau. Forschungsaufenthalte führten ihn ans Forschungszentrum Jülich und später an die TU Kaiserslautern, wo er sich auch habilitierte. Seit 2004 ist er Professor an der Universität Münster mit dem Schwerpunkt „Nichtlineare magnetische Dynamik“.



Dirk Grundler (FV Halbleiterphysik, Magnetismus) forschte während der Doktorarbeit bis 1995 an supraleitender Elektronik in den Philips Forschungslaboratorien in Hamburg. An der Universität Hamburg habilitierte er sich 2001 auf den Gebieten der Halbleiter-Spintronik und des Magnetismus in Nanostrukturen. Im Jahr 2005 wurde er an das Physik-Department der TU München berufen. Forschungsschwerpunkte sind Nanomagnonik und Magnetismus von niedrigdimensionalen Elektronensystemen. Seit 2011 ist er auch am Institute of Materials der École Polytechnique Fédérale de Lausanne tätig.

