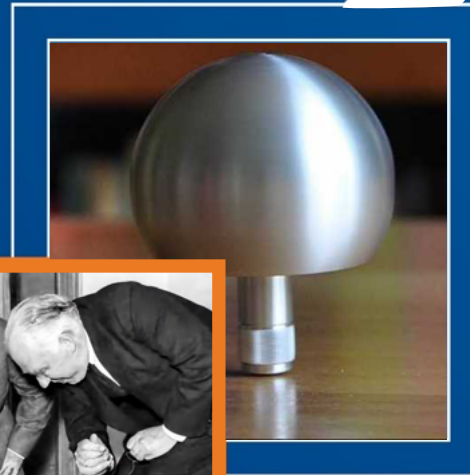
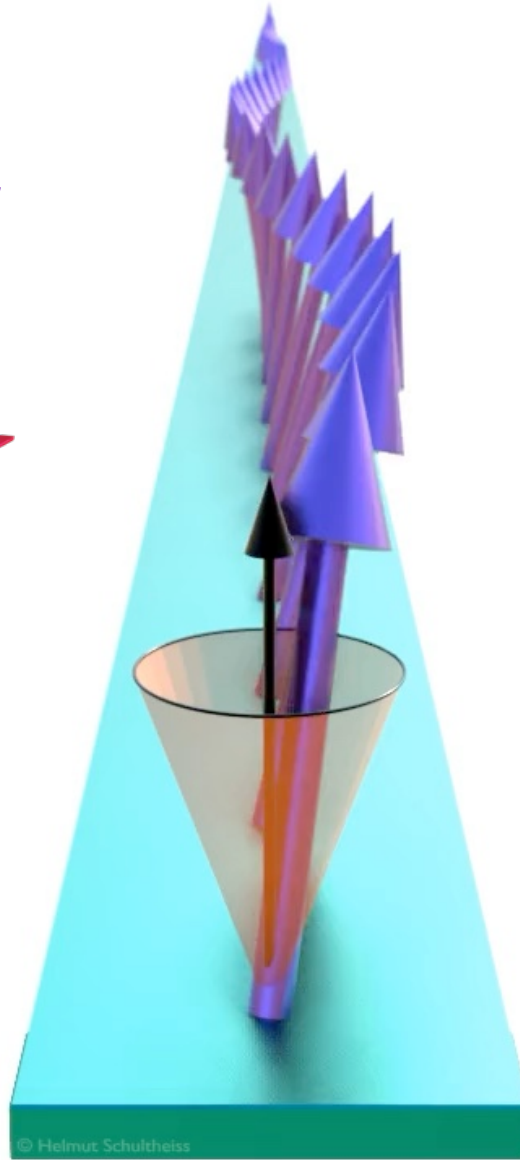
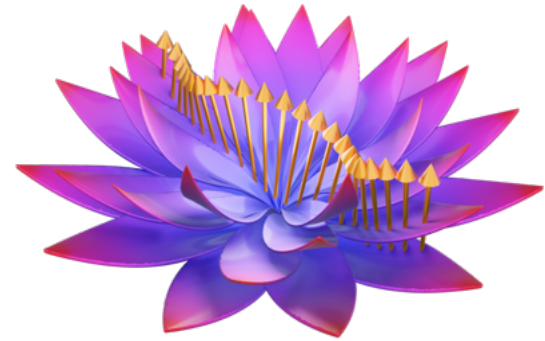




# Magnonics for information technology

Spin! Don't charge :)





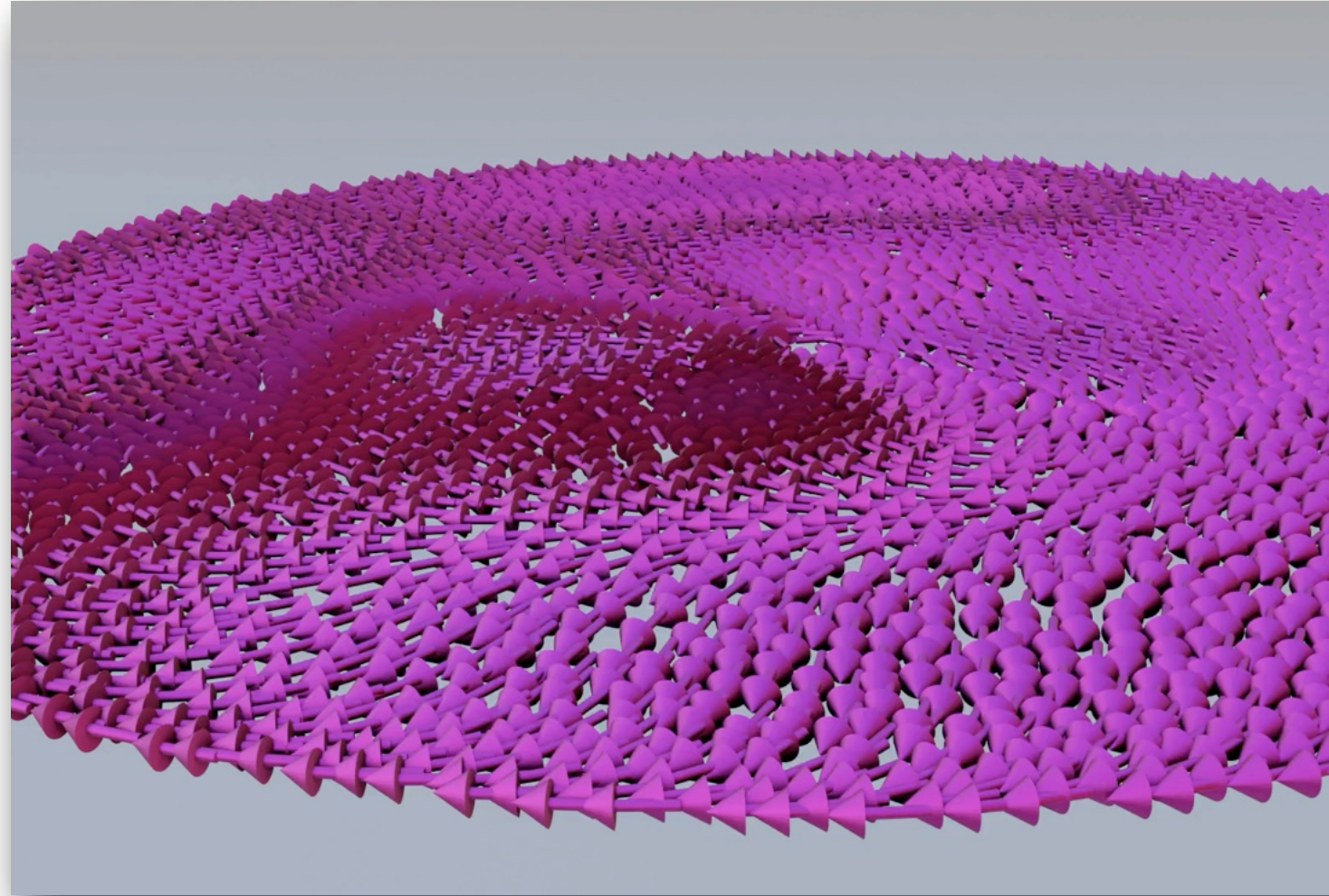
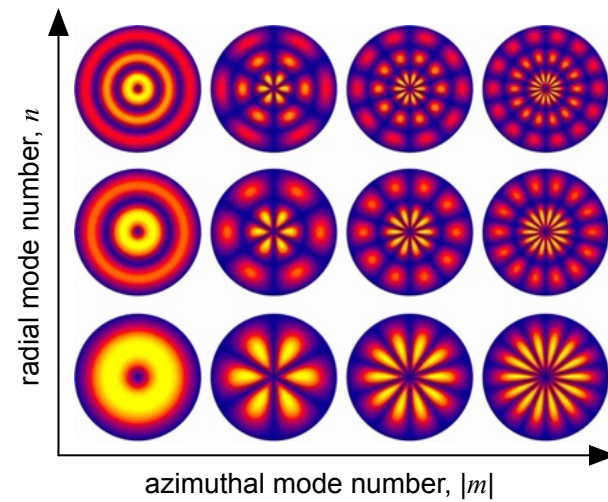
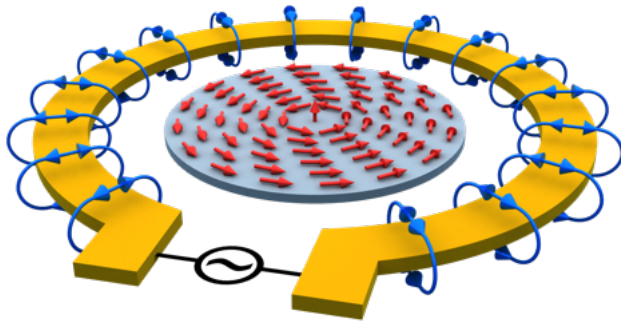
# Magnons

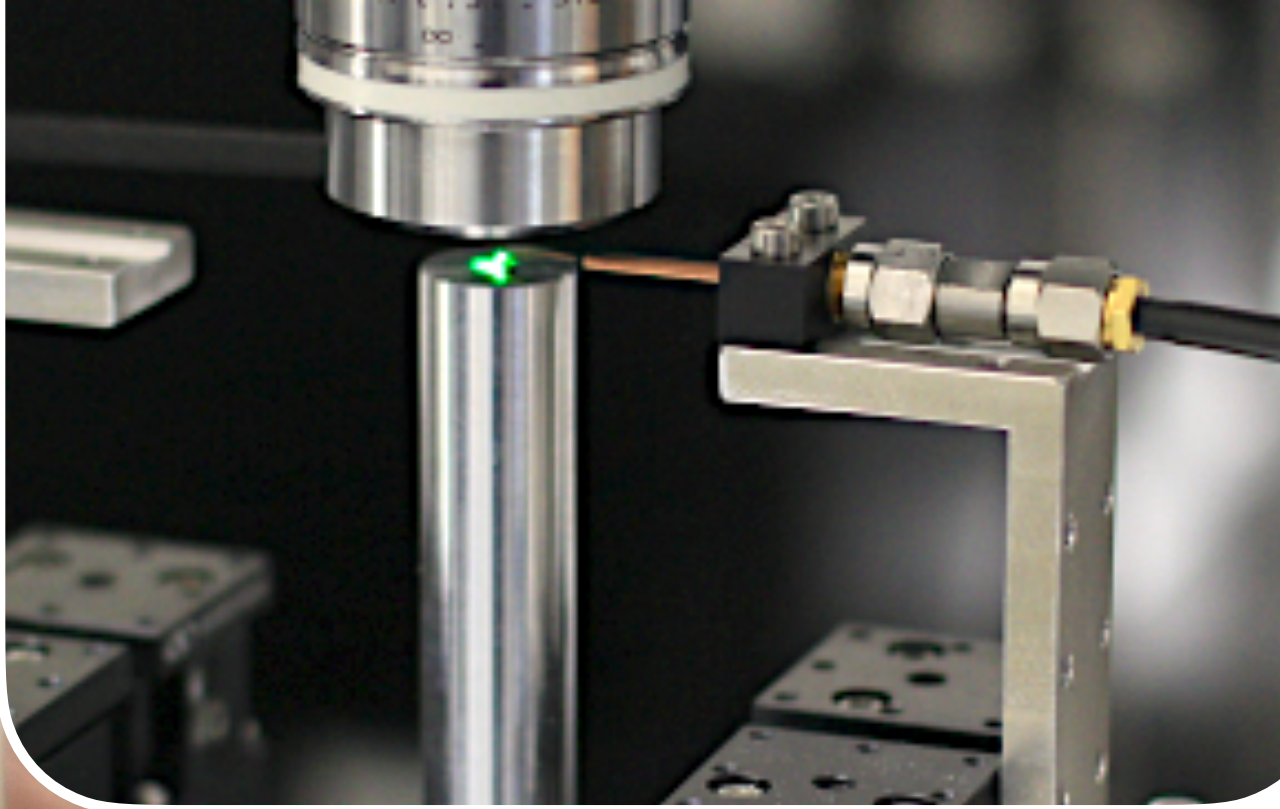
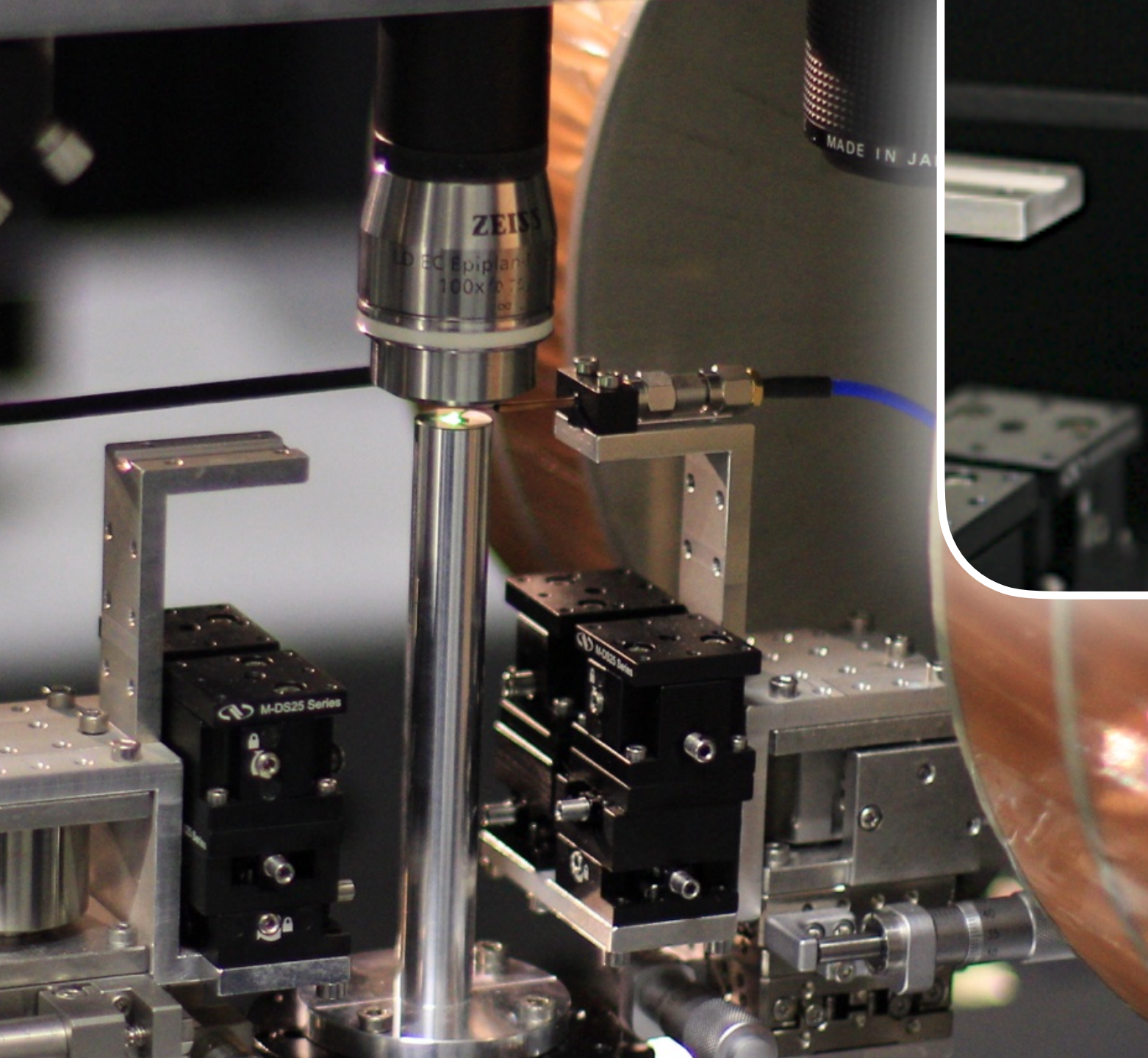
universal adapter for  
information and communication technologies

- live in magnetically ordered systems
- consider them as  
*„quanta of collective spin excitation“*
- contribute to „temperature“  
*lattice vibration → phonon*  
*spin precession → magnon*
- frequency: **MHz to THz**  
wavelength: 10nm-10μm
- no particle transport, no ohmic losses

# Magnons in small elements

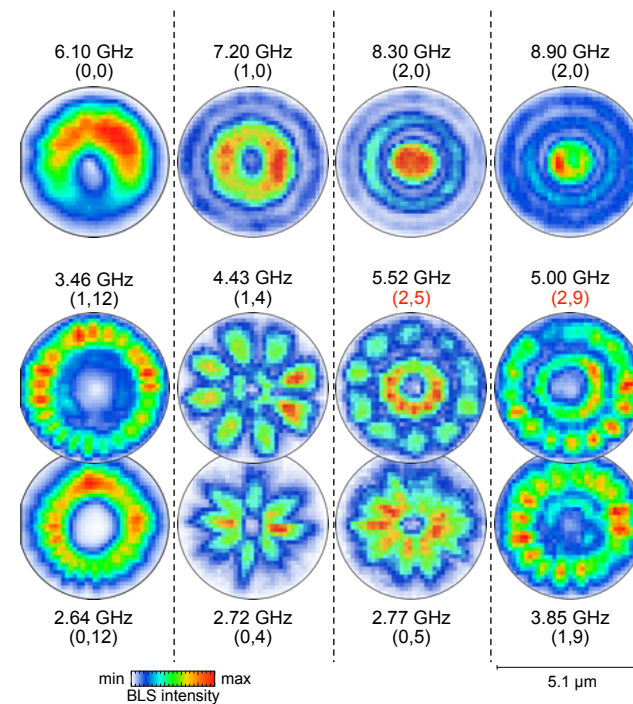
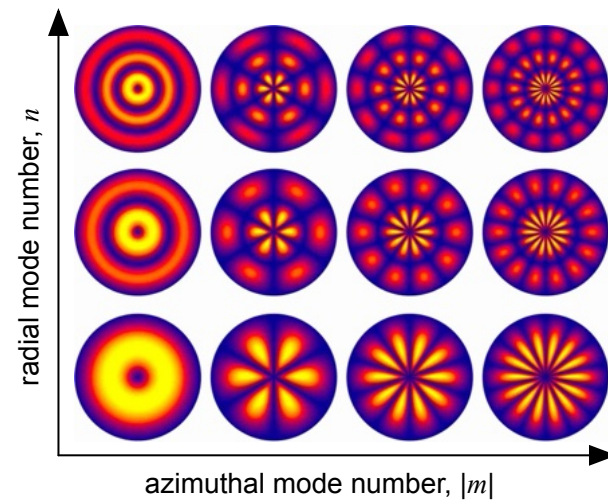
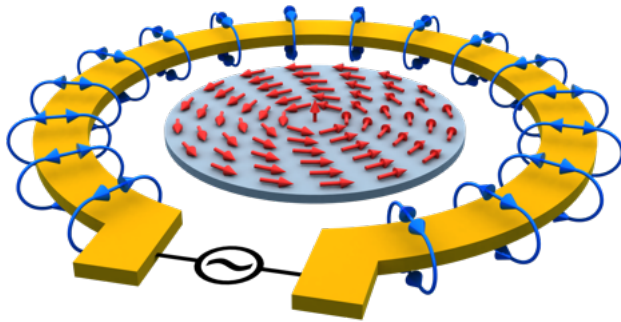
Access by microwaves and lasers

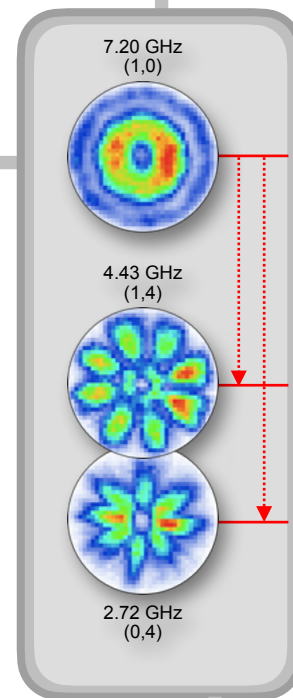


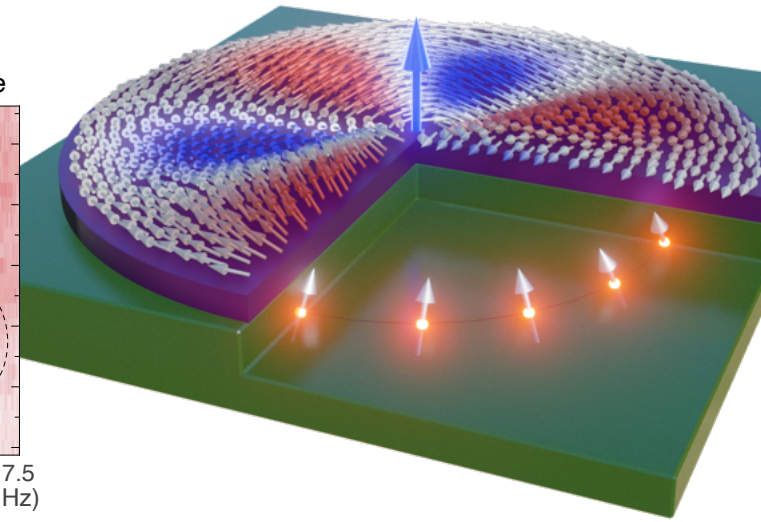
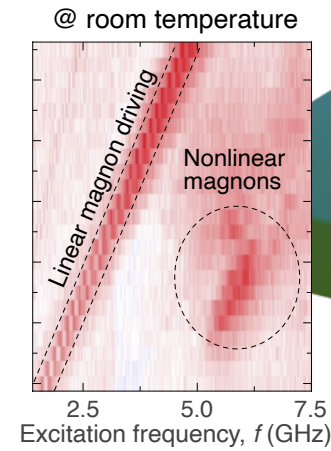
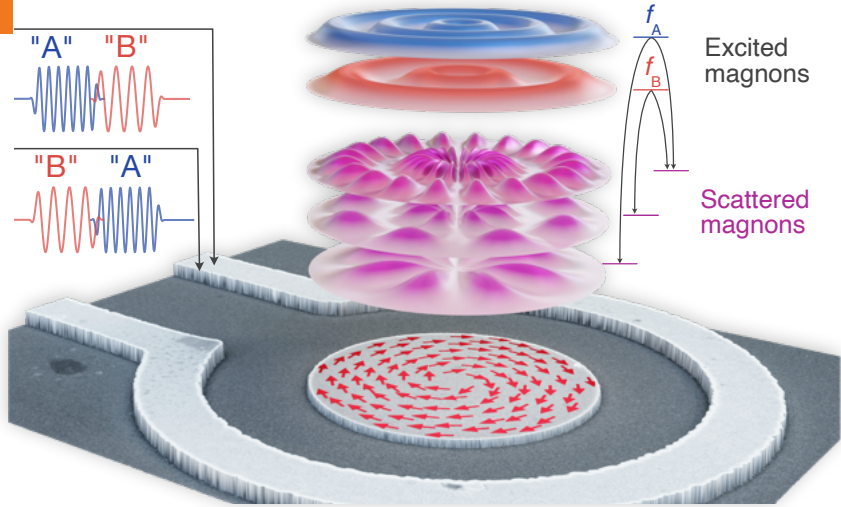


# Magnons in small elements

Access by microwaves and lasers





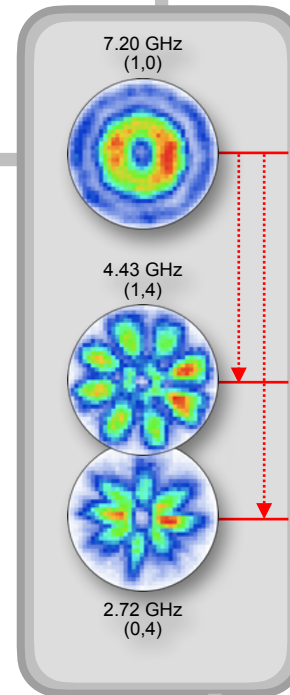
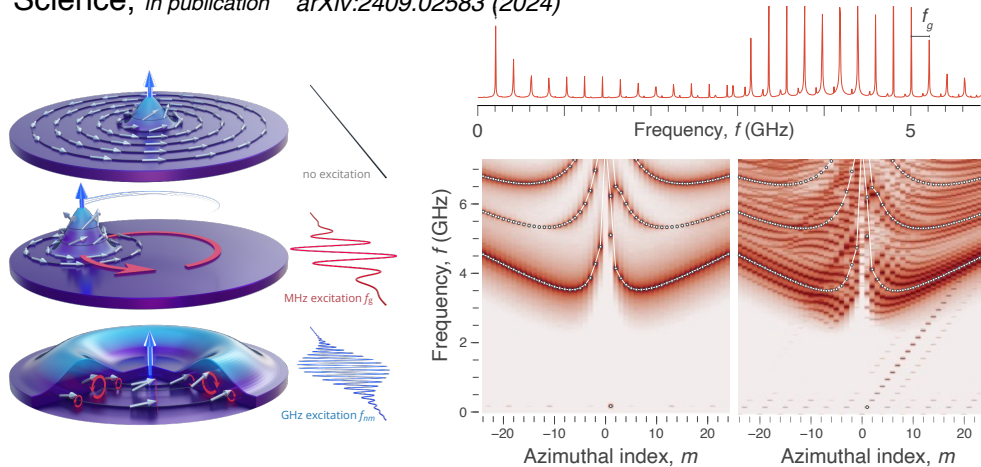


## Pattern recognition in reciprocal space with a magnon-scattering reservoir

Nature Communications 14, 3954 (2023)

## Self-induced Floquet magnons

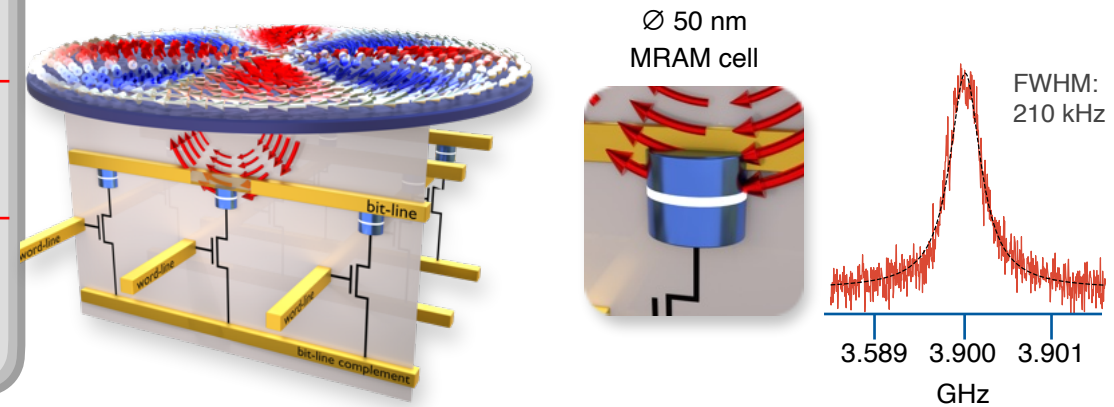
Science, in publication arXiv:2409.02583 (2024)



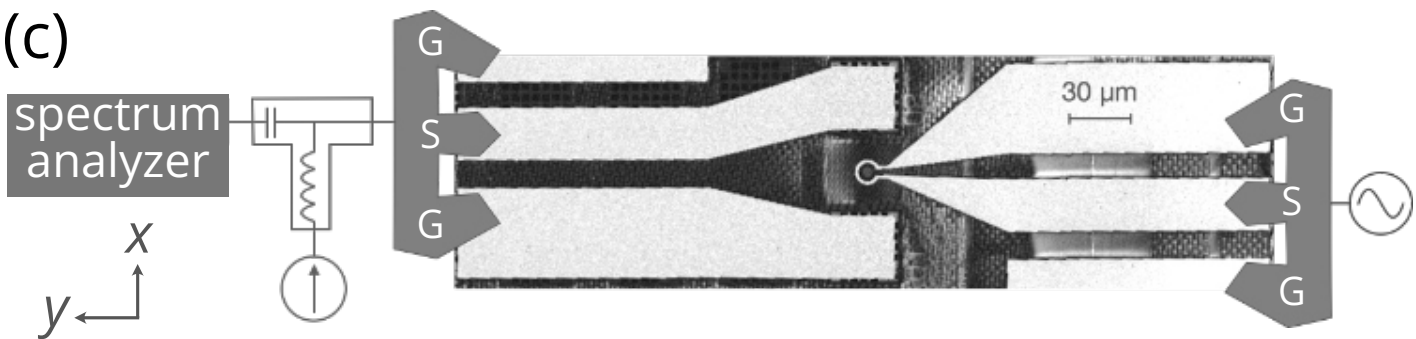
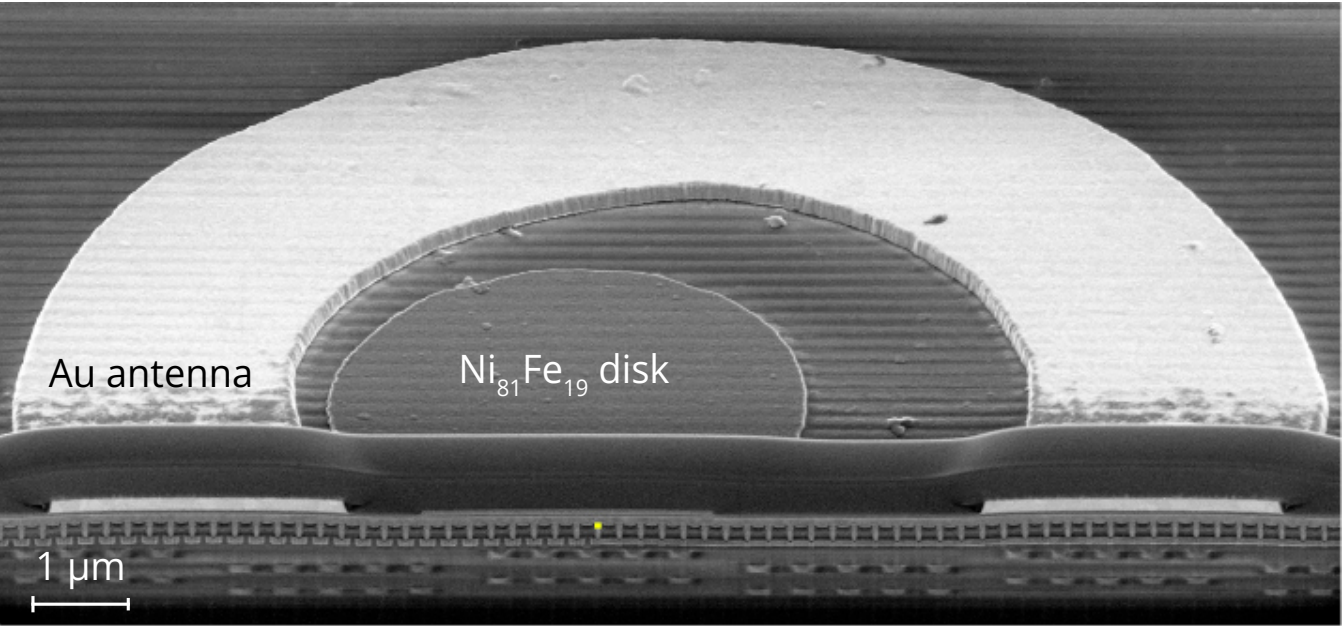
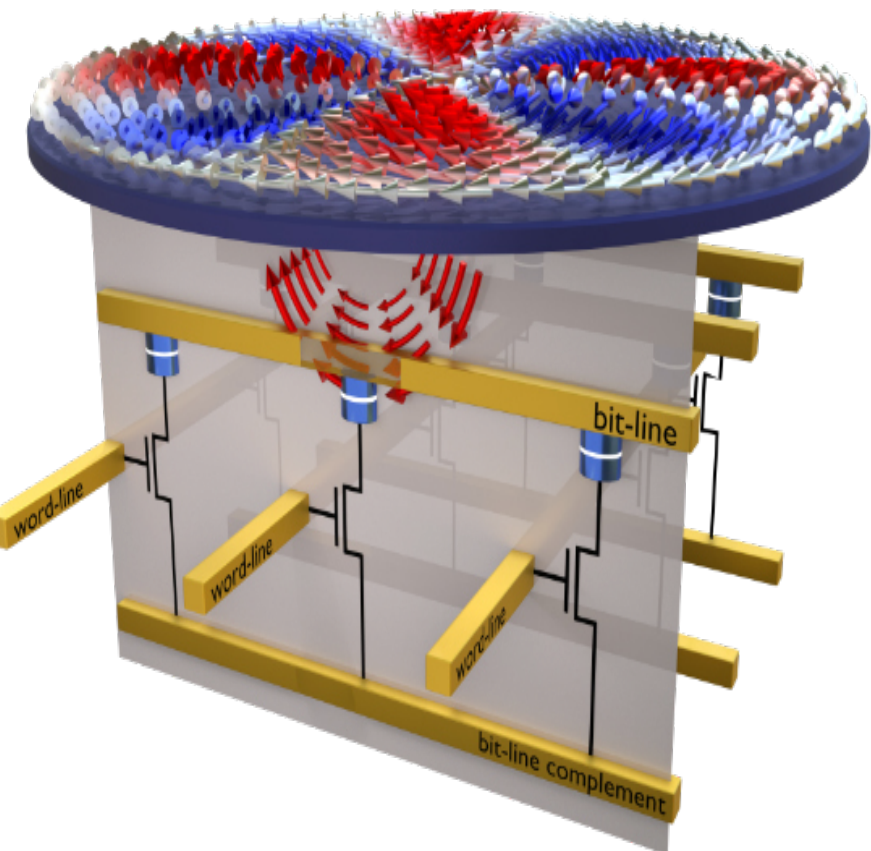
## Parametric magnon transduction to spin qubits.

Science Advances 10, eadi2042 (2024)

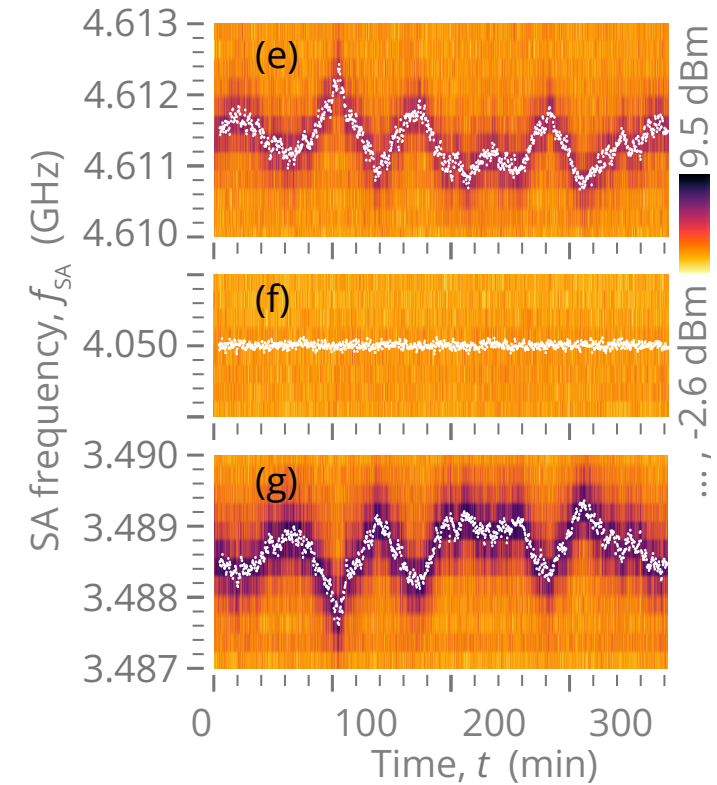
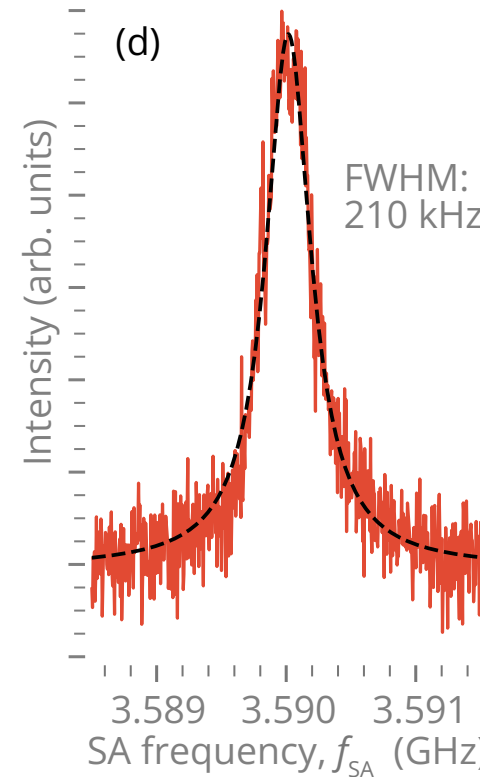
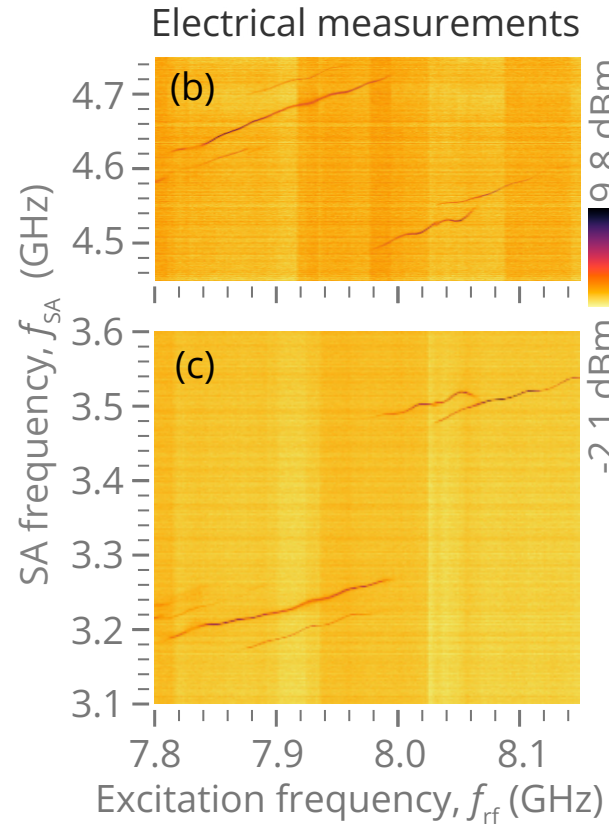
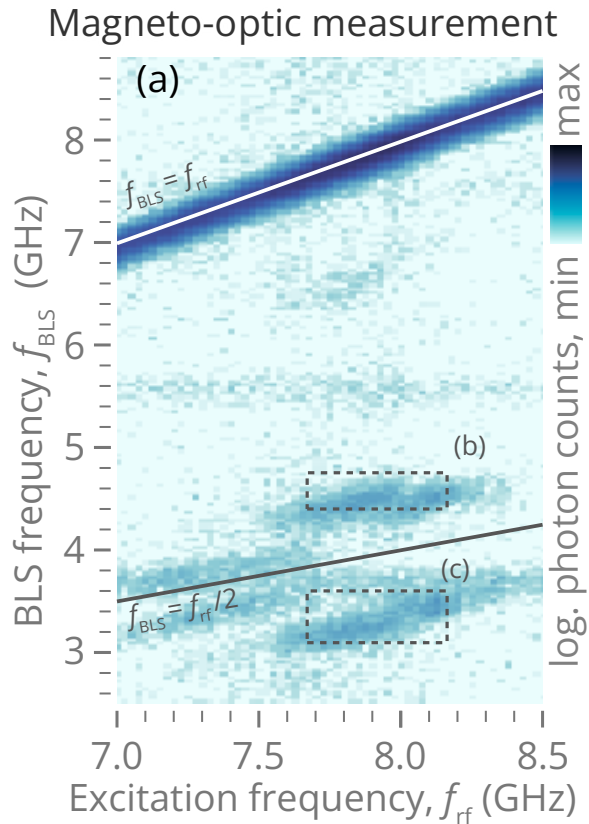
## Advancing Spintronics: Breakthrough of electrical detection of magnons with MRAM integration



# Electrical Detection



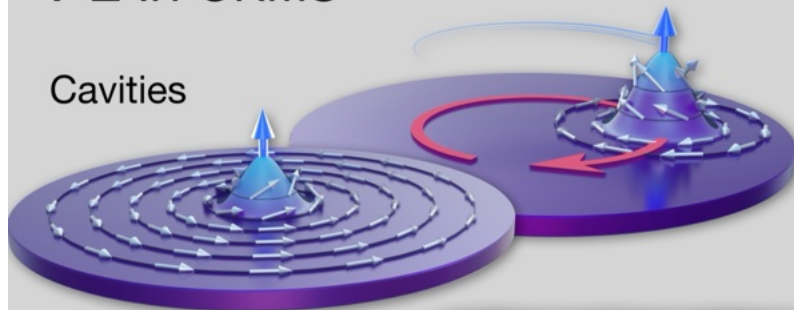
# Electrical Detection



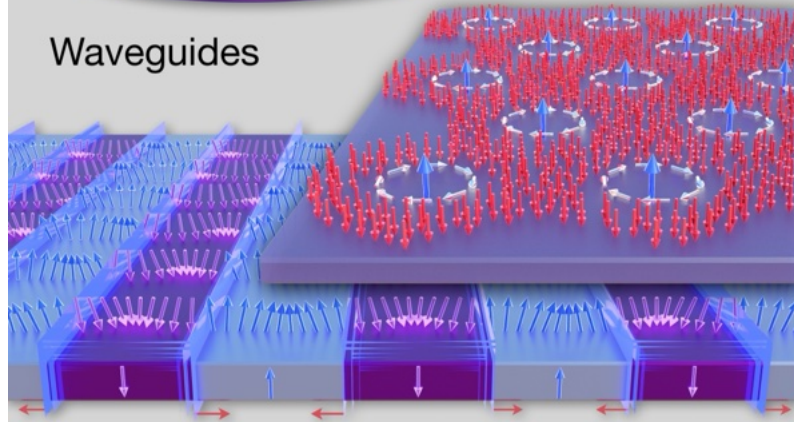
# Floquet magnons *using time as a resource...*

## PLATFORMS

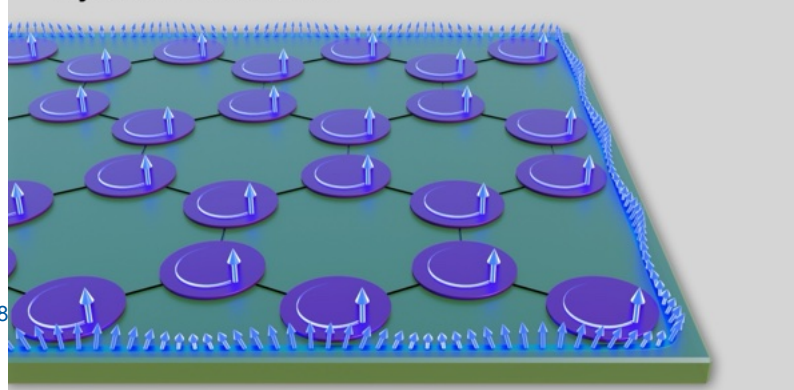
Cavities



Waveguides

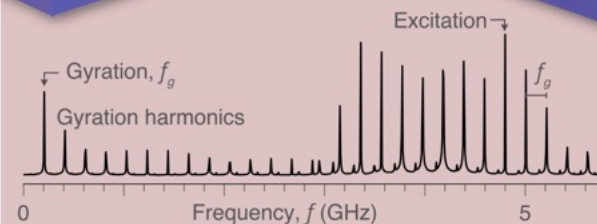
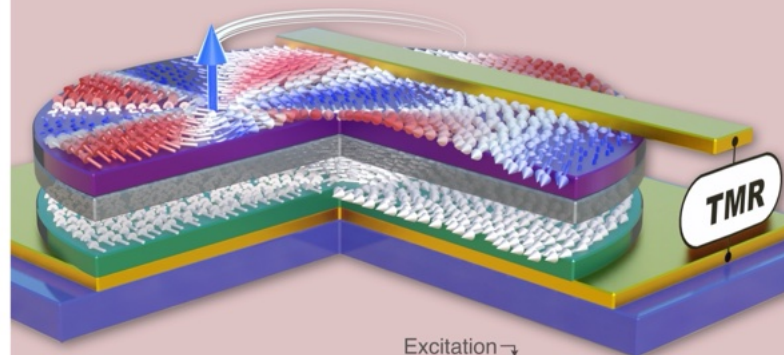


Hybrid materials



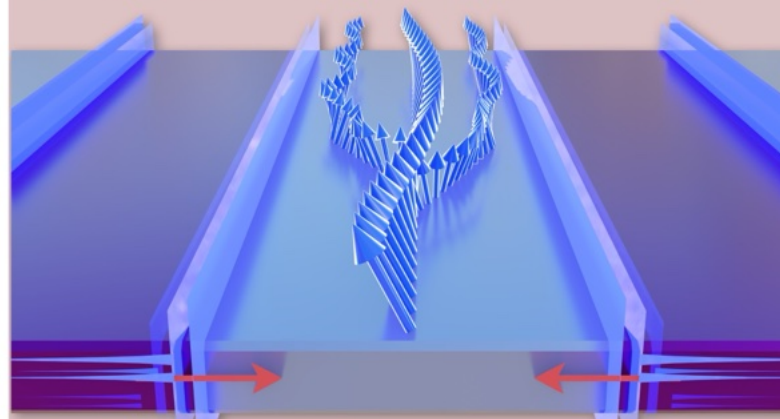
## OBJECTIVE 1

Frequency up and down conversion



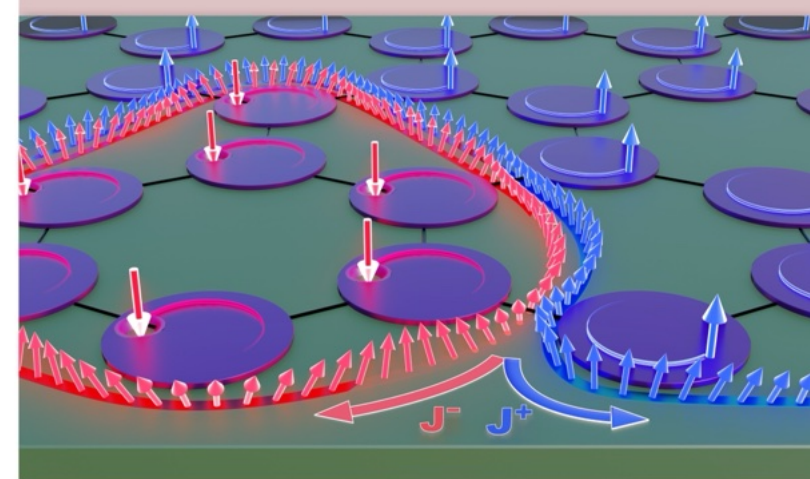
## OBJECTIVE 2

Frequency division multiplexing



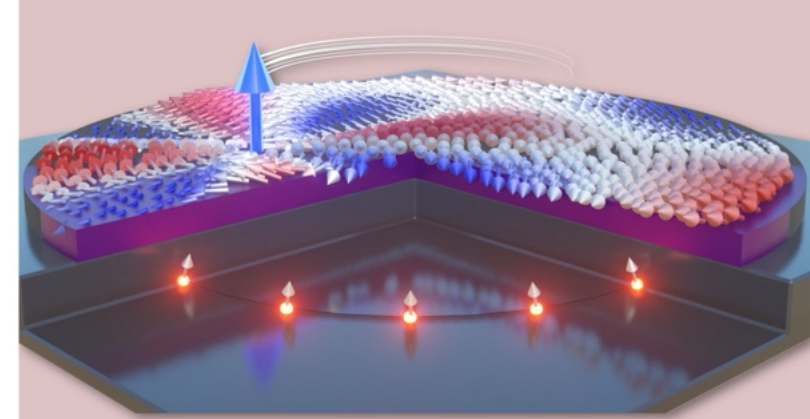
## OBJECTIVE 3

Beam steering

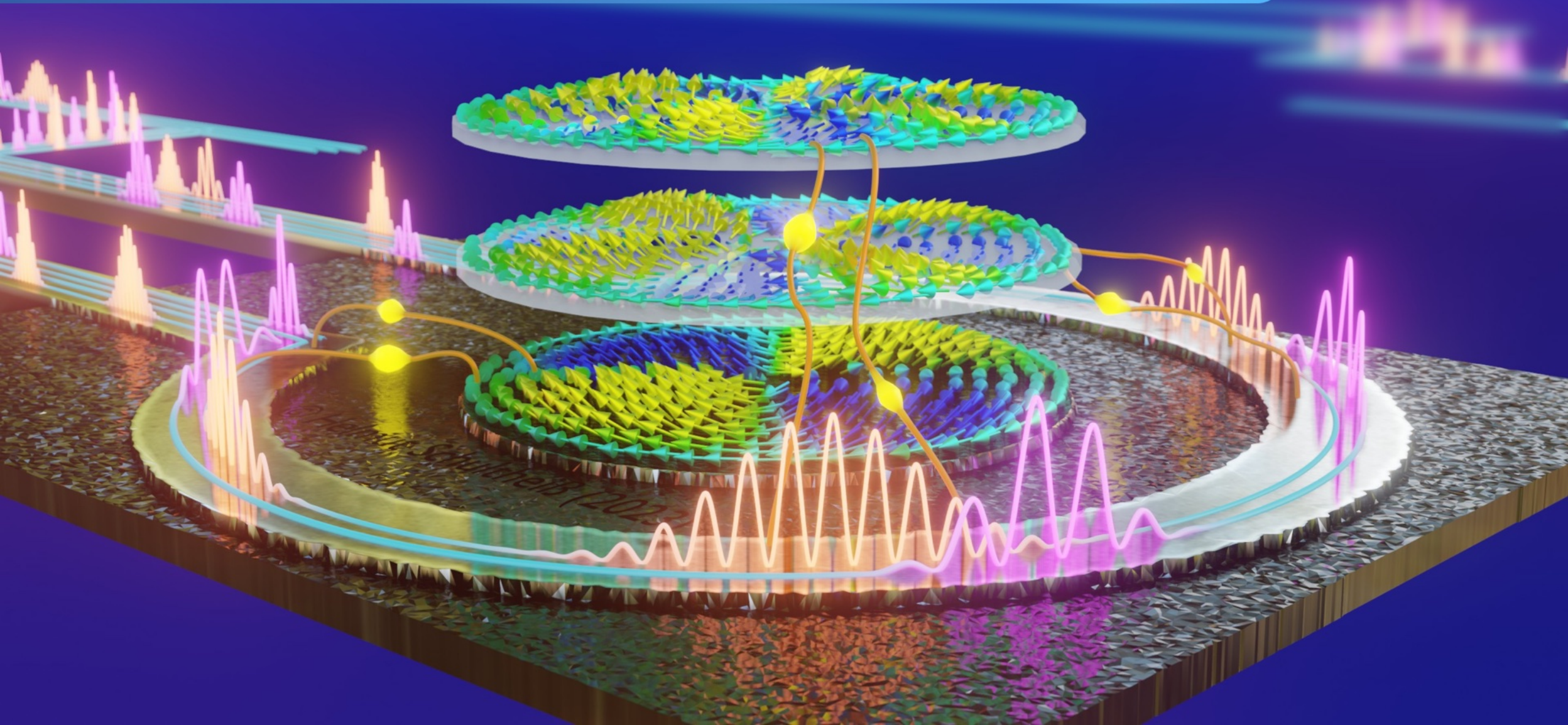


## OBJECTIVE 4

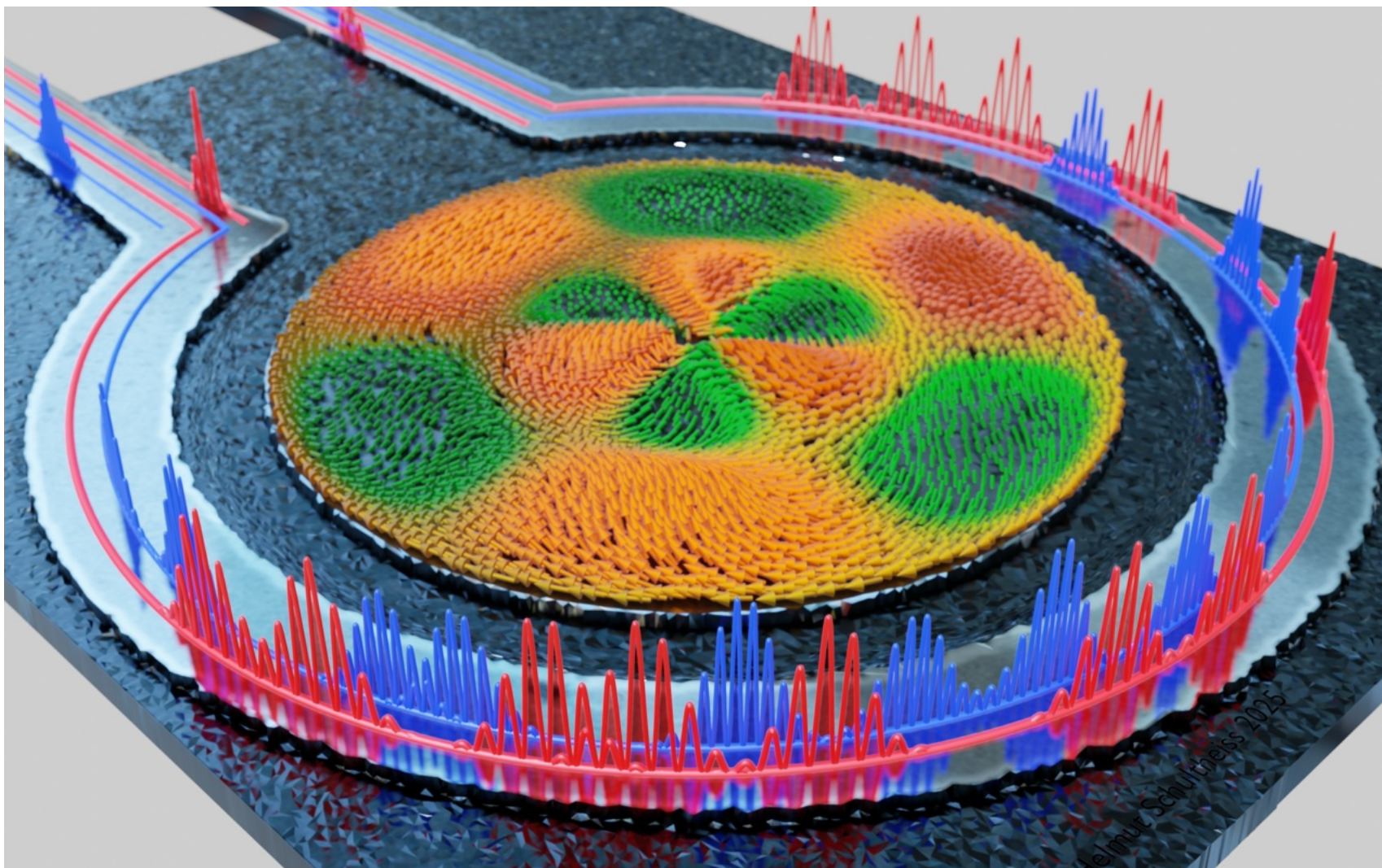
Controlling qubits



"There is a vast literature these days on various forms of reservoir computing, but this paper is one of the very few that meaningfully connects the physics to the computing capabilities to the device." *one of Nature Comms' reviewers*



# Reservoir & frequency adapter





# Trommeln für die grüne Zukunft

Die heutige Computer-Hardware hat ein Problem: Sie ist ineffizient. Eine Lösung versprechen unkonventionelle Rechnerarchitekturen.

Von Roland Wengemayr

Es ist kein geringer Beitrag, den die Digitalisierung zum Klimawandel leistet. Schon heute erreicht der globale CO<sub>2</sub>-Fußabdruck das Niveau des internationalen Flugverkehrs. Vor diesem Hintergrund könnte man fast ein „Heizungsgeiz“ für Computer fordern, denn heutige Mikroprozessoren sind Elektronikern mit Datenverarbeitung als Nebenprodukt. Da die winzigen Transistoren die Zwischenergebnisse ihrer Rechnungen nicht speichern können, muss der Prozessor permanent Daten zwischen dem zentralen Rechenkern, der CPU, und dem Arbeitsspeicher der RAM hin und her schicken. Das sorgt für regen elektrischen Verkehr der Bits durch die mikro- und nanometergroßen Strukturen und für horrenden Reibungsverlust und dadurch erzeugte Wärme.

„Neunzig Prozent der Energie, die man in einem Computer hineinsteckt, wird in Hitze verlorben“, erklärt Helmut Schultheiß in seinem Büro im Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Der Physiker forscht auf dem Gebiet der sogenannten Magnonik, das die fließenden Elektronen heutzutage durch einen radikal neuen Informationsträger ersetzen will: den Elektronenmagnon. Gelingen dies, so wäre das eine Wende hin zu einer grünen Informationsverarbeitung.

Der Spin ist ein quantenmechanisches Drehimpuls der Elektronen und macht den Ladungsträger zu einem winzigen Elementarmagneten. In geeigneten Materialien formen freie Elektronenmagnonen ein System, durch das magnetische Wellen laufen können – die Spinwellen, auch Magnonen genannt. Vereinfacht kann man sich Magnonen wie die Wellen vorstellen, die der Wind über ein Kornfeld treibt, wobei die schwankenden Halmstängel verknüpft bleiben. Ganz ähnlich verhalten die Elektronen in einer Spinwelle an ihren jeweiligen Atomen und wandeln wie kleine Komposita in hin und her.

Im Labor wurden schon magnetische Logikbausteine und Transistoren gefertigt und deren besondere Funktionsweise demonstriert. Allerdings ist es eine enorme Herausforderung, die bestehende Halbleiterindustrie für die Fertigung neuer Chiparchitekturen zu gewinnen. Die erste Hürde besteht darin, die etablierte CMOS-Technologie mit Magnonik-Bausteinen zu verheiraten, die zweite Hürde ist die Halbleiterindustrie selbst. Sie hat Milliarden in ihre Fabriken investiert und muss von Sprung in ein komplett neues Materialsystem überzeugt werden, welches die Magnonik erfordert. Hier droht das berüchtigte „Tal des Todes“, das in der Akzeptanzkurve neuer Technologien zwischen der Labordemonstration und der breiten Anwendung lauert.

Um der Magnonik zum Durchbruch zu verhelfen, haben Katrin und Helmut Schultheiß gemeinsam das Projekt „Nimfea“ initiiert, das großzügig von der EU gefördert wird. Entscheidend für die Förderung war der Einstieg zweier großer Chiphersteller: der amerikanischen Firma GlobalFoundries, die auch in Dresden produziert, sowie der deutschen Infineon. Bei Nimfea geht es nicht allein um Magnonen, sondern auch um ein alternatives Computerkonzept, den „Reservoir-Computer“. Ein solcher Rechner besitzt grundsätzlich nicht aus Transistoren, sondern aus einem physikalischen System mit einer entscheidenden Eigenschaft: Es muss stark „nichtlinear“ sein. Dieses Kriterium erfüllen Spinwellen perfekt. Nichtlinearität ist uns zum Beispiel als verzerrter Sound einer Rockstarie vertraut. Darin sind viel mehr Frequenzanteile enthalten als in der ursprünglichen Saitenschwingung. Dies ist auch bei Spinwellen der Fall.

Helmut Schultheiß erklärt das Prinzip eines Reservoir-Computers anhand einer Pommesort. Vor zwanzig Jahren bauten Christaube Fernando und Sampsa Soikkola von der University of Sussex einen frühen Reservoir-Computer aus

zum Beispiel „ABAP“. Setzt man die Scheibe der Dresdner Fenchel auf einen sogenannten MRAM-Speicherchip, dann wirken dessen magnetische Speicherzellen im Prinzip wie die Tasten einer Tastatur. Die Tasten drücken abnehmer unter den Saiten einer E-Gitarre.

MRAMs sind magnetische Schreib-Lese-Speicher, sie speichern Bits in Form von Elektronenspins – und GlobalFoundries stellt genau solche Speicherbausteine industriell in Dresden her. So ein MRAM-Chip lässt sich relativ einfach mit dem magnetischen Schichten kombinieren, und so kann dann der Speicher die verschiedenen Magnon-Überlagerungsmuster erkennen. Ein daran angeschlossenes, einfaches künstliches neuronales Netz ist dann in der Lage, diese Muster zu „lesen“ und nach ihrem Informationsgehalt zu sortieren.

Es geht also um Mustererkennung, wie beim Fingerabdrucksensor eines Smartphones. Das Dresdner Bauteil bildet einen Reservoir-Computer, der Eingangsmuster in Echtzeit analysieren kann. Das könnte in Zukunft die vom Sensor einer Kamera ausgehenden Daten sein oder ein Elektrokardiogramm, in dem der Reservoir-Computer sofort krankhafte Abweichungen im Herzschlag erkennen kann. Das Potential ist nach Ansicht des Dresdner Forscherpaars enorm. Theoretisch erreicht ein solcher magnonischer Computer die Rechenleistung eines größeren künstlichen neuronalen Netzes, das heute üblicherweise zur Mustererkennung eingesetzt wird und aus rund 20.000 Transistoren besteht. Schon wenige dieser Schichtenstrukturen, die auf einem MRAM-Chip aufgebracht sind, würden eine gewaltige Rechenleistung für Mustererkennungsanwendungen in Echtzeit erzielen. Das habe die anfangs skeptischen Ingenieure der Halbleiterhersteller überzeugt, sagt Schultheiß.

Ein entscheidender Vorteil des Dresdner Konzepts: Das magnetische Schichten arbeitet ausschließlich mit ordentlich schwingenden Magnonen. Die Spinwellen wandern nicht durch feste Strukturen, wie es bei anderen Ansätzen in der Magnonik der Fall ist, bei denen die Funktionen eines klassischen Transistors überbrückt werden soll. Hier verliert das Magnon auf seinem Weg durch die feinen Strukturen, durch die es fließt, Energie. Diese Dämpfung entspricht dem Ohmschen Widerstand in elektronischen Bauteilen. Genau dieses Grundproblem sich ausbreitender Spinwellen hat das Dresdner Forscherpaar vermeiden können.

Forscherguppen, die mit wandernden Spinwellen arbeiten, versuchen mit smart designeden Zwischenverstärkern die unvermeidlichen Dämpfungsverluste auszugleichen. Um die Transportverluste der Magnonen im technisch relevanten Mikrowellenbereich zu senken, sollte der Querschnitt der Wellenleiter im Bereich von zehn bis hundert Nanometern Durchmesser liegen. Diese winzigen Strukturen ermöglichen komplexe Bauelemente, erklärt Philipp Pirro, Juniorprofessor an der Universität Kaiserslautern. Er ist ebenfalls an einem von der EU geförderten Projekt beteiligt, das die Spider-Konsortium. Neben mehreren Forschungsinstituten und Universitäten sind Industriepartnern zum Bau eines magnonischen Reservoir-Computers. Kernstück ist eine fünf-Mikrometer große und 50-Nanometer dicke Scheibe aus einer magnetischen Nickel-Eisen-Legierung. Umgeben ist sie von einer ongetragenen Antenne (siehe Abbildung rechts unten). Diese sendet Mikrowellen aus und regt in der Scheibe wirbelartige Spinwellen an. Die Form dieser Magnonen erinnert an kreisförmige Schwingungen auf dem Füll einer in der Mitte angeschlagenen Trommel.

In das magnetische Schichten lassen sich auch zwei Magnonen mit leicht unterschiedlicher Schwingungsfrequenz einspeisen. Sie repräsentieren zwei Signale A und B. Geschickt lässt sich schnell hintereinander, dann überlagern sie sich nichtlinear zu komplexeren Schwingungsmustern, wie auf einem entsprechend angeschlagenen Pianoschlüssel. Die Muster erinnern an die Chladnischen Klangfiguren, die sich akustisch in einer Saalebene auf einer schwingenden Metallplatte erzeugen lassen. Jedes Muster repräsentiert nun eine bestimmte Folge von Eingangssignalen,

hört jetzt in *Chorale* vornehmlich. Die Biologen korrigierten die Weinkritiken aus der Region Bordeaux mit geographisch hochgelegenen Klimadaten von 1950 bis 2020. Dabei bezogen sie erstmals das Wetter in den Jahreszeiten mit ein, in denen die Weinstöcke ihre Ruhephase haben. Die Wissenschaftler haben die Region im Südwesten Frankreichs für ihre Studie ausgewählt, da die Winzer dort die Reben nicht bewässern und Bewässerung der Weinbäuer zurück bis ins Jahr 1950 verfügbar sind. Durch den Klimawandel werden die Sommer in Europa tendenziell heißer und die Winter nasser, demnach müssten die Weine aus dem Bordeaux also besser werden. Allerdings, so schränken die Autoren ein, gilt das nur so lange, wie die Weinstöcke ausreichend mit Wasser versorgt sind. Langanhaltende Dürren, wie sie laut den Klimamodellen in Europa häufiger vorkommen werden, ruinieren die Weinreife. *zdi*

## Kein Entkommen

Können große, mobile Tiere den klimatischen Veränderungen an den Polen einfach ausweichen? Offenbar nicht. Zumindest zeigt eine Studie an Grauwäldern in Skandinavien, dass ihre Populationsgröße mit Meeresspiegelanstieg und Nahrungsangebot in der Arktis korreliert. Seit dem Völlingmoratorium, das 1982 aufgrund eingebrochener Bestände verabschiedet wurde und 1986 in Kraft trat, erholten sich die Grauwälder-Bestände gut. Es kommt aber immer wieder zu Einbrüchen, bei den drei größten waren jeweils 15 bis 20 Prozent der Tiere gestorben. Die Studie zeigt, dass in den betreffenden Jahren die Biomasseproduktion in den Sommermonaten, in denen sich die Wale zum Fressen in der Arktis aufhalten, infolge des Klimawandels sehr gering war. Offenbar schwächte das die Tiere, ihre Populationsdichten zu halten. *ph*

## Kleine überall

In der Diskussion um die Erweitern des chemischen PFAS lag der Schwerpunkt oft auf Perfluorokarbonsäuren, PFOA, mit acht Kohlenstoffatomen. In der EU ist PFOA seit 2020 verboten, da sie persistent und gesundheitsschädlich ist. Nun haben Wissenschaftler in den USA in Haushaltsabfall, Trinkwasser und Blutserum höhere Gehalte an kurzkettingen PFAS-Substanzen mit nur zwei Kohlenstoffatomen im Molekül – gefunden. Diese können teilweise aus langkettigen PFAS-Vorläufersubstanzen entstehen und noch giftiger als PFOA sein, wie sie in *Environmental Science and Technology* berichten. Bei der EU liegt ein Antrag von fünf Mitgliedsstaaten vor, alle PFAS zu verbieten. *zdi*

## Affe mit Fremddorgan

Bis zu zwei Jahre leben Javanenaffen mit angepassten Schweineerinen, berichten Forscher der US-Firma Gene Editing in *Nature*. Zwar überlebten einige Tiere nur Tage oder Wochen, mehrere jedoch viele Monate. Das Team von Wissenschaftlern und Tierschützern untersuchen nun Möglichkeiten, die Spender Schweine genetisch zu verändern. Bei einer Gruppe von Schweinen wurden 69 Gene verändert. Dies betraf neben solchen, die zu Abstoßungsreaktionen beim Menschen führen, insbesondere in ihrem Erbgut vorhandene Gene, die diese bei Affen oder auch Menschen nicht zu Infektionen führen können. Den Schweinen wurde ein neues menschliches Gen „implantiert“. Dies könnte einen erheblichen Vorteil der Xenotransplantation darstellen, indem diese bei Affen oder auch Menschen nicht zu Infektionen führen können. Den Schweinen wurde ein neues menschliches Gen „implantiert“. Dies könnte einen erheblichen Vorteil der Xenotransplantation darstellen, indem diese bei Affen oder auch Menschen nicht zu Infektionen führen können. *ph*



## Magnetwellen-KI

### Neuartige Chiptechnik erkennt Muster in schnellen Sensordaten

Forscher am Helmholtz-Zentrum in Dresden entwickeln eine künstliche Intelligenz, die mit Magnetwellen auf Mikrochips rechnet. Im Projekt mit Halbleiterherstellern wollen sie daraus schnelle KI-Systeme zum Beispiel für autonome Autos zur Industriereife bringen.

Von Arne Grävemeyer