

Dr. Philipp Wessels

**»Livebilder aus dem Nanokosmos«**

Ultraschnelle Magnetisierungsprozesse kleinster Strukturen in Slow Motion

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2015 mit einem 2. Preis in der Sektion Natur- und Technikwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2014 an der Universität Hamburg eingereichten Dissertation »Time-resolved imaging of magnetic nanostructures in the visible and soft X-ray spectral range« von Dr. Philipp Wessels.

**Livebilder aus dem Nanokosmos –  
Ultraschnelle Magnetisierungsprozesse kleinster Strukturen in SlowMotion**

Dr. Philipp Wessels

Naturgesetze lassen sich häufig durch die genaue Beobachtung eines Systems erschließen. Unser Auge ist hierfür nur bedingt geeignet, da es sehr kleine Strukturen unter 0,1 Millimetern nicht mehr sinnvoll auflösen kann. Auch sehr schnell ablaufende Vorgänge entgehen unserem Auge, da es zwei Bilder schon nicht mehr voneinander trennen kann, wenn sie in weniger als 0,04 Sekunden aufeinanderfolgen, wie es in einem Kinofilm der Fall ist. Mit technischen Hilfsmitteln lassen sich diese Grenzen überwinden, sodass auch sehr kleine und sehr schnelle Abläufe sichtbar gemacht werden können. Ein Lichtmikroskop erlaubt Einblicke in die Welt des Kleinen und trug entscheidend zum Verständnis von biologischen Prozessen bei, da es funktionale Einheiten wie Körperzellen sichtbar machen kann. Eine Hochgeschwindigkeitskamera auf der anderen Seite bietet die Möglichkeit, Vorgänge im Detail zu entschlüsseln, die in Sekundenbruchteilen stattfinden. Eine Zeitlupenaufnahme von einer klingenden Stimmgabel liefert die Erkenntnis, dass diese mechanisch mit der hörbaren Frequenz hin und her schwingt. Genaues Hinsehen im Kleinen und im Schnellen lohnt sich also, da sich so Vorgänge sichtbar machen lassen, die entweder noch nicht entdeckt oder verstanden sind und mögliche neuartige Anwendungen versprechen.

Das Lichtmikroskop lieferte Einblicke in die Welt des Mikrokosmos und erlaubte es, Strukturen von wenigen Millionstel Metern – oder Mikrometern ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ) sichtbar zu machen. Darunter existiert eine Welt des noch Kleineren, die auch Nanokosmos genannt wird und Objekte enthält, welche wenige Milliardstel Meter – oder Nanometer ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) groß sind. Diese Strecke entspricht etwa dem Sechzigtausendstel eines Haardurchmessers. Unser Alltag würde ohne Nanotechnologie – also das Verständnis und die Kontrolle von Materie auf diesen winzigen Längenskalen – völlig anders aussehen, denn viele Innovationen wären ohne dieses Wissen undenkbar. Nanoskaliges Titandioxid verbessert beispielsweise den Schutz vor ultravioletter Strahlung in Sonnencremes, und in einer aktuellen Studie konnte kürzlich eine Effizienzverbesserung von organischen Solarzellen durch Beimischung magnetischer Nanopartikel erreicht werden. Kleinste Strukturen, die aus einem magnetischen Material bestehen, bieten auch in der Medizin vielversprechende Anwendungen. Sie lassen sich als Transportvehikel für Medikamente einsetzen, um diese durch extern am Patienten angelegte magnetische Felder effizient an

ihren Einsatzort innerhalb des Körpers zu manövrieren. Ein solch gezielter Einsatz nur an betroffenen Stellen würde die Medikamentenwirksamkeit erhöhen bei gleichzeitiger Reduzierung der Nebenwirkungen. Des Weiteren konnte eine Fernsteuerung von Zellaktivitäten und die Auslösung des programmierten Zelltodes (Apoptose) mittels magnetischer Nanopartikel *in vitro* und *in vivo* erreicht werden.

Im modernen Informationszeitalter ist die schnelle Verfügbarkeit von großen Datenmengen (Stichwort „Big Data“) essenziell zur Gewinnung neuer Erkenntnisse und zur Extraktion von relevanten Informationen, die als wichtiger Rohstoff der Gegenwart und Zukunft dienen. Als Speicherbasis dienen hierbei zum überwiegenden Teil magnetische Systeme in Festplatten, auf die die binär kodierten Daten in Form von sehr kleinen Magnetstrukturen geschrieben werden. Zwar werden aktuell in Rechnersystemen zunehmend nicht magnetische Speichermedien (sogenannte „Solid State Disks“) eingesetzt, allerdings geht der Trend zum Speichern von Daten in der „Cloud“, welche aufgrund der konkurrenzlosen Wirtschaftlichkeit pro gespeicherter Datenmenge auch auf lange Sicht noch auf magnetischen Speichermedien beruhen wird. In einem solchen Speichermedium bestimmt die magnetische Ausrichtung einer Speicherzelle, d. h. die Lage von Nord- und Südpol der winzigen Magnelemente, die digitale Information eines Bits in Form von „0“ oder „1“, welche in einem Computer verarbeitet werden kann. Um immer größere Datenmengen auf kleinem Raum unterzubringen, ist es notwendig, dass die elementaren Speicherzellen der Datenträger stets kompakter werden. Ein Bit auf einer modernen Computerfestplatte misst so nur noch ca. 30 Nanometer. Um die Datendichte weiter zu erhöhen, ist eine Verkleinerung dieser Zellen sowie deren Abstand notwendig. Hierbei stößt man auf fundamentale physikalische Grenzen (das superparamagnetische Limit), welche verhindern, dass Daten in solch kleinen Strukturen stabil gespeichert werden können. Eine Erhöhung der Datenstabilität geht hierbei z. B. mit einer deutlichen Erschwerung der Manipulation der Datenelemente einher.

Um zu verstehen, welche Prozesse bei der Manipulation von solch kleinen magnetischen Zellen eine Rolle spielen und wie diese auf nanoskopischen Längenskalen beeinflussbar sind, ist es notwendig, die Magnetisierung einer Speicherzelle mit extrem hoher Orts- und Zeitauflösung abzutasten, um die Vorgänge direkt in Echtzeit beobachten zu können. Eine konventionelle Hochgeschwindigkeitskamera ist hier nicht mehr ausreichend, da diese in der Regel nur Bildwiederholraten von einigen Tausend Bildern pro Sekunde unterstützt und so bestenfalls eine Zeitauflösung im Mikrosekundenbereich ( $1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$ ) erlaubt. Die Dynamik in magnetischen Nanelementen findet hingegen auf einer Pikosekunden ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ )- bis Femtosekunden ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s} = 0,000\,000\,000\,001 \text{ s}$ )-Zeitskala statt. Um ein Gefühl für die vorherrschenden Zeitskalen zu bekommen, sei erwähnt, dass eine Minute ungefähr so viele

Femtosekunden enthält wie das Alter des Universums Minuten. Auf diesen extrem kurzen Zeitskalen finden jedoch trotzdem wichtige Prozesse wie z. B. die Entstehung und Zerstörung von chemischen Bindungen statt. Ein Zugang zu den dynamischen Informationen ist unerlässlich, wenn man erklären möchte, wie genau Vorgänge wie eine chemische Reaktionen, das Andocken von Viren an Körperzellen oder die Ummagnetisierung einer Probe ablaufen. Es besteht also eine wesentliche Herausforderung darin, diese extrem schnell ablaufenden Vorgänge festzuhalten und sichtbar zu machen.

In meiner Promotion wurden zwei neue Instrumente aufgebaut, welche das direkte „Filmen“ von Magnetisierungsvorgängen in Zeitlupe ermöglichen, sodass beobachtet werden kann, wie ein Magnetisierungs- und Entmagnetisierungsprozess im Detail abläuft. Hierbei wurden bisher noch nicht beobachtete Prozesse entdeckt, welche für die Nutzung und Anwendung von magnetischen Nanoelementen von fundamentaler Bedeutung sind.

Um kleine Strukturen jenseits des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges zu beobachten, kann wie oben erwähnt ein Lichtmikroskop verwendet werden, welches die zu untersuchende Probe mit einer Beleuchtungsoptik anstrahlt und mit einer Abbildungsoptik in Form eines Objektivs auf eine Kamera projiziert. Die mit einem solchen Mikroskop prinzipiell erreichbare Auflösung liegt aufgrund eines physikalischen Limits optischer Apparaturen – der Beugungsbegrenzung – in der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes von ca. 500 nm, d.h., es ist unmöglich, kleinere Strukturen mit sichtbarem Licht zu beobachten.

Zum Erreichen einer höheren Auflösung ist eine Übertragung dieses Aufbaus hin zu kürzeren Wellenlängen in den Bereich weicher Röntgenstrahlung nötig. Mit einer Wellenlänge von nur ca. 1,5 nm bietet diese ein hinreichendes Auflösungslimit, um auch nanoskalige Objekte abbilden zu können. Das weiche Röntgenlicht ist dabei allerdings noch langwelliger als das vom „Röntgen“ bekannte Licht für medizinische Anwendungen.

Es lassen sich in so einem Röntgenmikroskop keine konventionellen brechenden (refraktiven) Linsen aus Glas verwenden, da diese nicht transparent für die verwendete Strahlung sind. Mittels beugender (diffraktiver) Optiken in Form von strukturierten Gittern sind aber dennoch Linsen für diesen Spektralbereich herstellbar. Eine weitere Besonderheit eines solchen Röntgenmikroskops ist die Notwendigkeit einer Vakuumapparatur, da selbst Luft in diesem besonderen Spektralbereich intransparent ist. Zunächst sieht ein Röntgenmikroskop daher deutlich anders aus als ein konventionelles Lichtmikroskop, funktioniert aber vom Prinzip her genauso, da die Probe mit einer Beleuchtungsoptik (Gitter-Kondensor) angestrahlt und mit einer Abbildungsoptik (Zonenplatte) vergrößert auf eine Kamera projiziert wird.

Während meiner Promotion habe ich ein solches Röntgenmikroskop entwickelt und aufgebaut, welches die Abbildung magnetischer Nanostrukturen bis zu einer Ortsauflösung von 60 nm ermöglicht. Das hierfür benötigte weiche Röntgenlicht wird in ausreichender Intensität von einem sogenannten Speicherring geliefert. Dies ist ein ringförmiger Teilchenbeschleuniger, in dem Elektronen auf einer Kreisbahn nahe der Lichtgeschwindigkeit zirkulieren. Durch geschickte Manipulation der Elektronenbahn kann extrem brillantes Röntgenlicht in Form von Synchrotronstrahlung erzeugt werden. Die in dieser Arbeit verwendete Speicherringquelle PETRA III am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg misst einen Umfang von 2,3 Kilometern und zählt zu den weltweit hellsten und modernsten Synchrotronstrahlungsquellen ihrer Art.

Aufgrund der besonderen Eigenschaften der weichen Röntgenstrahlung und deren Wechselwirkung mit magnetischen Materialien über den Effekt des zirkularen magnetischen Röntgendichroismus ist es zudem möglich, die Verteilung der magnetischen Momente, d.h. die Ausrichtung der Nord- und Südpole innerhalb der Probe, zu detektieren.

Die zunächst statischen Bilder aus dem Röntgenmikroskop können mittels der Anrege-Abfrage-Technik zu einem Video zusammengesetzt werden, wenn die Magnetisierung der Probe durch einen sehr kurzen Magnetfeldpuls angestoßen wird. Daraufhin wartet man eine gewisse Zeitspanne, in der sich das zu untersuchende System verändert; schlussendlich wird ein Bild im Röntgenmikroskop durch einen Abfragepuls erstellt. Nachdem die Probe sich wieder im Gleichgewichtszustand befindet, stößt man den Prozess erneut an und verändert diesmal die Wartezeit zwischen Anrege- und Abfragepuls. Sortiert man die so entstandenen Bilder entsprechend der Wartezeit zwischen den zwei Pulsen, erhält man ein Video der Magnetisierungsdynamik.

Ähnlich wie beim Fotografieren erreicht man auch bei der hier verwendeten Technik nur dann scharfe Bilder, die nicht verwaschen sind, wenn die Belichtungszeit kürzer ist als der Prozess, der beobachtet werden soll. Somit werden Magnetfeldpulse zur Anregung sowie weiche Röntgenblitze zum Abfragen mit jeweils einer Dauer im Pikosekundenbereich benötigt, um den Magnetisierungsprozess aufzunehmen. Die Röntgenpulse aus der Speicherringquelle PETRA III besitzen eine Dauer von ca. 100 ps, sodass eine Dynamik in diesem Zeitbereich zugänglich ist.

Eine zunächst fundamentale Fragestellung, die mit diesem Instrument beantwortet werden kann, ist die genaue Beobachtung der Entstehung magnetischer Domänen und die Messung der Dauer dieses Entstehungsprozesses. Magnetische Materialien ab einer gewissen Größe zerfallen in viele kleine Bereiche homogener Magnetisierung, sogenannte Domänen oder Weiss-Bezirke. Diese Tatsache leitet sich daraus ab, dass eine homogene Magnetisierung mit nur einem Nord- und einem Südpol ein großes

magnetisches Streufeld außerhalb der Probe erzeugen würde, wie man es von einem Permanentmagneten kennt, der durch dieses Feld z.B. Eisen anzieht. Ein solches Feld ist bei genauer Betrachtung der physikalischen Energiebeiträge in der Probe energetisch ungünstig, daher kann es für die magnetische Ausrichtung innerhalb der Struktur von Vorteil sein, in zwei Bereiche zu zerfallen mit entgegengesetzter Nord- und Südpol-Ausrichtung. Diese Konfiguration würde das externe Streufeld minimieren und stellt einen energetisch günstigeren Zustand dar. Abhängig von der Probengeometrie kann die Magnetisierung so analog in mehrere Domänen zerfallen, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist.

Der Prozess, wie aus einer homogenen Magnetisierung, also aus einem nahezu komplett ausgerichteten Zustand der Magnetisierung, das Gleichgewichtsdomänenmuster entsteht, konnte bisher noch nicht in Echtzeit beobachtet werden. Der im Rahmen meiner Promotion entstandene Aufbau erlaubt nun erstmals, den Prozess der Domänenentstehung ‚live‘ sichtbar zu machen und die Dauer des Vorgangs zu bestimmen. Diese Ergebnisse tragen zum Verständnis von Magnetisierungsprozessen bei und können die Frage beantworten, mit welcher Geschwindigkeit magnetische Informationen kodiert in Domänenform auf Datenträger geschrieben werden können.

Dazu wurde in dem aufgebauten Instrument eine quadratische ferromagnetische Probe aus einer Nickel-Eisen-Legierung namens Permalloy untersucht, die sich sehr schnell magnetisieren lässt. In ihrem Gleichgewichtszustand besitzt die Probe vier dreieckige Domänen, deren Spitzen sich in der Mitte des Quadrates treffen und dort einen magnetischen Wirbelkern (magnetischer Vortex) bilden. In meiner Arbeit konnte erstmals gezeigt werden, wie schnell sich so ein Wirbelkern aus der Probe heraus bewegt und wie lange es dauert, bis der Kern sich erneut in der Probe stabilisiert. Die beobachteten sehr hohen Kerngeschwindigkeiten von mehreren Kilometern pro Sekunde widersprechen der bisherigen Erwartung, dass eine Zelle ihre Magnetisierungskonfiguration ab einer gewissen Kerngeschwindigkeit ändert. Die Manipulation erfolgt in diesem Falle vermutlich in einer so kurzen Zeitspanne, dass eine Änderung der Magnetkonfiguration länger dauert als die Zerstörung des Domänenmusters hin zu einer homogenen Ausrichtung. Hier bestätigt sich die eingangs erwähnte Hypothese, dass genaueres Hinsehen teils zu unerwarteten neuen Erkenntnissen führt.

Die untersuchten magnetischen Vortex-Nanostrukturen bieten Anwendungen in der nicht flüchtigen Speichertechnologie, da sich in einer einzelnen Zelle aufgrund der Magnetisierungskonfiguration mehrere Bits speichern lassen; zudem sind diese Zellen auf einer Zeitskala im Pikosekundenbereich über elektrische Impulse les- undschreibbar.

Ferner versprechen genau solche magnetischen Nanovortices interessante Anwendungen in der Medizin. Hierzu kann der Wirbelkern in der Probe mit externen magnetischen Feldern in Bewegung versetzt werden und so gezielt im Patienten Energie deponieren, um bösartiges Gewebe zu zerstören. Kürzlich

gelang *in vitro* mit einem solchen System die gezielte Zerstörung von Krebszellen. Das aufgebaute Instrument bietet hier insbesondere die Möglichkeit, in Zukunft die Wechselwirkung des Magnetsystems mit einer biologischen Probe zu studieren, da sich Gewebeprobe ebenfalls gut mit Röntgenmikroskopen untersuchen lassen. Das aufgebaute System wurde bereits mit Zellgewebeprobe getestet und konnte erste Bilder liefern, sodass sowohl Nanomagnetdynamik als auch biologische Strukturinformation sowie Materialverteilungen zugänglich sind, um den Energieübertrag und vorherrschende Wechselwirkungen genauer zu studieren.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Belichtungszeit bzw. die Dauer des Abfragepulses von entscheidender Bedeutung ist für die zugängliche Zeitskala. Im bisher vorgestellten Röntgenmikroskop ist man hierdurch fundamental durch die Pulsdauer von ca. 100 ps des weichen Röntgenpulses aus dem Speicherring PETRA III beschränkt. Um noch schnellere Vorgänge beobachten zu können, ist es wünschenswert, deutlich kürzere Pulse zu verwenden. Die moderne Lasertechnologie bietet über das Verfahren der Modenkopplung die Möglichkeit, intensive Lichtblitze im Femtosekundenbereich zu erzeugen. Für den Zugang zu schnelleren Prozessen wurde daher ein weiteres laserbasiertes Instrument aufgebaut, welches ebenfalls die Magnetisierungsdynamik einer Probe zeitaufgelöst abbilden kann. Der in diesem Setup verwendete Laser ist in der Lage, Pulse einer Dauer von nur ca. 300 fs bei einer Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich zu erzeugen. So bietet sich mit den kurzen Laserpulsen zwar die Möglichkeit, schnellere Magnetisierungsprozesse zu beobachten, allerdings ist man aufgrund der viel größeren Wellenlänge im Vergleich zum Röntgenmikroskop bei PETRA III durch eine schlechtere räumliche Auflösung in der Größenordnung der Laserwellenlänge bei ca. 500 nm beschränkt.

Das aufgebaute Instrument ist ein Raster-Kerr-Mikroskop, welches den magnetooptischen Kerr-Effekt nutzt, um die transiente Ausrichtung der magnetischen Momente einer Probe zu analysieren. Zu diesem Zweck werden ultrakurze Laserpulse auf die zu untersuchende Probe fokussiert und die Polarisation des reflektierten Lichtes analysiert, welche über den Kerr-Effekt in direktem Zusammenhang mit der Magnetisierung steht. Um ein Bild bzw. eine Karte der Probenmagnetisierung zu erhalten, kann diese durch den Fokus bewegt werden.

Mit Hilfe der schon eingeführten Anrege-Abfrage-Technik ist auch an diesem Setup möglich ein Video der Magnetisierungsdynamik zu erhalten. Dazu wird der Laserpuls in zwei Pulse aufgeteilt, wobei einer zur Anregung der Probe und der zweite zur Abbildung verwendet wird. Durch Verzögerung der Ankunftszeit an der Probe kann nach Initiierung der Dynamik die Wartezeit bis zum erzeugten Bild eingestellt werden. In meiner Arbeit wurde ein neuartiger elektrooptischer Schalter entwickelt, der in der Lage ist, aus den kurzen Laserpulsen sehr kurze und intensive Magnetfeldpulse zu erzeugen, die die Abbildung von bisher nicht beobachtbaren magnetischen Transportphänomenen ermöglichen.

Als Probe diene hierbei ein rechteckiger Streifen aus Permalloy, der nur wenige zehn Nanometer dick ist. Dieser Streifen lässt sich an einem Ende mit dem aus den Laserpulsen erzeugten kurzen Magnetfeldpulsen anregen, sodass die atomaren Magnete innerhalb der Probe – auch magnetische Momente genannt – anfangen zu präzedieren und eine Rotationsbewegung ausführen. Diese Bewegung pflanzt sich aufgrund der Wechselwirkung zwischen den magnetischen Momenten zum anderen Streifenende in Form einer sogenannten Spinwelle fort. Eine solche „Magnet-La Ola“ in Form eines Spinwellenpaketes kann im aufgebauten Raster-Kerr-Mikroskop direkt als Film sichtbar gemacht werden. Dieser Film in Superzeitlupe entspricht einer Bildwiederholrate von 200 000 000 000 Bildern pro Sekunde. Spinwellen besitzen aufgrund ihrer speziellen Wechselwirkung eine besondere Dispersionsrelation, die das Verhalten von Wellenlänge zu Frequenz beschreibt. Es lassen sich nämlich in magnetischen Strukturen sehr ungewöhnliche Wellenbewegungen anregen, die zunächst der Intuition widersprechen und als „Backward Volume“-Moden bekannt sind. Eine Eigenart dieser Wellen ist die mögliche Rückwärtsbewegung der Wellenberge und -täler. Wirft man einen Stein ins Wasser, so bewegen sich kreisförmige Wasserwellen von der Einschlagstelle weg. Bei den „Backward Volume“-Moden laufen die Maxima und Minima der Spinwelle auf die Stelle der Anregung zu. Dies wäre vergleichbar mit Wasserwellen, die sich nach Eintauchen des Steines ins Wasser von weiter außen auf die Eintauchstelle hinzu bewegen. Solche Moden wurden bereits theoretisch vorhergesagt und auch indirekt experimentell nachgewiesen. Ein direkter Nachweis der Rückwärtsbewegung der Wellenfronten in Form eines Echtzeitvideos im Ortsraum gelang jedoch erstmals in dieser Arbeit.

Bisherige Arbeiten konzentrierten sich vor allem auf die Untersuchung von kontinuierlichen Spinwellen, die durch Mikrowellen erzeugt wurden. Hierbei kann aufgrund der ständigen Anregung nur der Gleichgewichtszustand der Spinwelle beobachtet werden, nicht aber die Entstehung eines Impulses in Form eines Spinwellenpaketes. Die Untersuchung der Dynamik solcher Spinwellenpakete ist aber im Hinblick auf zukünftige Anwendungen unerlässlich, da für eine magnetische Informationsübertragung und Signalverarbeitung ein modulierte Signal notwendig ist.

Tatsächlich hat die Spinwelleninformationsverarbeitung ein hohes Potenzial moderne Hochfrequenzelektronik zu ergänzen oder abzulösen. Elektronische Schaltkreise nutzen die Ladung des Elektrons zur Informationsübertragung. Ein magnetischer Transport nutzt die Tatsache, dass das Elektron auch ein magnetisches Moment, den Spin, besitzt. Die Technologie, die Spins zur Informationsverarbeitung nutzt, nennt man daher auch Spintronik. Schnelle elektronische Schaltkreise, wie sie in Computerprozessoren, Smartphones und vielen anderen technischen Geräten des Alltags vorkommen, haben aktuell das Problem, dass der Reibungsverlust durch Wärme beim elektronischen



Datentransport durch Ladungstransport die Leistungsfähigkeit stark einschränkt. Um noch leistungsfähigere Geräte zu bauen, die immer komplexere Aufgaben in kürzester Zeit lösen können, ist es notwendig, dieses Wärmeproblem zu überwinden. Spinwellen besitzen hier den entscheidenden Vorteil, dass eine Übertragung der Information durch die Spin-Wechselwirkung nahezu reibungsfrei stattfindet, sodass trotz hohen Taktraten kaum Abwärme anfällt. Dies würde nebenbei die Energieeffizienz solcher Schaltkreise enorm steigern. Ferner liegt die Präzessionsfrequenz eines Spinwellenpaketes nativ im Bereich von mehreren Gigahertz (GHz), vergleichbar mit der Taktrate von Computerprozessoren, Mikrocontrollern und Mobilfunksignalen zur Übertragung von hohen Datenmengen im Mobilfunknetz.

Die untersuchten „Backward Volume“-Moden sind für umsetzbare Geräte auf Spinwellenbasis der vielversprechendste Kandidat, da sie auch ohne ein externes magnetisches Feld propagieren können. Des Weiteren bietet die ungewöhnliche Dispersionsrelation der „Backward Volume“-Moden direkten Zugang zu der Welt der Metamaterialien, welche einen negativen Brechungsindex besitzen. Dies bedeutet, dass eine elektromagnetische Welle wie z.B. sichtbares Licht beim Eintreffen auf das Material entgegen der Intuition vom Lot weg gebrochen wird. Damit ist es möglich, das Licht um Objekte herumzulenken und sie so unsichtbar zu machen. Der aus den „Harry Potter“-Büchern bekannte Tarnumhang ließe sich daher am ehesten mit einem solchen Metamaterial realisieren. Die negative Dispersion von Metamaterialien korrespondiert mit der Dispersionsrelation der „Backward Volume“-Moden, sodass eine direkte Beobachtung, wie sie in dieser Arbeit realisiert wurde, ein besseres Verständnis dieser Materialien erlauben würde.

Zusammenfassend wurde in meiner Promotion die extrem schnelle Dynamik sehr kleiner magnetischer Strukturen untersucht. Die entwickelten Instrumente bieten die Möglichkeit, Livebilder aus dem magnetischen Nanokosmos zu erhalten und direkte Videos der Magnetisierung einer Probe zu erstellen. Gesellschaftlich relevant ist dieses Forschungsgebiet neben einem fundamentalen Interesse, an den Gesetzen des Magnetismus auf sehr kurzen Zeit- und sehr kleinen Längenskalen vor allem in der nicht flüchtigen Datenspeicherung sowie Datenverarbeitung für immer schnellere Festplatten mit höheren Datendichten sowie schnelleren und effizienteren logischen Schaltkreisen. Die beobachteten Abläufe liefern Einsicht in grundlegende Magnetisierungsprozesse und bieten neben Anwendungen in der Medizin bei neuartigen Krebstherapien auch ein besseres Verständnis von ungewöhnlichen Materialsystemen wie Metamaterialien. Relativ neue Forschungsarbeiten zeigen einen Effekt, der es erlaubt, mit ultrakurzen Laserpulsen gezielt und reproduzierbar die Magnetisierung eines ferromagnetischen Systems innerhalb weniger Femtosekunden zu schalten. Dieser bisher noch nicht vollständig verstandene Effekt, der schneller als erwartet abläuft, verspricht für die Zukunft einen deutlichen Performancegewinn in magnetischen Speichersystemen in puncto Geschwindigkeit.

Instrumente, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurden, erlauben einen Zugang zur ultraschnellen Dynamik solcher Systeme auf der Nanoskala und liefern Informationen für ein tieferes Verständnis, das spannende Innovationen der Zukunft erst ermöglichen kann.