

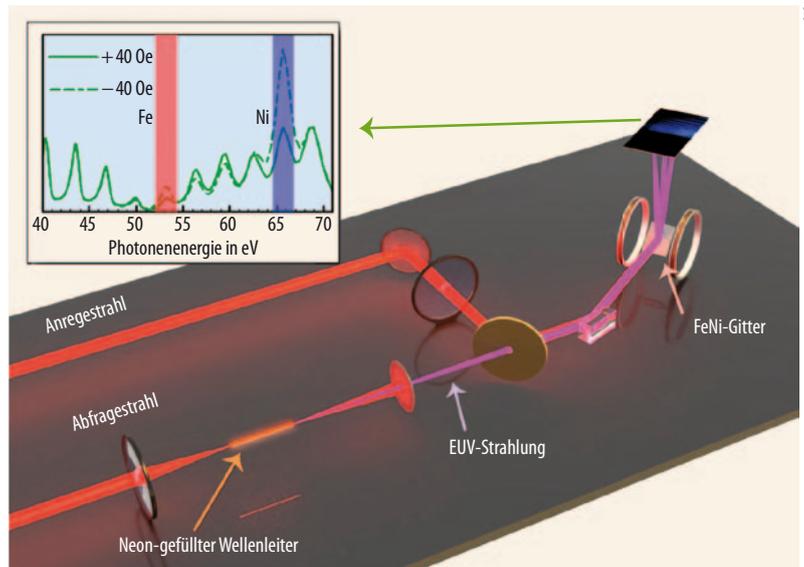
## ■ Analyse auf dem Tisch

Die Nichtgleichgewichtsdynamik in Ferromagneten lässt sich elementsspezifisch und auf Femtosekunden genau mit einem Laboraufbau analysieren.

**K**leine ferromagnetische Bereiche, deren Magnetisierung unterschiedlich ausgerichtet ist, sind eine entscheidende Komponente, um bei der Datenspeicherung „0“ oder „1“ als Information ablegen zu können. Gegenwärtige Forschungsanstrengungen zielen zum einen darauf ab, die räumliche Informationsdichte zu optimieren, damit die adressierbaren Strukturen immer weiter schrumpfen können. Zum anderen gilt das Interesse den fundamentalen physikalischen Grenzen für die Zeitskalen, auf denen sich die Magnetisierung beeinflussen lässt. Nur die schnellsten experimentellen Werkzeuge, über die wir verfügen, können diese Frage beantworten. Bei diesen *pump-probe*-Experimenten (engl. für Anrege-Abfrage-Verfahren) treibt ein erster Lichtpuls, der nur einige Femtosekunden lang ist, das untersuchte Material z. B. durch Absorption aus dem Gleichgewicht. Ein zweiter Lichtpuls fragt die hervorgerufene Änderung gezielt ab. Durch Variation des optischen Wegs trifft dieser Puls zu unterschiedlichen Zeiten auf die Probe – 10 fs entsprechen  $3 \mu\text{m}$  –, sodass sich die zeitliche Entwicklung direkt verfolgen lässt.

Bereits in den 1990er-Jahren gingen erste Experimente der Frage nach, wie schnell eine optische Anregung die Magnetisierung eines Ferromagneten verändert. Beaupaire et al. haben dazu ausgenutzt, dass die Magnetisierungsänderung von Nickel über den linearen magneto-optischen Kerr-Effekt die Polarisation des Laserpulses beeinflusst [1]. Es ist bezeichnend für die Komplexität des Problems, dass die Ergebnisse dieses Pionierexperiments trotz umfangreicher Anstrengungen auch heute nicht verstanden sind. Derzeit werden Ströme spinpolarisierter Ladungsträger sowie elektronisch und phononisch vermittelte spinabhängige Streuprozesse als Ursache diskutiert.

Aktuelle Forschungsaktivitäten zielen darauf ab, die jeweiligen Bei-



Bei dem *pump-probe*-Experiment im EUV-Spektralbereich hat ein Gitter aus Permalloy (FeNi) gleichzeitig die Funktion der Probe sowie des für die spektrale Auflösung notwendigen beugenden

trägers zur Magnetisierungsdynamik zu quantifizieren [2]. Die Untersuchung verschiedener elementarer magnetischer Momente in einem Material sollte neue Impulse liefern. In den letzten fast zwei Jahrzehnten trieb diese Fragestellung eine ganze Reihe von apparativen Entwicklungen voran. Neben den magneto-optischen Verfahren stehen heute u. a. Photoelektronenspektroskopie, z. T. mit Spinanalyse, und Röntgenzirkulardichroismus jeweils mit Femtosekunden-Zeitauflösung zur Verfügung. Außerdem gelang es, neben den elementaren Ferromagneten der 3d-Übergangsmetalle die seltenen Erden, verschiedene Legierungen, ferromagnetische Halbleiter und Dielektrika zu untersuchen. Ref. [3] liefert eine gut zu lesende, umfassende Zusammenstellung dieser Entwicklung.

In komplexeren Materialien, die aus verschiedenen Elementen bestehen, setzt sich die gesamte Magnetisierung aus den Beiträgen der einzelnen Bestandteile zusammen. Daher stellt sich die fundamentale Frage, ob sich z. B. in der FeNi-Legierung Permalloy die Beiträge von Eisen und Nickel

Elements. Der Dichroismus macht sich dadurch bemerkbar, dass sich das Signal im Bereich der  $M_{2,3}$ -Kanten für Ni und Fe deutlich ändert, wenn die Magnetisierung des Permalloy umgedreht wird.

zur Änderung der Magnetisierung unter den optisch erzeugten Nichtgleichgewichtsbedingungen gemeinsam oder elementsspezifisch zeitlich entwickeln. Für den Ferromagneten GdFeCo haben Radu et al. kürzlich am Synchrotron BESSY II die elementsspezifische Magnetisierungsdynamik mithilfe des Röntgenzirkulardichroismus an den entsprechenden Absorptionskanten gemessen [4]. Sie beobachteten ein durch die optische Anregung ausgelöstes Umschalten der Magnetisierungsrichtung, das durch einen kurzzeitig ferromagnetischen Zustand vermittelt wird. Diese Arbeit unterstreicht das Potenzial dieser neuen Verfahren, um Magnetismus unter optisch erzeugten Nichtgleichgewichtsbedingungen zu untersuchen. Das verwendete fs-Strahlrohr bei BESSY II wurde zwar vor kurzem ausgebaut und ermöglicht inzwischen ein effizienteres Experimentieren, die Zahl der Röntgenphotonen im Puls ist aber eher gering, und die Messzeit ist limitiert.

Daher wäre eine Methode, die es im Labor erlaubt, die fs-Magnetisierungsdynamik elementsspezifisch nachzuweisen, ein entscheidender

Fortschritt. Dies ist nun im Rahmen einer Zusammenarbeit der TU Kaiserslautern, des Peter-Grünberg-Instituts in Jülich sowie des JILA und des NIST in Boulder, Colorado, gelungen [5]. Die Wissenschaftler verwenden EUV-Strahlung, die durch Wechselwirkung intensiver infraroter Laserpulse in Edelgasen als höhere Harmonische der fundamentalen Laserstrahlung entsteht (Abb.). Für Fe, Ni und FeNi haben sie die Intensitätsänderung bei Magnetisierungs-umkehr an den jeweiligen  $M_{2,3}$ -Kanten zwischen 50 und 70 eV, d. h. den resonanten, transversalen magneto-optischen Kerr-Effekt, gemessen. Im nächsten Schritt wurde dieses Verfahren auf *pump-probe* erweitert und nun die zeitabhängige Magnetisierung elementspezifisch analysiert. Entscheidend für die hohe Empfindlichkeit des Experiments auf die lichtinduzierten Änderungen ist hierbei, dass die Proben selbst als EUV-Gitter strukturiert wurden. Dieses Gitter ist notwendig für den elementspezifischen Nachweis und bewirkt, dass die Signale

von beiden Absorptionskanten intrinsisch synchronisiert sind. Erst dies gewährleistet, dass die kurze Pulsdauer der Lichtquelle von unter 25 fs auch eine entsprechend gute Zeitauflösung im elementspezifischen Experiment ermöglicht.

Mit diesem Verfahren ist es nun gelungen, eine kleine, aber physikalisch äußerst interessante, zeitliche Verzögerung von 10 – 20 fs zwischen der Antwort der Fe- und der Ni-Anteile der Magnetisierung in FeNi nachzuweisen. In einem weiteren Schritt wurde Cu dem FeNi beigemischt, um die Austauschwechselwirkung zu reduzieren. Die Verzögerung zwischen dem Fe- und Ni-Signal nimmt dann deutlich auf 76 fs zu, sodass die Ursache der Verzögerung offenbar mit der Austauschwechselwirkung als fundamentaler magnetischer Wechselwirkung verknüpft ist.

Mit den beiden genannten Verfahren im EUV- und im weichen Röntgenbereich stehen zwei komplementäre, leistungsfähige *pump-probe*-Anlagen zur Verfügung, die

für die nahe Zukunft spannende neue Einsichten in die komplexen Phänomene des ultraschnellen Magnetismus im Nichtgleichgewicht versprechen. Die Stärke des EUV-Ansatzes liegt sowohl in der sehr guten Zeitauflösung als auch in der Möglichkeit, im Labor systematisch sogar präparativ aufwändigere Experimente zu wagen und zum Erfolg zu führen. Daher ist es denkbar, dass dieser Ansatz zur Analyse komplexerer Spindynamik wie ultraschnellen Spinströmen [6] wesentlich beitragen kann.

**Uwe Bovensiepen**

Prof. Dr. Uwe Bovensiepen, Fakultät für Physik, Universität Duisburg-Essen, Lotharstr. 1, 47048 Duisburg

- [1] E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, J.-Y. Bigot, Phys. Rev. Lett. **76**, 4250 (1996)
- [2] M. Sultan et al., Phys. Rev. B **85**, 184407 (2012)
- [3] A. Kirilyuk, A. V. Kimel, Th. Rasing, Rev. Mod. Phys. **82**, 2731 (2010)
- [4] I. Radu et al., Nature **472**, 205 (2011)
- [5] C. La-O-Vorakiat et al., Phys. Rev. X **2**, 011005 (2012); S. Mathias et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA **109**, 4792 (2012)
- [6] M. Battiato, K. Carva, P. M. Oppeneer, Phys. Rev. Lett. **105**, 027203 (2010); A. Melnikov et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 076601 (2011)