

**Abb. 1** Zurich Instruments 600 MHz UHFLI Lock-in-Verstärker



## Die schnelle Welt der Spintronik

... erforscht mit dem UHFLI Lock-in-Verstärker

Marvin A. Weiss und Heidi Potts

Im sich rasant entwickelnden Gebiet der Spintronik – bei dem der Freiheitsgrad des Elektronenspins die zeitgenössische Elektronik ergänzen soll – stellt das Verständnis spontaner Fluktuationen der Spin-Zustände eine Herausforderung dar. Traditionelle Messmethoden beeinflussen den Zustand zu stark, um diese winzigen, stochastischen Veränderungen auf ausreichend schnellen Zeitskalen zu erfassen. Femtosekunden-Rauschkorrelationsspektroskopie (Femtosecond Noise Correlation spectroscopy, FemNoC) wurde kürzlich von Forschenden der Universität Konstanz als Technik vorgestellt [1], um die ultraschnelle Rauschdynamik thermisch besetzter Magnonen – kollektiver Anregungen der Elektronenspins in einem Kristallgitter – zu enthüllen [2]. Der Zurich Instruments 600 MHz UHFLI Lock-in-Verstärker (Abb. 1) erweitert bei der FemNoC

die Grenzen der Messung von Spinfluktuationen.

Antiferromagnete sind vielversprechende Materialien für zukünftige Hochgeschwindigkeits-Spintronik-Anwendungen und -Geräte: Ihre hohen Magnon-Frequenzen, können bis in den Terahertz-Bereich reichen. Allerdings können ultraschnelle inkohärente Fluktuationen die magnetischen Eigenschaften kritisch beeinflussen. Diese Fluktuationen zu erfassen und zu verstehen, ist daher entscheidend für den Fortschritt der Spintronik.

Das Prinzip von FemNoC basiert auf der Messung von Polarisationsfluktuationen, die von Spinfluktuationen bei Transmission eines Lichtpulses durch das Probenmaterial induziert werden (Abb. 2). Die Technik nutzt zwei spektral leicht unterschiedliche Pulszüge aus linear polarisierten Femtosekundenpul-

sen. Einer der Lichtstrahlen durchläuft eine Verzögerungsstrecke für eine relative Zeitdifferenz. Beide Lichtstrahlen werden dann auf die Probe fokussiert, wo transiente Magnetisierungsfluktuationen eine Polarisationsrotation verursachen. Diese wird anschließend getrennt in zwei verschiedenen Detektionszweigen ausgelesen. Hierzu trennt ein dichroitischer Spiegel die beiden Pulszüge zunächst räumlich voneinander und teilt sie in zwei Polarisationsrichtungen auf. Ein Paar balancierter Photodioden, die ein zu den spinrauschinduzierten Polarisationsfluktuationen proportionales Spannungssignal ausgeben, detektiert die Polarisationsanteile. Der nächste kritische Schritt besteht darin, die Puls-zu-Puls-Amplitudenfluktuationen aus den beiden Photodetektorsignalen zu extrahieren. Hierfür erweist sich

der UHFLLI Lock-in-Verstärker als unverzichtbar. Dieser demoduliert die beiden Signale zuerst bei der ersten Subharmonischen der Wiederholrate des Lasers, um die Puls-zu-Puls-Fluktuationen zu erhalten. Die Multiplikation der Demodulationsergebnisse filtert dann den korrelierten, spinrauschinduzierten Teil der Fluktuationen heraus. Schließlich erhöht die Mittelung der Ergebnisse das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Die Fähigkeiten des UHFLLI, bei Subharmonischen zu demodulieren und Echtzeit-Multiplikation sowie Mittelung durchzuführen, entfernen effektiv jegliches statistische Hintergrundrauschen,  $1/f$ -Rauschen und unkorreliertes Johnson-Rauschen.

Die Forschenden der Universität Konstanz wendeten FemNoC an, um die magnetischen Fluktuationen des Antiferromagneten  $\text{Sm}_{0,7}\text{Er}_{0,3}\text{FeO}_3$  zu messen. Dafür galt es, die magnetische Korrelationsfunktion über eine Zeitverzögerung von  $-85$  ps bis  $+85$  ps in 2 ps-Intervallen zu messen (Abb. 3). Die Daten zeigen eine symmetrische Zeitdomänen-Korrelationsfunktion

um den Zeitpunkt null, charakteristisch für eine Autokorrelation, mit Oszillationen, die mehrere Dutzend Pikosekunden andauern. Die beobachtete Periode von etwa 20 ps ( $f \approx 50$  GHz) lässt sich der quasi-ferromagnetischen Magnon-Mode des Materials zuschreiben [2]. Die Korrelationsamplitude nimmt mit zunehmender Demodulationszeitkonstante (TC) ab, was der Vorhersage entspricht, dass eine Vor-Mittelung der Puls-zu-Puls-Fluktuationen auftritt [1].

Die Studie lieferte wichtige Einblicke in die inkohärenten Spinfluktuationen eines antiferromagnetischen Materials und demonstrierte, wie die Kombination einer innovativen experimentellen Technik mit vielseitiger digitaler Instrumentierung neue Horizonte erschafft. Die FemNoC-Technik setzt einen neuen Maßstab für zukünftige Experimente in der Spintronik und anderen Feldern, die präzise Messungen von schnellen, inkohärenten Fluktuationen erfordern.

\*

Wir danken Prof. Dr. A. Leitenstorfer und Prof. Dr. S. T. B. Goennen-

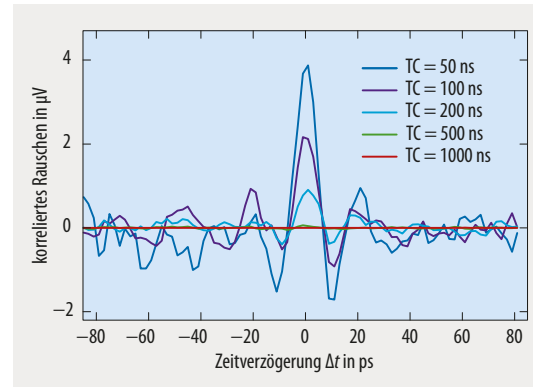


Abb. 3 Korrelationsfunktion für verschiedene Zeitkonstanten [1]

wein von der Universität Konstanz für Bereitstellen der Daten und Zusammenarbeit bei diesem Artikel.

- [1] M. A. Weiss et al., Rev. Sci. Instrum. **95** (8), 083005 (2024)
- [2] M. A. Weiss et al., Nat. Commun. **14**, 7651 (2023)

## Die Autor:innen

**Marvin. A. Weiss**, Fachbereich Physik, Universität Konstanz, 78457 Konstanz, marvin.weiss@uni-konstanz.de und **Heidi Potts**, Zurich Instruments AG, 8005 Zürich, Schweiz, heidi.potts@zhinst.com

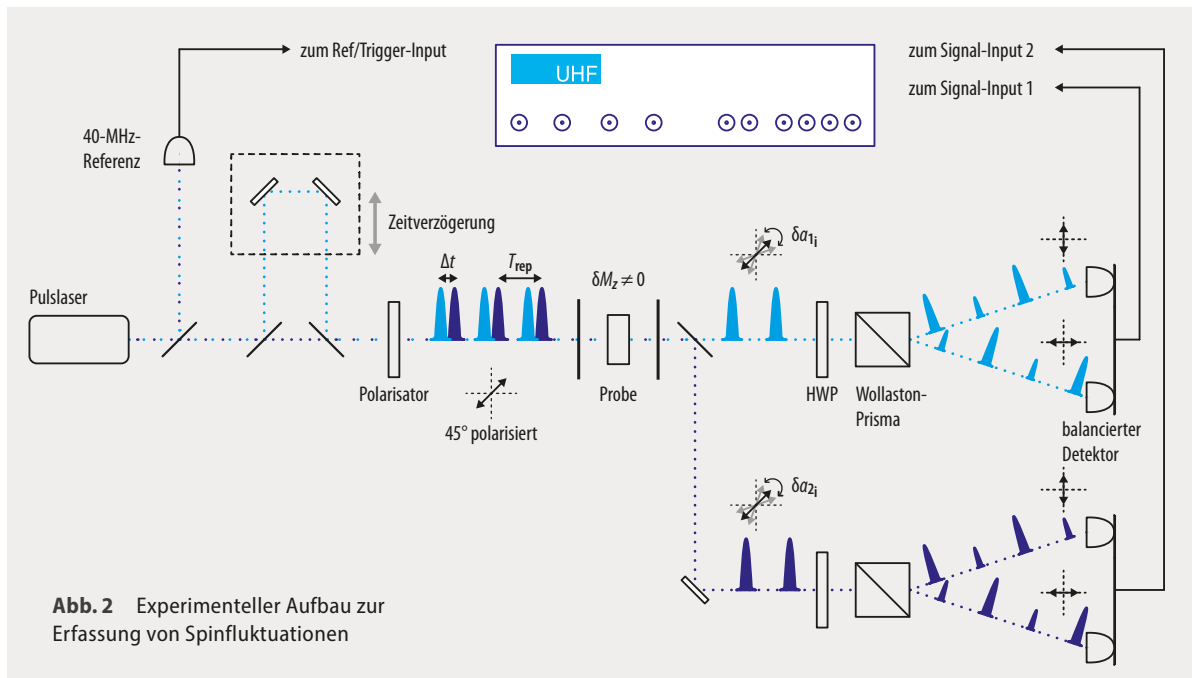


Abb. 2 Experimenteller Aufbau zur Erfassung von Spinfluktuationen