

FoPra SANS-1: Kleinwinkel Neutronenstreuung an magnetischen Nanopartikeln

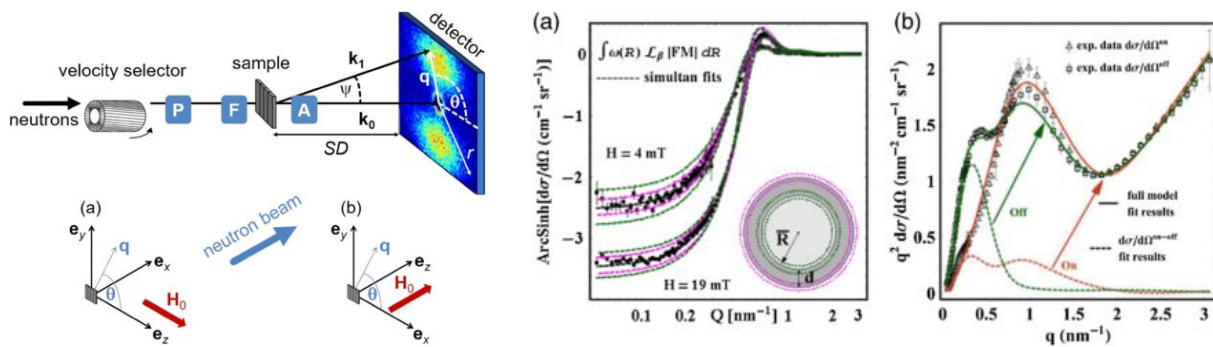


Abbildung 1: Links: Typisches Diagramm eines SANS-Instruments, mit P- Polarizer, F-Spin-Flipper, A-Analyser. Unten: Zwei typische Streuungsgeometrien für magnetische SANS-Messungen. Aus [1]. Rechts: SANS-Messdaten eines Co-basierten Ferrofluids mit „Core-Shell“-Nanopartikeln. Aus [2].

Grundlagen:

Mit Neutronen Kleinwinkelstreuung (small-angle neutron scattering - SANS) lassen sich mesoskopische Längenskalen und Korrelationen von 30Å bis 3000Å in Volumenproben untersuchen. Die typischen Anwendungen sind dabei sehr breit gefächert, von Untersuchungen der Morphologie und des Ausscheidungswachstumes in metallischen Werkstoffen und Legierungen über biologische Strukturen und Molekülen bis zu Magnetismus auf der Nanoskala und fundamentalen Fragen in der Festkörperphysik. Eine kompakte Zusammenfassung über die Anwendungen von magnetischer Kleinwinkelstreuung ist in [1] gegeben.

Magnetische Nanoteilchen sind oft Eisen, Eisenoxid, Ferrit oder Cobalt basierte Volumenpartikel im Bereich weniger Nanometer bis einige zehn Nanometer. Eine Suspension dieser magnetischen Nanoteilchen in einem flüssigen Medium wird als Ferrofluid bezeichnet. Die magnetischen Eigenschaften sind dabei stark von der Größe und Form der Partikel abhängig, von superparamagnetischen Verhalten bei kleinen Teilchen bis zu Ferromagnetismus bei wachsender Größe. Bei hohen Konzentrationen der Nanoteilchen in einem Ferrofluid werden zudem Korrelationseffekte wichtig. Die Anwendungen von magnetischen Nanopartikeln sind vielfältig, von magnetischer Hyperthermie in der Krebstherapie über magnetische Dämpfer und Aktuatoren bis hin zu fundamentalen Fragestellungen in der Festkörperphysik.

Die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von magnetischen Nanopartikeln und Ferrofluiden zeigt sehr gut die Stärke von Kleinwinkelstreuung mit Neutronen. Durch ihr magnetisches Moment sind Neutronen sowohl auf die nukleare Struktur der Nanopartikel als auch auf ihre magnetischen Eigenschaften sensitiv. Eine Messung mit Hilfe von Neutronen erlaubt sowohl die Form, Größe und Größenverteilung als auch die Magnetisierung der Teilchen mikroskopisch mit statistischen relevanten Methoden zu erfassen. In den letzten Jahren hat auch die Modellierung der magnetischen Eigenschaften von Proben auf mesoskaligen Längen durch mikromagnetische Theorie große Fortschritte gemacht.

Ziel dieses Praktikumsversuchs sind es, die Grundlagen der Neutronen Kleinwinkelstreuung zu erarbeiten und dann einige ausgewählte Proben von magnetischen Nanoteilchen und Ferrofluiden damit zu untersuchen. Hierzu wird eine digitale Version (digital twin) der Neutronenkleinwinkelanlage SANS-1 benutzt. Die Streuversuche werden mit numerischen Monte-Carlo Methoden simuliert. Die magnetische Antwort und das erwartete SANS Signal von einfachen Nanopartikeln wird mit Hilfe von mikromagnetischen Simulationen berechnet.

Durchführung:

- Die einzelnen Komponenten der Beamline SANS-1 am FRM II werden im Detail mit ihrer Funktion vorgestellt und erklärt.
- Die Methode der Neutronen Kleinwinkelstreuung wird mit Hilfe des digital Twin der SANS-1 erarbeitet: Dazu werden die Konzepte von mittlerer Streulängendichte, der Faltung von Form- und Strukturfaktor eingeführt und die Methode der Kontrastvariation erklärt. Die Ergebnisse werden mit einfachen Monte Carlo Simulationen mit dem Programm McStas [3-8] validiert und gefittet.
- Das Konzept von magnetischer Neutronen Kleinwinkelstreuung wird eingeführt anhand der verschiedenen Beiträge zum magnetischen Kontrast, wie z.B. durch Variation der Magnetisierungsrichtung (Spin Misalignment Scattering) oder Variation der Sättigungsmagnetisierung. Die Grundzüge und das Setup von Kleinwinkel Neutronenstreuung mit polarisierten Neutronen (SANSPOL und POLARIS) werden kurz erläutert.
- Einfache Beispiele von mikromagnetischen Simulationen von magnetischen Nanoteilchen werden durchgeführt.

Referenzen

- [1] Mühlbauer, S., Honecker, D., Périgo, É. A., Bergner, F., Disch, S., Heinemann, A., Erokhin, S., Berkov, D., Leighton, C., Eskildsen, M. R., & Michels, A. (2019). Magnetic small-angle neutron scattering. *Reviews of Modern Physics*, 91(1), 1–75. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.91.015004>
- [2] Heinemann, A., A. Wiedenmann, and M. Kammel, The full potential of small-angle scattering with polarised neutrons for structure parameter evaluation in magnetic liquids, *Physica B (Amsterdam)* 350, E207 (2004).
- [3] K. Lefmann and K. Nielsen, *Neutron News* 10, 20, (1999).
- [4] P. Willendrup, E. Farhi and K. Lefmann, *Physica B*, 350 (2004) 735.
- [5] P. Willendrup, E. Farhi E. Knudsen, U. Filges and K. Lefmann, *Journal of Neutron Research*, vol. 17, no. 1, pp. 35-43, 2014
- [6] P. Willendrup, and K. Lefmann, *Journal of Neutron Research*, vol. 22, no. 1, pp. 1-16, 2020
- [7] P. Willendrup, and K. Lefmann, *Journal of Neutron Research*, vol. 23, no. 1, pp. 7-27, 2021
- [8] McStas Union Subsystem: M. Bertelsen Software for simulation and design of neutron scattering instrumentation, University of Copenhagen PhD Thesis, 2017