

Radiographie und Tomographie mit polarisierten Neutronen

Nikolay Kardjilov, Ingo Manke, Markus Strobl, André Hilger, John Banhart
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (ehemals Hahn-Meitner-Institut
Berlin), Glienicker Str. 100, 14109 Berlin

Forscher des Helmholtz-Zentrums Berlin für Materialien und Energie (ehemals Hahn-Meitner-Institut Berlin) haben eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist, die Verteilung von Magnetfeldern im Inneren von massiven, nichttransparenten Materialien in 2D und 3D sichtbar zu machen [1, 2]. Dazu wurden die besonderen Eigenschaften von spin-polarisierten Neutronen genutzt, die eine hohe Eindringtiefe in vielen Materialien haben und zugleich ein magnetisches Moment besitzen.

Neutronen werden seit langem erfolgreich als alternative Messsonde zur Röntgenstrahlung für radiographische und tomographische Verfahren eingesetzt, da sie viele Materialien aufgrund ihrer elektrischen Neutralität leicht durchdringen können. So können Neutronen beispielsweise einige Zentimeter Blei- einem Abschirmungsmaterial für Röntgenstrahlung- durchleuchten. Darüber hinaus besitzen Neutronen aber noch eine weitere Eigenschaft: ein magnetisches Moment, welches antiparallel zum Neutronenspin orientiert ist. Befindet sich ein Neutron in einem äußeren Magnetfeld so präzediert der Neutronenspin – in der klassischen, nicht-quantenmechanischen Sichtweise betrachtet - um die Magnetfeldachse. Je stärker das Magnetfeld und je länger die Aufenthaltsdauer im Magnetfeld ist, desto größer ist die Spindrehung. Diese Eigenschaft der Neutronen wurde erstmalig als bildgebendes Signal genutzt.

Dazu wurde am Helmholtz Zentrum ein Instrument für Neutronenradiographie und -tomographie aufgebaut und unter anderem mit einem Spin-Polarisator, der die Neutronen polarisiert, sowie einen Spin-Analysator ausgestattet. Am Ende der Anordnung befindet sich ein 2D-Detektor, mit dem die Spindrehung orts aufgelöst gemessen wird. In Abbildung 1 ist schematisch das Messprinzip dargestellt.

Durchstrahlt man ein Objekt mit den spin-polarisierten Neutronen, dann wird der Neutronenspin abhängig von der Stärke des Magnetfeldes an dem jeweiligen Ort unterschiedlich stark gedreht. Der Spin-Analysator lässt praktisch nur die „Komponente“ des Spins durch, die parallel zur Polarisator-Einstellung ausgerichtet ist. Wird der Spin beispielsweise um 180° gedreht, dann ist die Transmission 0%. Bei 360° hingegen wieder 100%. So ergibt sich schließlich ein indirektes Abbild des Magnetfeldes.

Abb. 2 zeigt zur Veranschaulichung das Magnetfeld um einen Permanentmagneten. Das Magnetfeld wird mit zunehmendem Abstand vom Magneten schwächer. Dies führt zu einer ringartigen Struktur, jeweils ein Ring für eine volle 360° Spin-Drehung. Ein solches Bild besteht aus etwa 1 Mio Pixel und wird in typischerweise einigen Sekunden bis Minuten gemessen. Da es sich um eine zerstörungsfreie, radiographische Methode handelt, kann ein Objekt oder auch ein Prozess praktisch in Echtzeit untersucht werden.

Zudem lassen sich die zu untersuchenden Objekte im Strahl drehen, so dass insgesamt Einblicke in die dreidimensionale Magnetfeldverteilung des Objekts gewonnen werden. In einigen Fällen lassen sich sogar bekannte tomographische Rekonstruktionsalgorithmen einsetzen, um ein dreidimensionales Abbild der inneren Feldverteilung zu erstellen. Dies wurde exemplarisch an einem Bleizylinder durchgeführt. Blei wird unterhalb der kritischen Temperatur von $T_c = 7.2$ K supraleitend. Wird während des Abkühlens ein äußeres magnetisches Feld angelegt, dann wird dieses aufgrund des Meissner-Effekts unterhalb T_c aus dem Inneren des Bleizylinders herausgedrängt. Wenn die Bleiprobe polykristallin ist oder andere Abweichungen von einem idealen Kristall aufweist, dann ist dieser Prozess nicht

vollständig. Nach Abschalten des äußeren Feldes, verbleibt ein Teil des magnetischen Flusses im Inneren. Man spricht von „flux-trapping“, also von einem „eingeschlossenen“ magnetischen Fluss. Abbildung 3 zeigt aus verschiedenen Blickwinkeln das Tomogramm eines Bleizylinders, in dessen Inneren ein solches Feld eingeschlossen und tomographiert wurde. Der magnetische Fluss ist gelb dargestellt, der Bleizylinder halbtransparent in grün. Mögliche Anwendungsfelder der neuen Technik reichen von der Analyse von Effekten in Supraleitern oder von magnetischen Domänenstrukturen bis hin zur Untersuchung von Stromdichteverteilungen etwa in Batterien oder Brennstoffzellen.

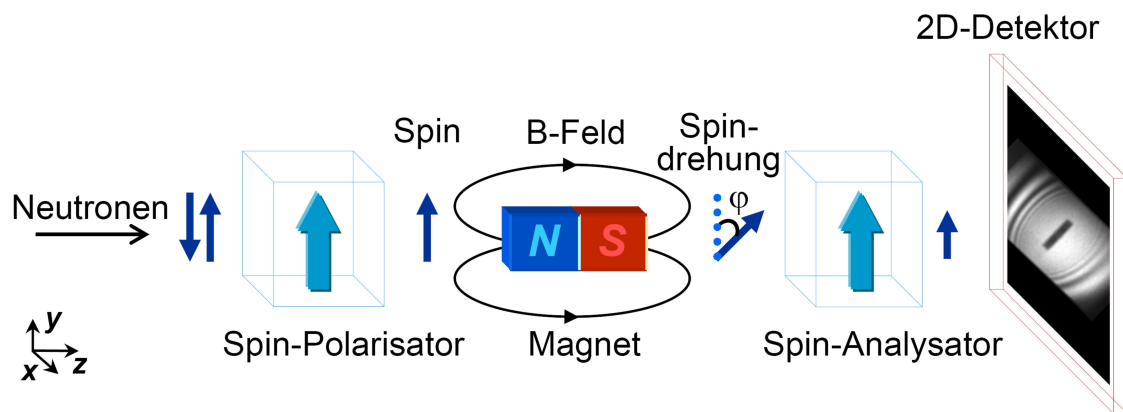


Abb. 1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus. Die Neutronen werden zunächst polarisiert. Nach Durchdringen des Probenbereichs werden nur die Anteile des Neutronenstrahls parallel zur Analytoreinstellung weitergeleitet und mit einem 2D-Detektor analysiert [1].

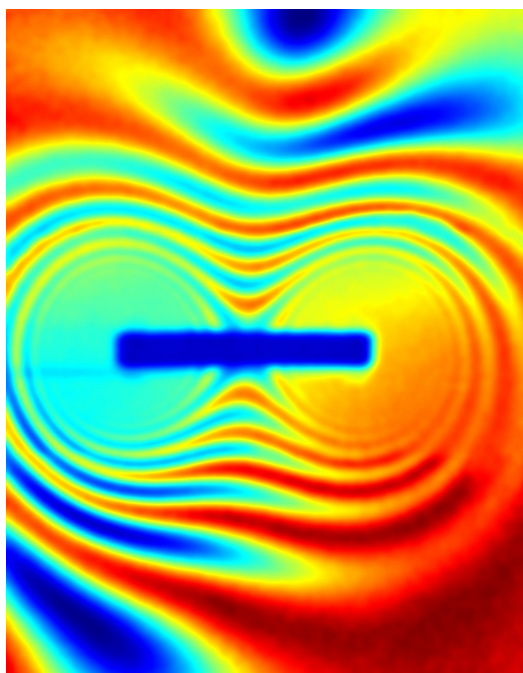


Abb.2: Magnetisches Feld um einen Stabmagneten [3, 4].

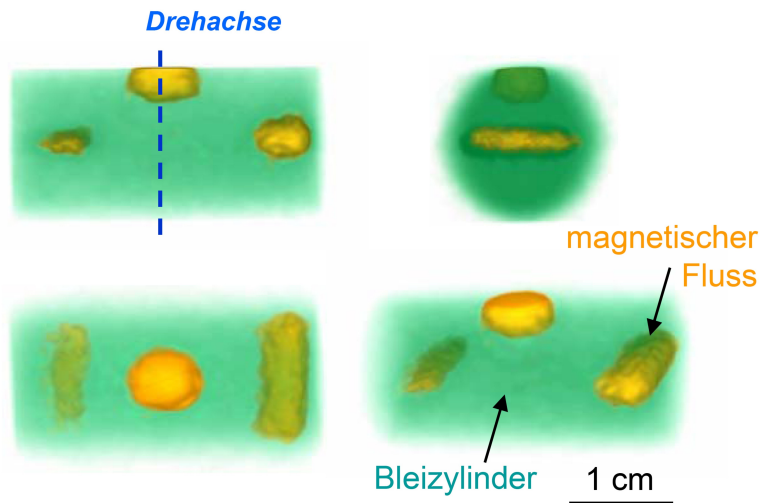


Abb.3: Dreidimensional Darstellung „eingeschlossenen“ Magnetfelder (trapped flux) in einem Bleizylinder, der unterhalb von 7.2 K supraleitend wird [1].

Literatur:

- [1] N. Kardjilov, I. Manke, M. Strobl, A. Hilger et al, “*Three-dimensional imaging of magnetic fields with polarized neutrons*”, Nature Physics **4**, 399-403 (2008)
- [2] Nature Physics, press release,
http://www.nature.com/nphys/press_releases/nphys0308.html
- [3] I. Manke N. Kardjilov, A. Hilger, J. Banhart, “*Einblicke in Magnetfelder*”, Physik in unserer Zeit (erscheint Juli 2008)
- [4] N. Kardjilov I. Manke, A. Hilger, M. Dawson, J. Banhart, “*Spin-polarized Neutron Imaging*”, Advanced Materials & Processes (erscheint Juli 2008)