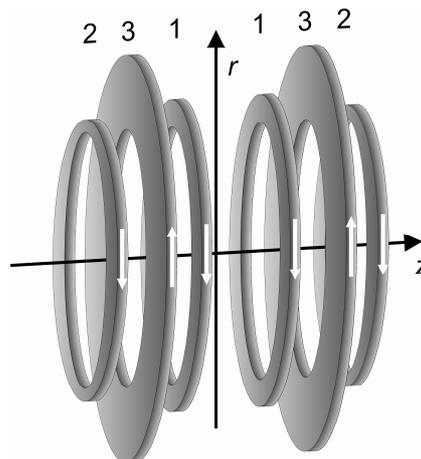


## MNPQ-Projekt: Ein neuartiges kompensiertes Spulensystem für die Messung magnetischer Momente mit geringem Streufeld einfluss und die streufeldarme Erzeugung magnetischer Felder

Die gebräuchliche Methode, das magnetische Dipolmoment eines Permanentmagneten zu bestimmen, besteht darin, das in einer Spule induzierte Spannungssignal, das entsteht, wenn die Permanentmagnet-Probe bewegt wird, zu integrieren. Voraussetzung für diese Methode ist die Verwendung eines Spulensystems, das eine hinreichend homogene Empfindlichkeit über das Probenvolumen besitzt.

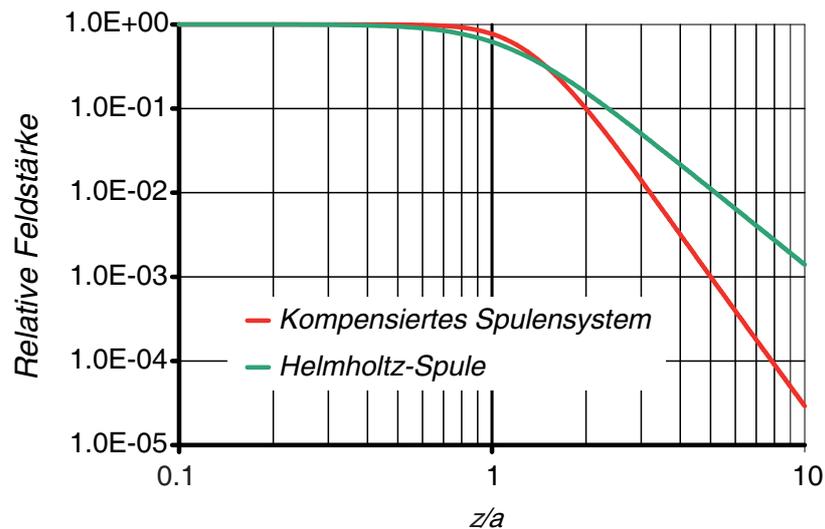
Um dies sicherzustellen, werden bisher großvolumige Helmholtz-Spulen verwendet. Derartige Helmholtz-Spulen haben – neben ihren großen Abmessungen – einen zweiten, sehr gravierenden Nachteil: Sie reagieren nicht nur auf die Probe in ihrem Inneren empfindlich, sondern auch auf sich bewegende magnetische Momente in weiter Entfernung von Spulenzentrum.

Um den Einfluss dieser magnetischen Störungen zu minimieren, wurde ein neuartiges kompensiertes Spulensystem in der PTB entwickelt [1], welches aus drei Spulenpaaren besteht, wovon eines der Spulenpaare eine entgegengesetzte Orientierung des Stromflusses aufweist. Der Aufbau dieses kompensierten Spulensystems ist in Fig. 1 dargestellt.



**Fig. 1** Aufbau des kompensierten Spulensystems. Die Windungszahlen ( $n_1$ ,  $n_2$  und  $n_3$ ) für die verschiedenen Spulenpaare 1, 2 und 3 sind alle identisch. Die Richtungen des Stromflusses für die einzelnen Spulen sind durch Pfeile gekennzeichnet.

Nach dem Reziprozitätsprinzip ist ein derartiges kompensiertes Spulensystem damit auch in der Lage, sehr homogene magnetische Felder im Inneren der Spule in Kombination mit einem sehr kleinen magnetischen Streufeld nach außen zu generieren. Fig. 2 zeigt einen Vergleich zwischen berechneten Daten der relativen Feldamplitude für das kompensierte Spulensystem und einer klassischen Helmholtz-Spule auf der Spulenachse (z-Achse) unter der Annahme infinitesimal dünner Drahtdurchmesser. Man beachte hier den – im Vergleich zur Helmholtz-Spule – erweiterten homogenen Bereich für die kompensierte Spule im inneren Teil der kompensierten Spule (d.h. für  $z/a < 1$ ) und den deutlich steileren Abfall der relativen Feldamplitude in der Region außerhalb der kompensierten Spule (d.h. für  $z/a > 1$ ) im Vergleich zur Helmholtz-Spule. Die magnetische Feldamplitude auf der Achse des kompensierten Spulensystems für  $z/a > 1$  fällt nach dem Potenzgesetz  $H \sim z^{-5}$  ab und somit deutlich schneller als im Fall der Helmholtz-Spule für  $z/a > 1$  ( $H \sim z^{-3}$ ).

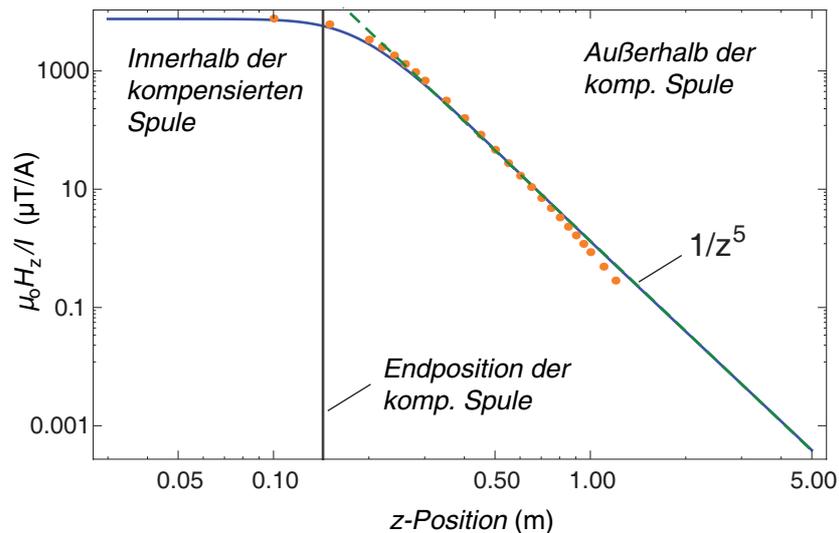


**Fig. 2** Vergleich der berechneten, relativen Feldamplitude in Richtung der Spulenachse für das kompensierte Spulensystem (rote Linie) und für ein Helmholtz-Spulensystem (grüne Linie). Hier dargestellt ist die relative Feldamplitude in Abhängigkeit von  $z$  bezogen auf die halbe Länge  $a$  der beiden Spulensysteme.

Während der Laufzeit des MNPQ-Projektes wurden mehrere unterschiedliche Prototypen der kompensierten Spule nach den Vorgaben der PTB Braunschweig durch die Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Köln, hergestellt [2]. Die hierfür verwendeten Fabrikationsdaten basierten dabei – im Gegensatz zu den Berechnungen in Ref. [1], bei denen infinitesimal dünner Drahtdurchmesser angenommen wurden – auf Berechnungen mit realistischen Draht- und Spulenabmessungen. Fig. 3 zeigt ein Bild eines solchen Prototypen der kompensierten Spule mit 1152 Windungen für jede der sechs Einzerspulen.



**Fig. 3** Bild eines Prototypen des kompensierten Spulensystems mit 1152 Windungen für jede der sechs Einzerspulen. Alle Anschlüsse der sechs Einzerspulen sind an dem Terminal in der Mitte des Spulensystems herausgeführt.



**Fig. 4** Feldprofil  $\mu_0 H_z/I(z)$ , gemessen auf der Spulenachse (orange Punkte) und Daten der analytischen Rechnung (blaue, durchgezogene Linie) eines Prototyps des kompensierten Spulensystems. Der Abfall von  $\mu_0 H_z/I(z)$  für große Werte der  $z$ -Position mit  $z^{-5}$  ist hier durch die gestrichelte grüne Linie verdeutlicht. Die Endposition der kompensierten Spule wird durch die vertikale graue Linie, die die Region innerhalb von der Region außerhalb der kompensierten Spule trennt, angedeutet. Die analytischen Berechnungen wurden unter der Annahme realistischer Spulen und Drahtabmessungen mit Hilfe der Gleichung (4.4) aus Ref. 3 durchgeführt.

Wie in Fig. 4 zu erkennen ist, findet man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Feldprofilen und den Daten der Feldmessungen an diesen Prototypen. Die Homogenität des Feldprofils eines Prototyps konnte durch das Einfügen eines Widerstandes parallel zu drei der sechs Einzelspulen weiter verbessert werden. Auf diese Art und Weise wurde es möglich, an diesem Prototyp Präzisionsmessungen mit Hilfe kernmagnetischer Resonanz durchzuführen.

Aufgrund der sehr guten Feldhomogenität (das Spulensystem gewährleistet eine Homogenität bis einschließlich der sechsten Ordnung des Feldes im Zentrum des Spulensystems) und dem raschen Abfall des Spulenfeldes außerhalb des Spulensystems ist dieses Spulensystem hervorragend für Anwendungen geeignet, bei denen magnetische Felder in der Nähe von oder in magnetischen Abschirmungen generiert werden müssen, aber diese magnetischen Abschirmungen vor einer Aufmagnetisierung bewahrt werden müssen. Aus diesem Grund wurde vor Kurzem dieses Spulensystem als Polarisierungsspule in einer Apparatur verwendet, in der mit Hilfe von Fluxgates die magnetische Relaxation von magnetischen Nanopartikeln gemessen wird [4, 5].

Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an: Dr. Robert Hiergeist, Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Tel: +49-2236-3919-82, E-Mail: robert.hiergeist@magnet-physik.de.

## Referenzen

- [1] J. Lüdke, H. Ahlers, M. Albrecht, "Novel Compensated Moment Detection Coil", *IEEE Trans. Magn.* 2007, **43**, 3567.
- [2] R. Hiergeist, J. Lüdke, R. Ketzler, M. Albrecht, G. Ross, Proceedings of the First International Workshop on Magnetic Particle Imaging IWMPi 2010, Magnetic Nanoparticles, Lübeck, Germany, March 18-19 2010, World Scientific Singapore, 141 – 146 (T.M. Buzug et al. Ed.), ISBN-13 978-981-4324-67-0
- [3] F. Fiorillo, "Measurement and Characterization of Magnetic Materials", Amsterdam: Elsevier, 2004
- [4] M. Schilling, D. C. Hempel, D. Jahn, „Vom Gen zum Produkt - aber mit System“ Spektrum der Wissenschaft, Oktober 2009, 34-41
- [5] F. Ludwig, "Fluxgate-Magnetorelaxometry", Workshop "Biomedical Applications of Magnetic Nanoparticles", 2006, September 15., TU Braunschweig, Germany.