**V308: Spulen und Magnetfelder**

Protokoll zum Versuch des Anfängerpraktikums für Medizinphysiker  
Technische Universität Dortmund

**Michelle Wendler & Phuong Quynh Ngo**Gruppe 4

Versuchsdatum: 20.12.2019  
Protokoll verfasst am: 03.01.2020

**michelle.wendler@tu-dortmund.de  
phuong-quynh.ngo@tu-dortmund.de**

**1 Ziel des Versuches**

Das Ziel dieses Versuches ist, die Magnetfelder verschiedener Spulen zu messen und die Hysteresekurve einer Toroidspule mit Eisenkern zu bestimmen.

**2 Theorie**

Durch Strom, also bewegten elektrischen Ladungen, werden Magnetfelder erzeugt. Diese Magnetfelder werden durch die Vektoriellen Größen und beschrieben. Hierbei beschreibt die magnetische Feldstärke die Richtung und den Betrag des und die magnetische Flussdichte des Magnetfeldes. Beide Größen sind mithilfe der Permeabilität über die Beziehung

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1 ) |

miteinander verknüpft. Dabei ist die Vakuum-Permeabilität und die materialabhängige Permeabilität.

Wird ein Leiter von einem Strom durchflossen, so bildet sich um diesen ein Magnetfeld. Bei einem geraden stromdurchflossenen Draht bildet das Magnetfeld konzentrische geschlossene Kreise um diesen. Um die magnetische Flussdichte im Abstand von einem Leiter zu berechnen, wird das Biót-Savart-Gesetz

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

genutzt. beschreibt hierbei den Strom, der durch den Leiter fließt, und ein infinitesimales Leiterstück.

Das Magnetfeld innerhalb einer (langen) Spule ist annähernd homogen. Außerhalb dieser und an den Enden ist es inhomogen. Um den Betrag der magnetischen Flussdichte einer Spule zu berechnen wird mit Hilfe der Länge der Spule und der Anzahl der Windungen die Formel

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2 ) |

genutzt. Diese Formel gilt für Spulen, deren Durchmesser kleiner ist als die Länge

Bei Toroidspulen mit dem Radius ist das Magnetfeld innerhalb dieser homogen und außerhalb ist es Null. Der Betrag der magnetischen Flussdichte lässt sich hierbei über die Formel

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

bestimmen.

Bei einem Helmholtz-Spulenpaar, bei dem zwei gleiche Kreisspulen im Abstand x zum Mittelpunkt angeordnet sind, gilt, dass das Magnetfeld im Inneren auf der Symmetrieachse homogen ist. Für ein ideales Helmholtz-Spulenpaar gilt, dass der Abstand der Spulen dem Radius dieser entspricht. Ist dies nicht der Fall lässt sich beim allgemeinen Fall das B-Feld über die Formel

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3 ) |

berechnen.

Da Ferromagnetische Materialien eine sehr große relative Permeabilität besitzen, verliert die Beziehung ( 1 ) ihre Gültigkeit. Die relative Permeabilität ist nun eine Funktion der magnetischen Feldstärke.

Ferromagnetische Materialien verfügen auch ohne ein außen angelegtes Magnetfeld ein permanentes magnetisches Moment. Diese magnetischen Momente sind in den sogenannten Weiß’schen Bezirken jeweils parallel zueinander angeordnet. Ist kein äußeres Magnetfeld angelegt und der Stoff unmagnetisiert, ist die Ausrichtung der Weiß’schen Bezirke statistisch verteilt. Somit besitzt dieser Stoff kein eigenes Magnetfeld. Wirkt ein äußeres Magnetfeld auf die Weiß’schen Bezirke, vergrößern sich diese, da die magnetischen Momente in diesen sich gemäß dem äußeren Magnetfeld ausrichten. Die Vergrößerung der Bezirke bewirkt eine zunehmende Magnetisierung des Stoffes, da sich nicht alle magnetischen Momente nach einer Beeinflussung durch ein externes Magnetfeldes wieder anders anordnen.

Die Magnetisierung eines Ferromagnetischen Materials lässt sich mit einer Hysteresekurve (Abbildung 1) beschreiben, bzw. darstellen.

Ein Bild, das Text, Karte enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 1: Hysteresekurve [1]

Wird eine Ferromagnetische Probe durch ein externes Magnetfeld beeinflusst, so steigt die Magnetisierung der Probe bis zu einem Sättigungswert an (*Neukurve*). Wird das äußere Magnetfeld verringert, so verringert sich das Magnetfeld der Probe ebenfalls, da sich nun Bereiche mit entgegengesetzter Magnetisierung bilden. Wird das äußere Magnetfeld abgeschaltet, so verbleibt eine Restmagnetisierung, die sogenannte *Remanenz ,* in der Probe. Um dieser Remanenz entgegen zu wirken, und damit die Restmagnetisierung auszugleichen, wird ein Gegenfeld, die *Koerzitivkraft* , angelegt. Bei Erhöhung dieses Gegenfeldes wird die Magnetisierung der Probe negativ und strebt ebenfalls gegen einen Sättigungswert. Bei Umpolung und Erhöhung des äußeren Feldes wird auch das Magnetfeld der Probe umgepolt. Auch hier gibt es eine Remanenz und eine Koerzitivkraft.

Ferromagnetische Materialien erhöhen zudem den magnetischen Fluss einer Spule.

**3 Versuchsaufbau und -durchführung**

**3.1 Magnetfeld lange Spule**

Um das Magnetfeld einer langen Spule mit der Länge und der Windungszahl 300 zu messen wird diese zunächst an ein Netzgerät angeschlossen. Der Strom wird auf eingestellt, um das Magnetfeld zu erzeugen. Anschließend wird das erzeugte Magnetfeld mit einer longitudinalen Hall-Sonde innerhalb der Spule entlang derer Achse gemessen. Es werden Messwerte ab dem Anfang der Spule aufgenommen.

**3.2 Magnetfeld kurze Spule**

Das Magnetfeld einer kurzen Spule mit der Länge und der Windungszahl 100 wird analog zu dem einer langen Spule gemessen. Der Strom wird hierbei auf eingestellt.

**3.3 Magnetfeld eines Helmholtz-Spulenpaares**

Damit das Magnetfeld eines Helmholtz-Spulenpaares mit der Windungszahl und dem Spulenradius gemessen werden kann, wird dieses an ein Netzteil angeschlossen und der Strom wird auf eingestellt. Dabei werden die beiden Spulen in Reihe geschaltet. Das Magnetfeld wird für 3 Spulenabstände , und mit einer transversalen Hall-Sonde jeweils innerhalb und außerhalb für mehrere x-Werte gemessen.

**3.4 Hysteresekurve**

Um die Hysteresekurve einer Toroidspule mit Eisenkern aufzunehmen, wird diese zunächst an das Netzgerät angeschlossen. Die Toroidspule besitzt hierbei die Windungszahl 595 und einen Luftspalt der Breite , in dem eine transversale Hall-Sonde angebracht ist.

Das Magnetfeld wird durch schrittweise Erhöhung des Spulenstroms bis auf einen Wert von erhöht, um die Neukurve aufzunehmen. Anschließend wird der Strom von 10 A auf 0 A runtergeregelt. Nun wird der Strom umgepolt und wird nochmals schrittweise auf 10 A erhöht und dann auf 0 A runtergeregelt. Zum Schluss wird der Strom erneut umgepolt und auf 10 A erhöht.

**4 Auswertung**

**4.1 Magnetfeld lange Spule**

Der experimentelle Wert des Magnetfeldes wird aus den aufgenommenen Messwerten, welche in Tabelle 1 aufgeführt und in Abbildung 2 grafisch dargestellt werden, abgelesen. Es wird der Wert gewählt, der sich am nächsten an der Mitte der Spule befindet, somit bei

.

Hierbei wird der Ursprung der x-Achse auf den Anfang der Spule gelegt.

Tabelle 1: Messdaten zur langen Spule

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *x* [m] | *B* [ | *x* [m] | *B* [ |
| 0,00 | 1,015 | 0,35 | 2,246 |
| 0,05 | 1,296 | 0,40 | 2,284 |
| 0,10 | 1,582 | 0,45 | 2,312 |
| 0,15 | 1,814 | 0,50 | 2,336 |
| 0,20 | 1,985 | 0,55 | 2,352 |
| 0,25 | 2,102 | 0,60 | 2,363 |
| 0,30 | 2,186 |  |  |

Für das Berechnen des theoretischen Wertes des Magnetfeldes wird Formel ( 2 ) genutzt. Der berechnete Wert lautet hierbei

.

Abbildung 2: Magnetfeld einer langen Spule

**4.2 Magnetfeld einer kurzen Spule**

Für das Magnetfeld einer kurzen Spule wird der experimentelle Wert aus den aufgenommenen Messwerten, welche in Tabelle 2 aufgeführt und in Abbildung 3 grafisch dargestellt werden, abgelesen. Es wird der Wert gewählt, der sich in der Mitte der Spule befinden, also bei

.

Auch hier wird der Ursprung der x-Achse auf den Anfang der Spule gelegt.

Tabelle 2: Messdaten zur kurzen Spule

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *x* [m] | *B* [ | *x* [m] | *B* [ |
| 0,00 | 1,029 | 0,21 | 1,744 |
| 0,03 | 1,204 | 0,24 | 1,758 |
| 0,06 | 1,353 | 0,27 | 1,755 |
| 0,09 | 1,494 | 0,30 | 1,738 |
| 0,12 | 1,584 | 0,33 | 1,702 |
| 0,15 | 1,659 | 0,36 | 1,658 |
| 0,18 | 1,712 | 0,39 | 1,593 |

Für das Berechnen des theoretischen Wertes des Magnetfeldes wird hier ebenfalls Formel ( 2 ) genutzt. Der berechnete Wert lautet hierbei

.

Abbildung 3: Magnetfeld einer kurzen Spule

**4.3 Magnetfeld eines Helmholtz-Spulenpaares**

Die experimentellen Werte für die Magnetfelder der jeweiligen Spulenabstände werden jeweils den aufgenommenen Messdaten entnommen. Hierbei wird der Messwert gewählt, der sich am nächsten an der Mitte des Abstandes der beiden Spulen befindet. Der Ursprung der x-Achse wird hierbei auf diese Mitte gelegt. Die Messwerte sind in Tabelle3, Tabelle 4 und Tabelle 5 aufgeführt und in Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6 grafisch dargestellt. Die entnommenen experimentellen Werte lauten hierbei:

Für den Spulenabstand ( :

.

Für den Spulenabstand ( :

.

Für den Spulenabstand ( :

.

Die theoretischen Werte für die Magnetfelder werden über Formel ( 3 ) berechnet. Damit ergeben sich die Werte

.

Tabelle 3: Messwerte für den Spulenabstand

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *x* [m] | *B* [ | *x* [m] | *B* [ |
| -0,020 | 1,974 | 0,005 | 1,867 |
| -0,015 | 1,930 | 0,080 | 1,539 |
| -0,010 | 1,895 | 0,085 | 1,414 |
| -0,005 | 1,870 | 0,090 | 1,289 |
| 0,000 | 1,861 | 0,095 | 1,169 |

Abbildung 4: Magnetfeld des Helmholtz-Spulenpaares mit

Tabelle 4: Messdaten für den Spulenabstand

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *x* [m] | *B* [ | *x* [m] | *B* [ |
| -0,045 | 1,559 | 0,105 | 1,427 |
| -0,035 | 1,390 | 0,115 | 1,217 |
| -0,025 | 1,236 | 0,125 | 0,982 |
| -0,015 | 1,121 | 0,135 | 0,782 |
| -0,005 | 1,063 | 0,145 | 0,622 |

Abbildung 5: Magnetfeld des Helmholtz-Spulenpaares mit

Tabelle 5: Messdaten für den Spulenabstand

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *x* [m] | *B* [ | *x* [m] | *B* [ |
| -0,07 | 1,461 | 0,13 | 1,394 |
| -0,05 | 1,064 | 0,14 | 1,156 |
| -0,03 | 0,755 | 0,15 | 0,928 |
| -0,01 | 0,612 | 0,16 | 0,757 |
| 0,01 | 0,614 | 0,17 | 0,596 |

Abbildung 6: Magnetfeld des Helmholtz-Spulenpaares mit

**4.4 Hysteresekurve**

Abbildung 7: Hysteresekurve

Die Hysteresekurve der Toroidspule mit Eisenkern ist in Abbildung 7 abgebildet. Die zugehörigen Messwerte sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Messdaten zur Hysteresekurve

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *I* [A] | *B* [ | *I* [A] | *B* [ | *I* [A] | *B* [ | *I* [A] | *B* [ | *I* [A] | *B* [ |
| 0 | 3 | 10 | 732 | 0 | 146 | -10 | -733 | 0 | -133 |
| 1 | 110 | 9 | 716 | -1 | -90 | -9 | -716 | 1 | 91 |
| 2 | 269 | 8 | 697 | -2 | -263 | -8 | -697 | 2 | 260 |
| 3 | 403 | 7 | 676 | -3 | -399 | -7 | -676 | 3 | 398 |
| 4 | 493 | 6 | 641 | -4 | -491 | -6 | -650 | 4 | 487 |
| 5 | 555 | 5 | 622 | -5 | -555 | -5 | -622 | 5 | 549 |
| 6 | 603 | 4 | 586 | -6 | -603 | -4 | -586 | 6 | 597 |
| 7 | 643 | 3 | 540 | -7 | -642 | -3 | -539 | 7 | 637 |
| 8 | 676 | 2 | 474 | -8 | -675 | -2 | -474 | 8 | 670 |
| 9 | 707 | 1 | 352 | -9 | -705 | -1 | -344 | 9 | 700 |
| 10 | 732 | 0 | 146 | -10 | -733 | 0 | -133 | 10 | 727 |

Die Werte für die Remanenz und die Koerzitivkraft werden aus der Grafik abgelesen

**5 Diskussion**

Für die ermittelten und berechneten Werte des Magnetfeldes einer langen Spule

ergibt sich eine Abweichung von0,297 % vom theoretischen Wert zu dem experimentellen Wert. Das Magnetfeld innerhalb dieser Spule strebt, je näher man der Mitte kommt, gegen einen konstanten Wert. Das Magnetfeld ist somit in der Mitte der Spule homogen.

Bei dem Magnetfeld der kurzen Spule lässt sich beobachten, dass dieses ein Maximum in der Mitte der Spule hat. Das Magnetfeld kann als parabolisch beschrieben werden. Für die ermittelten und berechneten Werte des Magnetfeldes einer kurzen Spule

ergibt sich eine Abweichung von 17,001 %. Die Abweichung lässt sich damit erklären, dass die verwendete Formel ( 2 ) zur Berechnung des Magnetfeldes eigentlich das Magnetfeld bei langen Spulen beschreibt. Somit ist der berechnete theoretische Wert nur eine Annäherung.

Bei den Magnetfeldern des Helmholtz-Spulenpaares lässt sich beobachten, dass mit zunehmenden Abstand das Magnetfeld innerhalb dieser inhomogener wird. Damit lässt sich sagen, dass der Spulenabstand sehr wichtig bei der Generierung eines homogenen Magnetfeldes ist. Die Messwerte außerhalb des Spulenpaares deuten auf die parabolischen Profile der einzelnen kurzen Spulen hin.

Für die abgelesenen und berechneten Werte des Magnetfeldes eines Helmholtz-Spulenpaares mit Spulenabstand

ergibt sich eine Abweichung von2,82 %.

Für die abgelesenen und berechneten Werte des Magnetfeldes eines Helmholtz-Spulenpaares mit Spulenabstand

ergibt sich eine Abweichung von 0,758 %.

Für die abgelesenen und berechneten Werte des Magnetfeldes eines Helmholtz-Spulenpaares mit Spulenabstand

ergibt sich eine Abweichung von 2,848 %.

Die Hysteresekurve der Toroidspule lässt sich nicht mit anderen Hysteresekurven vergleichen, da diese für jeden Aufbau individuell sind. Jedoch zeigt diese typische Eigenschaften solcher auf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abweichungen der theoretischen und experimentellen Werte bei diesem Versuch in einem angemessenen Rahmen liegen.

**6 Literatur**

[1] Versuchsanleitung für den Versuch V308: Spulen und Magnetfelder

https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/982985/mod\_folder/content/0/V308%20Magnetfelder%20und%20Spulen.pdf?forcedownload=1

Stand: 03.01.2020