

Durchführung: 24.11.2017

Abgabe: 01.12.2017

Korrektur: 15.12.17

## PRAKTIKUMSPROTOKOLL V308

# SPULEN UND MAGNETFELDER

Carolin Harkort<sup>1</sup>,  
Jacqueline Schlingmann<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>carolin.harkort@tu-dortmund.de

<sup>2</sup>jacqueline.schlingmann@tu-dortmund.de

# 1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuchs ist die Bestimmung der Magnetfelder unterschiedlicher Spulen.

## 2 Theorie

Bewegte elektrische Ladungen erzeugen Magnetfelder. Die entstehenden Feldlinien sind immer geschlossen und verlaufen senkrecht zum Stromfluss. Die Magnetfeldstärke  $\vec{H}$  eines stromdurchflossenen Drahtes kann mit dem Biot-Savart-Gesetz

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I \cdot d\vec{s} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \quad (1)$$

bestimmt werden. Dabei ist  $\mu_0$  die Magnetische Feldkonstante mit einem Wert von  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$  und  $r = |\vec{r}|$ , also

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Die Magnetische Flussdichte einer langen stromdurchflossenen Spule wird durch die Formel

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \cdot \frac{n}{l} \cdot I \quad (2)$$

berechnet. Dabei beschreibt  $l$  die Länge der Spule und  $n$  die Windungszahl.  $\mu_r$  beschreibt die Permeabilität eines Stoffes, der in das Spuleninnere gebracht wird, um ein Magnetfeld zu verstärken. Zum Beispiel ist die Permeabilität des Ferromagneten Eisen bis zu 5000. Ferromagnetische Stoffe können magnetisiert werden und werden zum Magneten, wenn sie mit einem in Kontakt kommen. Dies geschieht, weil sich die Elementarmagnete alle in die selbe Richtung ausrichten.[2]

Wird nun ein Magnetfeld an eine (Ring-)Spule mit einem ferromagnetischen Kern gelegt, entsteht eine Hysteresekure, wie sie in Abbildung (1) zu sehen ist.

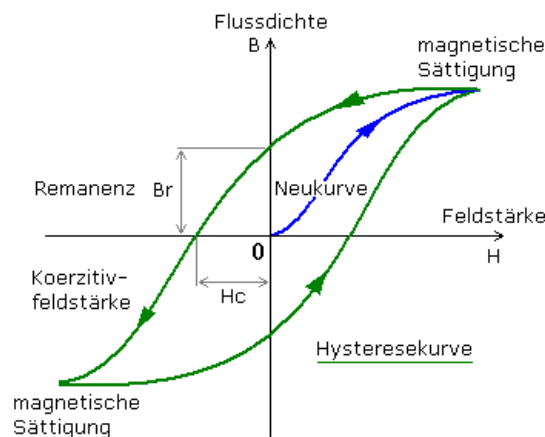


Abbildung 1: Hysteresekurve[3]

Die charakteristischen Eigenschaften einer Hysteresekurve, wobei die Flussdichte  $B$  gegen die äußere Feldstärke  $H$  aufgetragen wird, sind im folgenden aufgezählt.

1. Neukurve:  
Die Neukurve beschreibt den erstmaligen Anstieg der Flussdichte bei Erhöhung des angelegten Stroms.
2. Sättigungspunkte:  
Ab einer gewissen Feldstärke, bleibt die Flussdichte konstant. Dieser Wert wird als magnetische Sättigung bezeichnet. Die Sättigungspunkte sind in negativer und positiver Richtung betragsmäßig gleich.
3. Remanenzflussdichte:  
Die Remanenzflussdichte ist der Schnittpunkt mit der y-Achse. Sie beschreibt das bestehenbleibende Magnetfeld, wenn kein Strom fließt. Dabei gilt, dass der Wert des Schnittpunktes in (+y)-Richtung gleich dem Wert des Schnittpunktes in (-y)-Richtung ist.
4. Koerzitivkraft :  
Die Koerzitivkraft beschreibt den Schnittpunkt mit der x-Achse. Sie ist ein Maß für die magnetische Feldstärke, die benötigt wird um den entstehenden "Restmagnetismus" zu beseitigen[1]

Bei einem Helmholtzspulenpaar ist das Magnetfeld abhängig vom Unterschied zwischen dem Radius  $r$  und dem Abstand  $d$ . Liegt der Unterschied bei  $d = 2 \cdot r$  wird für das Feld in der Mitte der Helmholtz-Spule ein allgemeiner Fall betrachtet. Haben die Helmholtzspulen einen geringen Abstand, so ist das Feld im Inneren wie eine kurze Spule zu betrachten.

$$B(0) = B_1(x) + B_1(-x) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Dabei ist  $\mu_0$  die magnetische Flussdichte und  $R$  der Spulenradius.

## 3 Durchführung

### 3.1 Magnetfeld von Spulen

Im ersten Teil des Versuchs werden die Magnetfelder einer langen und einer kurzen Spule gemessen. Hierfür wird eine longitudinale Sonde so eingestellt, dass sie direkt durch die Mitte der Spulen geschoben werden kann. Bei der kurzen Spule wird ein Strom von 1 Ampere angelegt, bei der langen ein Strom von 1,1 Ampere. Es werden Messwerte außerhalb und innerhalb der Spule in einem Abstand von 0,5 – 1 cm aufgenommen.

### 3.2 Magnetfeld einer Helmholtzspule

Das Spulenpaar wird in Reihe geschaltet und an das Netzgerät angeschlossen. Es wird ein Strom von  $1,2\text{ A}$  angelegt. Die Feldstärke wird bei drei unterschiedlichen Abständen zwischen den Spulen gemessen. Dafür werden Abstände von 8, 11 und 14 cm gewählt. Mit einer transversalen Hall-Sonde wird das Magnetfeld jeweils innerhalb und außerhalb des Spulenpaars gemessen.

### 3.3 Die Hysteresekurve

Für die Messung der Hysteresekurve wird eine Ringspule mit Eisenkern benötigt. In diesem Teil des Versuchs wird das Magnetfeld als Funktion des Spulenstroms gemessen. Dies geschieht ebenfalls mit einer longitudinalen Hall-Sonde. Der Strom wird von 0 auf 10 Ampere hochgedreht. So entsteht die Neukurve. Um den Rest der Hysteresekurve zu bekommen, wird der Strom wieder auf Null herunter gedreht. An diesem Punkt ist eine Umpolung erforderlich, um die Negativen Werte der Kurve zu erzeugen. Es wird wieder auf 10 Ampere hochgedreht und wieder auf Null Ampere heruntergedreht. Es ist wieder eine Umpolung erforderlich. Der Strom wird nun noch einmal auf 10 Ampere hochgedreht. Es zu beachten, dass die Ringspule vorher entmagnetisiert werden muss. Außerdem ist es sehr wichtig den Strom bei der Durchführung nicht wieder hoch oder runter zu drehen. Dies würde die Messung verfälschen, da auf den anderen Ast der Hysteresekurve gewechselt wird.

## 4 Auswertung

Die gemessenen Werte des Versuchs sind im Anhang als Kopie beigefügt.

### 4.1 Magnetische Flussdichte zweier Spulen

Im ersten Teil des Versuchs wird eine längere Spule betrachtet. Dabei wird die Flussdichte im Verhältnis zum Abstand  $x$  gemessen. Die Messwerte für diesen Teil der Messung sind im Anhang zu finden. Mit Formel 2 wird zuerst das Magnetfeld theoretisch berechnet. Daraus folgt

$$B_{\text{theo}} = 2,591\text{ mT} . \quad (4)$$

Der experimentellen Wert des Magnetfelds wird mit

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_n \quad (5)$$

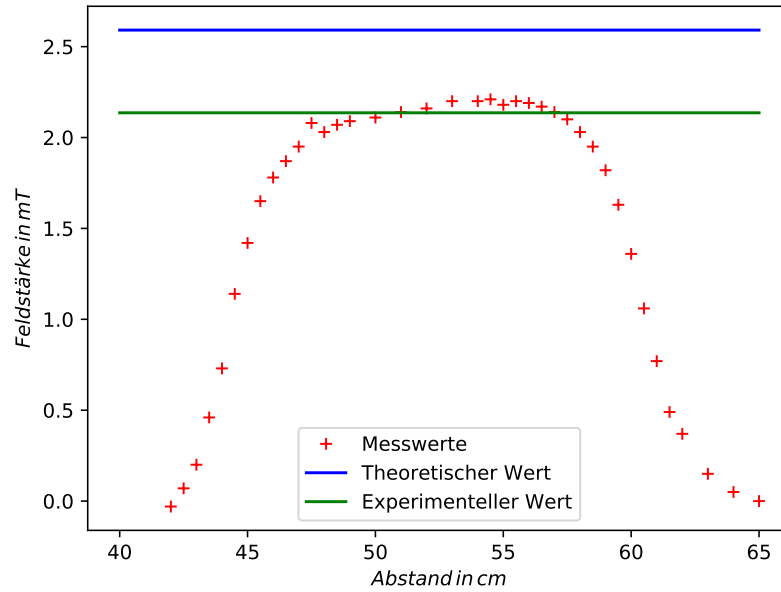


Abbildung 2: Verhältnis der gemessenen Feldstärke zum Abstand für eine 16 cm lange Spule

berechnet. Für die Standardabweichung gilt

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (6)$$

Daraus folgt

$$B_{\text{exp}} = (2,136 \pm 0,031) \text{ mT}. \quad (7)$$

Im zweiten Teil des Versuchs werden die selben Messungen mit einer kürzeren Spule durchgeführt. Daraus folgt

$$B_{\text{theo}} = 2,286 \text{ mT}. \quad (8)$$

Mit Hilfe von Formel (5) und (6) folgt

$$B_{\text{exp}} = (1,773 \pm 0,025) \text{ mT}. \quad (9)$$

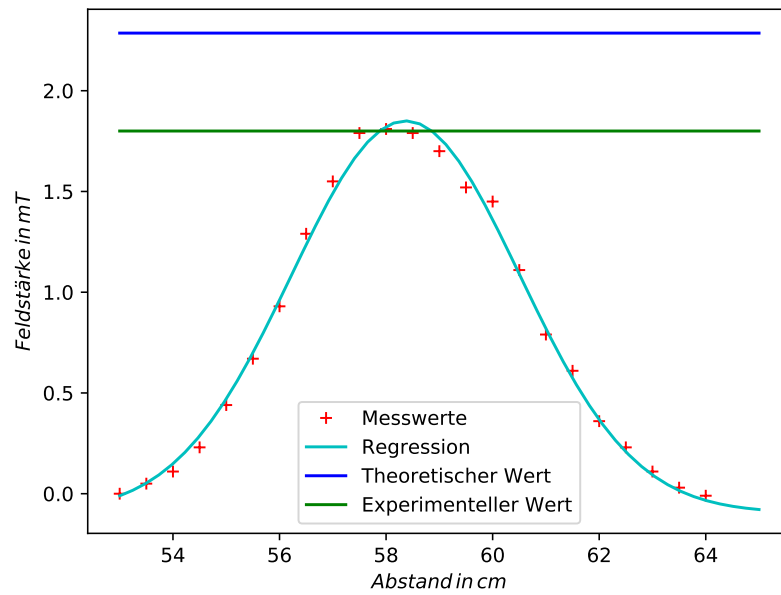


Abbildung 3: Verhältnis der gemessenen Feldstärke zum Abstand für eine 4 cm lange Spule

## 4.2 Helmholtzspule

Die magnetische Flussdichte eines Helmholtzspulenpaar wird dreimal bestimmt. Dabei werden Messungen innerhalb und außerhalb des Spulenpaars durchgeführt. Dafür wird das Spulenpaar zu erst in einem Abstand von 8 cm aufgestellt.

$$B_{8\text{cm}} = 1,689 \text{ mT} . \quad (10)$$

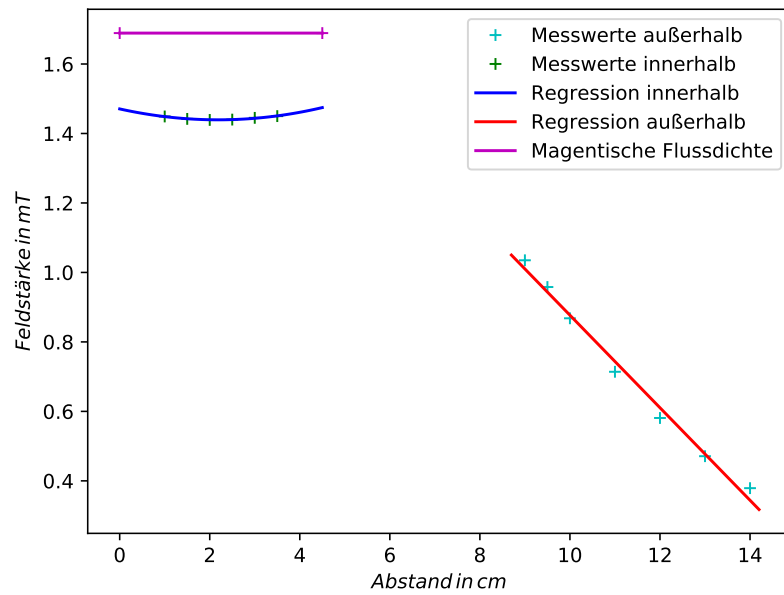


Abbildung 4: Verhältnis der gemessenen Feldstärke zum Abstand für die Helmolzspule, 8 cm

Für einen Abstand von 11 cm ergibt sich für die magnetische Feldstärke

$$B_{11\text{cm}} = 0,820 \text{ mT} . \quad (11)$$

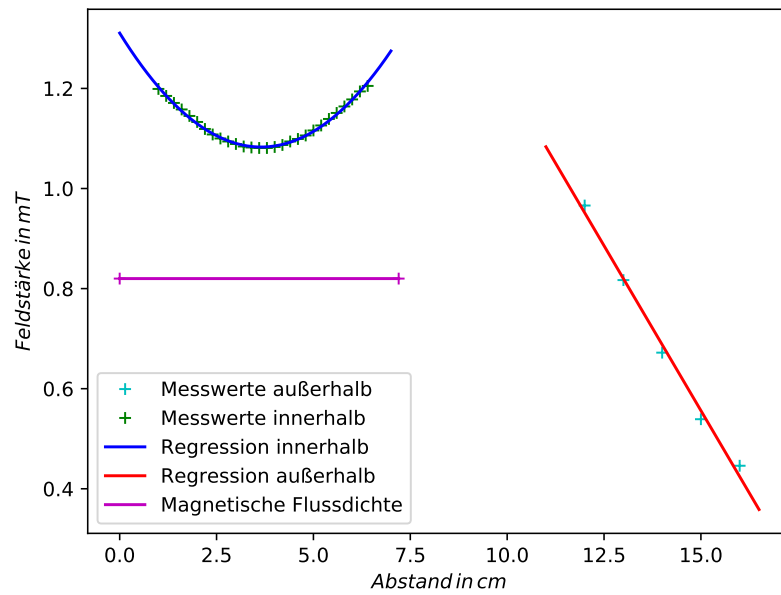


Abbildung 5: Verhältnis der gemessenen Feldstärke zum Abstand für die Helmholtzspule, 11 cm

Im letzten Teil der Helmholtzspule wird die magnetische Flussdichte im Abstand des Spulenpaars von 14 cm bestimmt. Daraus ergibt sich ein Wert von

$$B_{14\text{cm}} = 0,490 \text{ mT} . \quad (12)$$



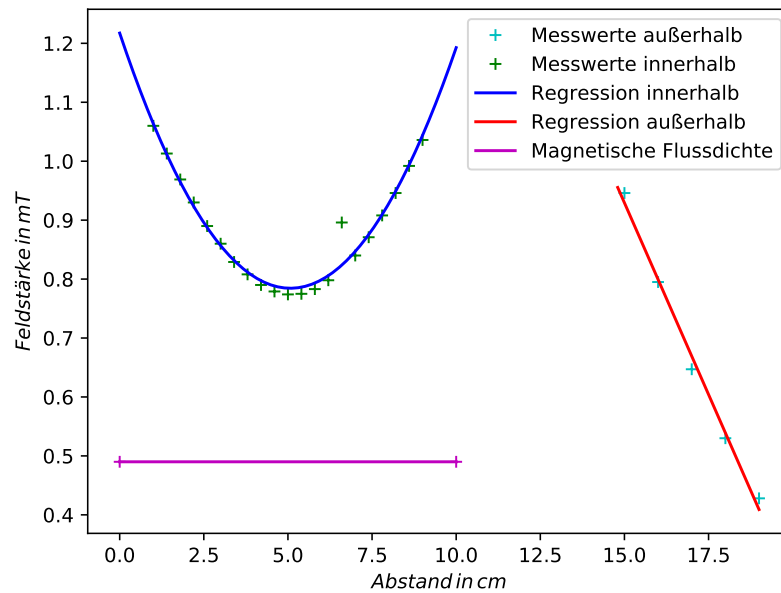


Abbildung 6: Verhältnis der gemessenen Feldstärke zum Abstand für die Helmholtzspule, 14 cm

### 4.3 Hysteresekurve

Die in Abbildung (7) zu sehende Hysteresekurve entsteht aus den gemessenen Werten, die im Anhang zu finden sind.

Die Neukurve führt zu Sättigungspunkt  $A$ , der bei 692 mT liegt. Nachdem kompletten Durchlauf liegt der Wert bei 691,3 mT. Somit folgt:

$$A = (691,650 \pm 0,001) \text{ mT}$$

Der Sättigungspunkt  $C$  wurde nur einmal durchlaufen. Der Wert liegt bei

$$C = -693 \text{ mT}$$

Die Remanenzflussdichte  $B_r$  liegt bei

$$B_{r1} = 127,4 \text{ mT}$$

$$B_{r2} = -127,5 \text{ mT}$$

Für die Bestimmung der Koerzitivkraft wurde eine Ausgleichsrechnung mittels Python durchgeführt. Die Ausgleichsfunktion lautet:

$$f(x) = 693 \cdot \tanh(a \cdot (x + b)) + c \quad (13)$$

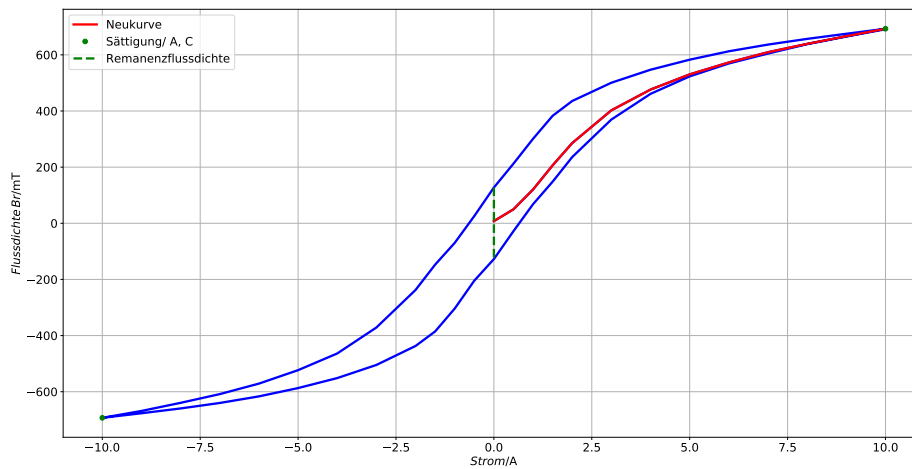


Abbildung 7: Die Hysteresekurve

Die Parameter für die Funktion von dem Weg von  $A$  nach  $C$  lautet:

$$a = (0,247 \pm 0,006) \frac{1}{\text{A}}$$

$$b = (0,74 \pm 0,07) \text{ A}$$

$$c = (-4 \pm 7) \text{ mT}$$

Die Parameter für den Weg von  $C$  nach  $A$  lauten:

$$a = (0,247 \pm 0,005) \frac{1}{\text{A}}$$

$$b = (-0,73 \pm 0,07) \text{ A}$$

$$c = (1 \pm 7) \text{ mT}$$

Da die  $b$ -Werte die Verschiebung auf der x-Achse beschreiben, folgt daraus für die Koerzitivkraft  $K$ :

$$K = (0,735 \pm 0,001) \text{ A}$$

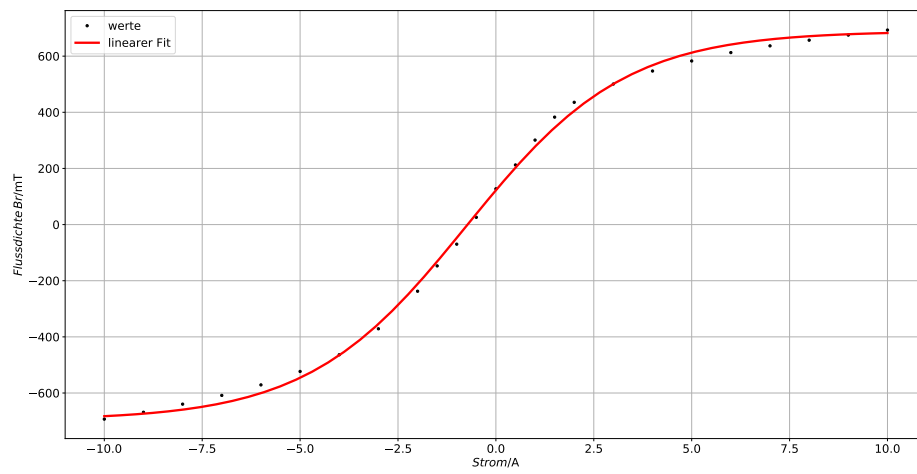


Abbildung 8: Weg A - C

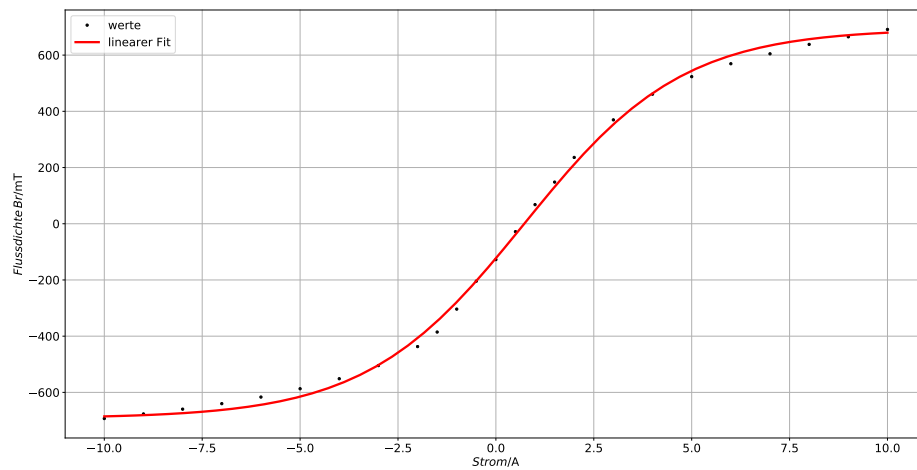


Abbildung 9: Weg C - A

## 5 Diskussion

Für die Bestimmung der magnetischen Flussdichten der einzelnen Spulen und des Helmholtzspulenpaars kam es beim Abnehmen der Messwerte zu einigen Ungenauigkeiten. In der folgenden Tabelle sind diese noch einmal aufgelistet:

Tabelle 1: Bestimmte Werte für die magnetische Flussdichte

Messung	$3.1_{\text{theo}}$	$3.1_{\text{exp}}$	$3.2_{\text{theo}}$	$3.2_{\text{exp}}$
$B$	2,591	2,136	2,286	1,800

Wie in der Tabelle zu sehen ist, sind die Abweichungen von den gemessenen Flussdichten zu den theoretischen doch relativ groß. Besonders die Messapparaturen waren sehr anfällig für Berührungen. Zusätzlich war es schwierig mit Hilfe der Messsonde die magnetische Flussdichte genau in der Mitte der Spule zu messen.

Bei den drei Messungen mit dem Helmholtzspulenpaar ist deutlich geworden, dass der ideale Abstand zwischen beiden Spulen vorhanden ist, wenn der Radius der Spulen gleich ihrem Abstand ist. Ist dies der Fall überlagern sich beide Einzelfelder und das Magnetfeld ist konstant. Mit zunehmenden Abstand wird die Überlagerung der Einzelfelder immer geringer und die Einzelfelder sind viel deutlicher zu erkennen. Dies ist bei einem Abstand von 11 cm und 14 cm deutlich zu sehen. Die magnetische Feldstärke nimmt stark ab aufgrund der immer kleiner werdenden Überlagerung beider Felder. Bei einem Abstand von 8 cm kommen die Messwerte einer Konstanten am nächsten und sind am wenigsten parbelförmig. Den idealen Zustand, in dem sich die Einzelfelder genau überlagern, konnte nicht erfasst werden, da die Messapparatur nicht auf einen noch kleineren Abstand eingestellt werden konnte. Die Werte für A und C sollten gleich sein. Wenn die Funktion zum zweiten mal auf den Sättigungspunkt A trifft, ist dies nicht mehr der Fall. Je länger gemessen wird, desto fehleranfällig wird die Messung.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 308*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/Magnetfeld.pdf> (besucht am 30.11.2017).
- [2] elektroniktutor. *Bild Hysterese*. URL: <http://elektroniktutor.de/elektrophysik/magkurve.html> (besucht am 30.11.2017).
- [3] itwissen. *Koerzitivkraft*. URL: <http://www.itwissen.info/Koerzitivkraft-K-coercive-force.html> (besucht am 30.11.2017).