

Versuch 240

Dohn

Lernziele

- Das Verhalten ferromagnetischer Stoffe im Magnetfeld soll experimentell untersucht werden.
- Es sollen Messmethoden verschiedener Kenngrößen magnetischer Felder geübt werden.

Erläuterung

Grundlagen

- Diamagnetismus:

- a.) von sich aus kein magnetisches Moment.
- b.) durch externes Feld werden magnetische Momente induziert.
- c.) relative Permeabilität (μ_r): $\mu_r \leq 1$ (aber in Supraleitern: $\mu_r = 0$)

- Paramagnetismus:

- a.) besitzt magnetisches Moment.
- b.) schwache innere Wechselwirkung
- c.) ungeordnete magnetische Struktur
- d.) kleine Nettoeffekt in Feldrichtung bei externem Feld.
- e.) $\mu_r \approx 1$
- f.) schwache Temperaturabhängigkeit.

- Ferromagnetismus:

- a.) besitzt magnetisches Moment.
- b.) starke innere Wechselwirkung
- c.) mehrere Möglichkeiten der Ordnung.
- d.) großes magnetisches Moment in Feldrichtung.
- e.) Ferromagnete: $\mu_r \gg 1$
Ferrimagnete: $\mu_r > 1$

f) ferromagnetisch oberhalb der Curie-Temperatur

- Kenngrößen:

a.) magnetische Feldstärke (H): $H = \frac{I \cdot n}{l}$ (l - Länge, n - Windungszahl der Stromdurchflossenen Spule)

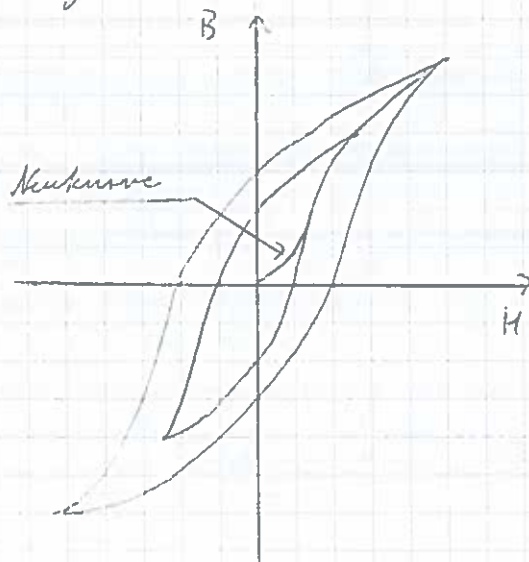
b.) magnetische Induktion (B): $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

c.) magnetisierung (M): $M = (\mu_r - 1) \cdot H = \chi_{\text{mag}} \cdot H$
(χ_{mag} - magnetische Suszeptibilität)

• Hysterese

Eine Hysteresekurve ist die graphische Darstellung des magnetischen Verhaltens eines ferromagnetischen Stoffes. Das Material durchläuft eine äußere Kurve, wenn es bis zur Sättigung und dann zyklisch magnetisiert wird. Eine innere Schleife ergibt sich wenn man die zyklische Magnetisierung von erreicht der Sättigung beginnt.

Beispiel:



Zur Bestimmung von charakteristischen Größen (wie Remanenzflussdichte B_R , Koerzitivfeldstärke H_K , Anfangs- sowie maximale Permeabilität μ_A / μ_{max}) von z.B. Eisen dient eine ähnliche Vorrichtung wie ein Trafo mit Eisenkern. Es gelten dann folgende Zusammenhänge:

$$\vec{B}_{Fe} = \vec{B}_L, \text{ außerdem } \oint \vec{H} d\vec{s} = H_{Fe} \cdot L_{Fe} + H_L \cdot d = N \cdot I$$

mit \vec{H}_{Fe} , \vec{H}_L und \vec{B}_{Fe} , \vec{B}_L - magnetische Erregung bzw. Feldstärke in Eisen und Luftspalt, L_{Fe} - mittlere Länge des Eisensings
 Außerdem:

$$H_{Fe} = \frac{N \cdot I}{L_{Fe}} - \frac{d}{\mu_0 \cdot L_{Fe}} \cdot B_{Fe} \quad (\text{oder } B_{Fe} = B_L = \mu_0 \cdot H_L)$$

($B_{Fe} = B_L$ im Luftspalt gemessen)

• Halleffekt und Hallsonde

Ein flacher, streifenförmiger Leiter der (senkrecht) von einem Magnetfeld der Flussdichte \vec{B} durchsetzt wird, wird von einem Strom \vec{I} (senkrecht zu \vec{B}) durchflossen. Dann gilt für die Lorentzkraft \vec{F} auf eine Ladung q :

$$F = q \cdot v_d \cdot B \quad (\text{für Beträge})$$

mit v_d - Driftgeschwindigkeit.

Dann: Ladungsträger auf gekrümmte Bahnen gelenkt \rightarrow diese sammeln sich am Rand (wenn Krümmungsradius $>$ Abmessung des Streifenleiters) \rightarrow getrennte Ladungen erzeugen elektrisches Feld $\vec{E} \rightarrow$ Potentialdifferenz = Hallspannung U_H

Es gilt:

$$U_H = E \cdot b = v_d B b \quad (b - \text{Breite des Leiters}) \quad \text{und}$$

$$I = n \cdot q \cdot v_d A \quad (n - \text{Ladungsträgerdichte und } A = b \cdot d)$$

Hallkonstante:

$$A_H = \frac{1}{nq} \quad \Rightarrow \quad U_H = \frac{IB}{eqd} = A_H \frac{I}{d} B = S_H B$$

Messwerte

d.) Messfehler : $B_{B1} : \pm 1 \text{ mT}$
 $I_{A1} : \pm 1 \text{ mA}$

$$B_0 = +13 \text{ mT} \quad I_0 = 0 \text{ A}$$

b.) Die Messung wurde durchgeführt und die Daten digital aufgenommen zur späteren Auswertung.

240.3. Versuchsdurchführung

Aufgabe 240. a:

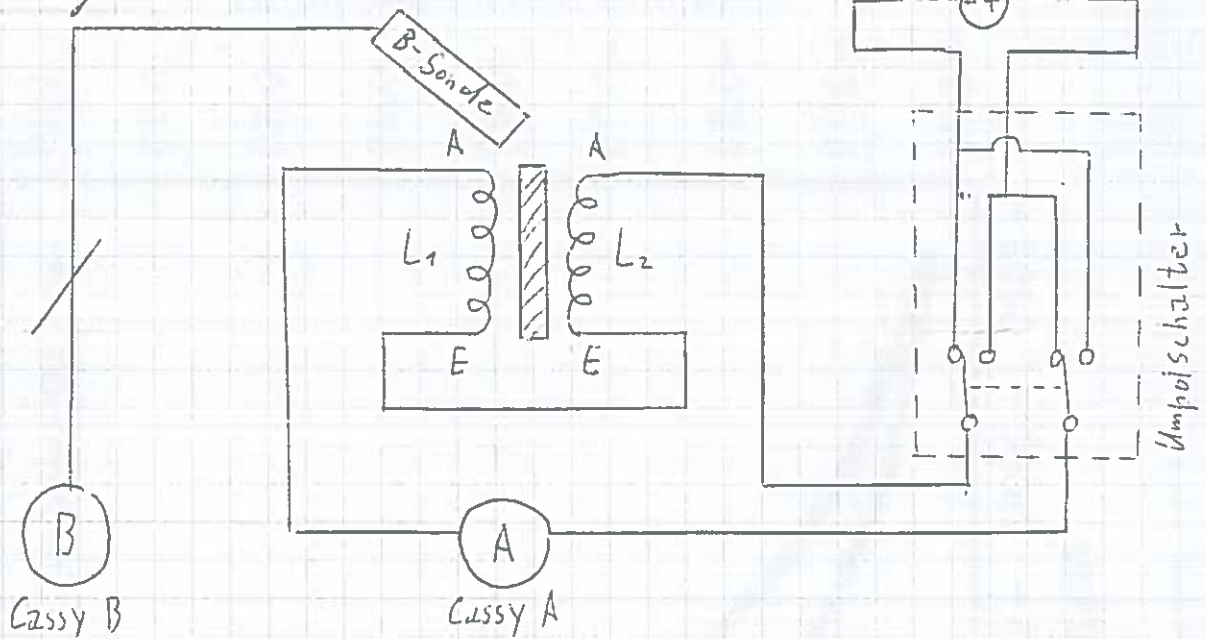
Vor dem Versuchsbeginn wurde der Eisenkern entmagnetisiert, damit dieser keine Restmagnetisierung mehr aufweist. Dabei wurde eine magnetische Flussdichte von $B_0 = 13 \text{ mT}$ festgestellt. Außerdem wurden die Messfehler von B und I (Stromstärke) dabei auf $\Delta B = \pm 1 \text{ mT} = \pm 0,001 \text{ T}$ und $\Delta I = \pm 1 \text{ mA} = \pm 0,001 \text{ A}$ geschätzt.

Für Entmagnetisierung wird kein Umschalter benötigt, da der Versuch mit Wechselstrom durchgeführt wird. Dadurch fließt der Strom auch ohne Verwendung des Schalters in beide Richtungen, was für die Entmagnetisierung genügt.

Aufgabe 240. b:

Es soll nun mit der folgenden Schaltung B im Luftspalt des Eisenkerns in Abhängigkeit von I gemessen werden, dabei ist der Messbereich des Cossys zu beachten (und nicht zu überschreiten). Diese Daten wurden zur späteren Auswertung (Aufgabe c) digital festgehalten und weiterverwendet.

Schaltung:



Cassidy Größen:

Messfehler / Werte:

Stromstärke (I)	$\Delta I = \pm 0,001 \text{ A}$
magn. Flussdichte (B)	$\Delta B = \pm 0,001 \text{ T}$
Windungszahl (N)	$N = 2 \cdot 500 = 1000$
Eisenkerlänge (l)	$l = (477 \pm 4) \text{ mm}, \Delta l = 4 \text{ mm}$
Eisenkerbreite (d)	$d = (2 \pm 0,05) \text{ mm}, \Delta d = 0,05 \text{ mm}$

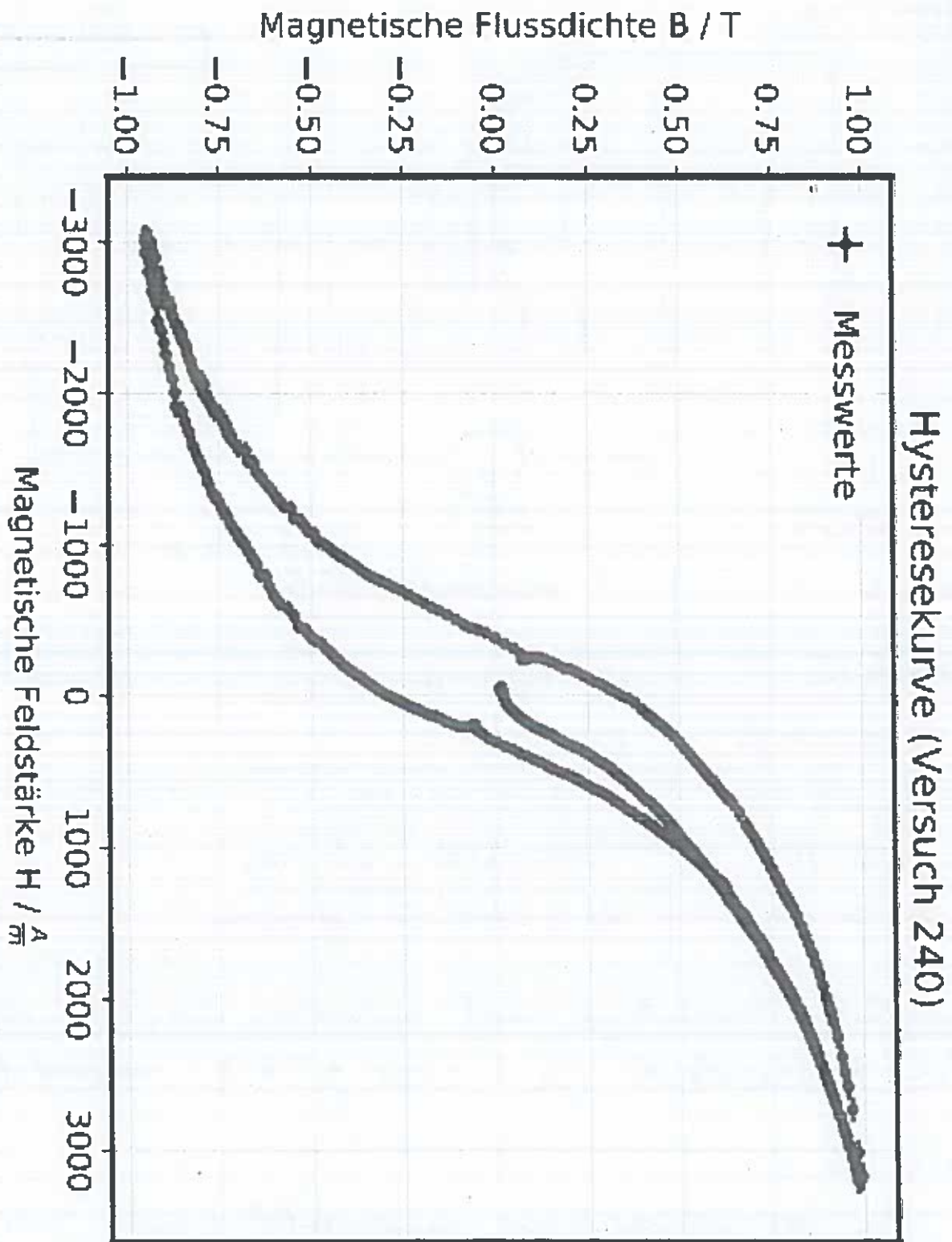
Für spätere Auswertung wird außerdem der Wert der magnetischen Feldkonstante ($\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$) verwendet.

Aufgabe 240. c:

Nun sollen die Messergebnisse ausgewertet werden, und eine Hysteresekurve angelegt. Dazu müssen zuerst die Werte der Feldstärke (H) ermittelt werden. Diese folgen aus dem Zusammenhang:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} - \frac{d}{\mu_0 \cdot l} \cdot B$$

Die zur Berechnung von H notwendigen Größen sind bekannt. Aus diesem Zusammenhang von H und B lässt sich die Hysteresekurve erstellen und graphisch darstellen:



Der Messfehler von B ist bekannt mit $\Delta B = 0,001 T$. Der Messfehler von H ist Wertabhängig und lässt sich über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung bestimmen:

$$\Delta H = \sqrt{\left(\frac{N}{L} \Delta I\right)^2 + \left(\left(\frac{NI}{L^2} - \frac{dB}{\mu_0 L^2}\right) \Delta L\right)^2 + \left(\frac{B}{\mu_0 L} \Delta l\right)^2 + \left(\frac{dl}{\mu_0 L} \Delta B\right)^2}$$

Auf der graphischen Darstellung lassen sich die Fehler (bei dieser Skalierung) nicht sinnvoll darstellen.

Im folgenden soll nun noch die Anfangs- und die maximale Permeabilität (μ_A und μ_{max}) bestimmt werden.

μ_A lässt sich aus der Steigung der ersten beiden (positiven) Punkte der Kennkurve bestimmen. Es gilt:

$$\mu_A = \alpha = \frac{y-b}{\Delta x} = \frac{y-b}{x_1-x_0} \quad \text{mit} \quad b = 0,0215 \text{ T (Schnittstelle mit } y\text{-Achse)}$$

$$y = 0,028 \text{ T (H-Wert zu } x_1), \quad x_1 = 44,967 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ (zweiter positiver } x\text{-Wert),}$$

$$x_0 = 6,901 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ (erster positiver } x\text{-Wert der Kennkurve)}$$

$$\Rightarrow \mu_A \approx 170,756 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$$

$$\text{Fehlerrechnung nach Gauß: } \Delta \mu_A = \sqrt{2 \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{-(y-\alpha)}{\Delta x^2} \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{y-\alpha}{\Delta x^2} \Delta x_0 \right)^2}$$

$$\text{mit } \Delta x_1 = 4,6 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ und } \Delta x_0 = 4,33 \frac{\text{A}}{\text{m}}, \quad \Delta y = 0,001 \text{ T} = \Delta b$$

$$\Rightarrow \Delta \mu_A = 46,82 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$$

Und damit gilt für μ_A in Einheiten von $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$:

$$\mu_A = (135,84 \pm 37,25) \mu_0$$

μ_{max} lässt sich über die Tangente zur Kennkurve bestimmen:

$$\mu_{max} = \alpha = \frac{y-b}{x} \quad \text{mit} \quad b = 0,0215 \text{ T}, \quad x = 448,286 \frac{\text{A}}{\text{m}}, \quad y = 0,295 \text{ T}$$

$$\Rightarrow \mu_{max} \approx 610,1016 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$$

$$\text{Fehlerrechnung nach Gauß: } \Delta \mu_{max} = \sqrt{\left(\left(\frac{y}{x^2} - \frac{\alpha}{x^2} \right) \Delta x \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{x} \Delta y \right)^2}$$

$$\text{mit } \Delta x = 25,24 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ und } \Delta y = \Delta b = 0,001 \text{ T:}$$

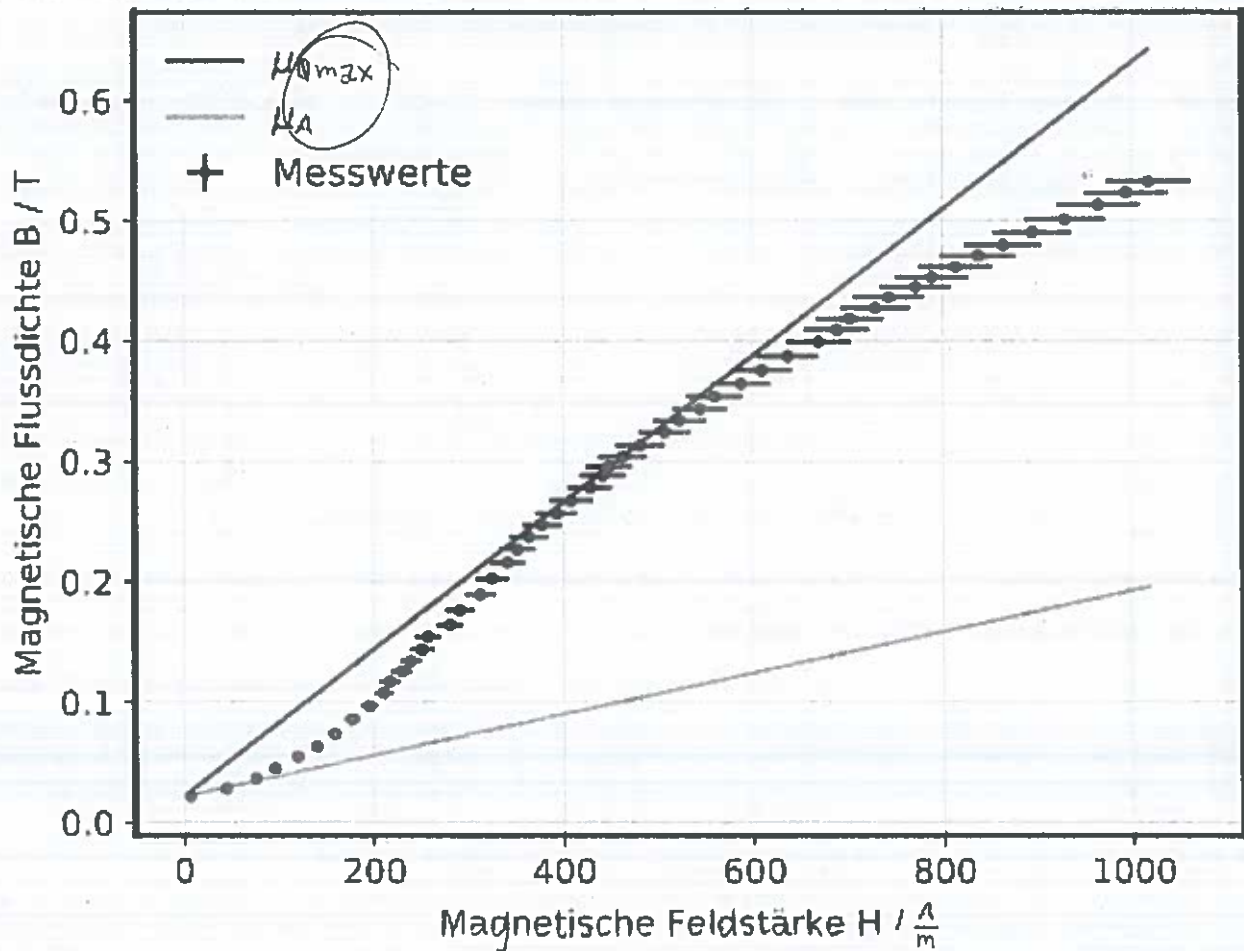
$$\Delta \mu_{max} = 34,641 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$$

Damit ergibt sich für μ_{max} in Einheiten von μ_0 :

$$\mu_{max} = (485,36 \pm 27,56) \mu_0$$

Zuletzt folgt eine graphische Darstellung von μ_A und μ_{max} an der Kennkurve:

Neukurve (Versuch 240)



Fazit

In diesem Versuch sollte das Verhalten von Ferromagneten unter Einfluss eines Magnetfeldes beobachtet und ausgewertet werden. Dabei wurde eine Hysteresekurve erstellt, die die Abhängigkeit von magnetischer Flussdichte und Feldstärke graphisch darstellt. Die Auswertung der Messdaten hat zu dem erwarteten Ergebnis geführt. An der Neukurve der Hysteresis konnten außerdem Anfangs- und maximale Permeabilität bestimmt werden, deren Werte ebenfalls im erwarteten Bereich liegen. ^{Welcher ist das?} Allgemein kann behauptet werden, dass die Versuchsdurchführung unproblematisch und erfolgreich war.

1) Werte physikalisch sinnvoll?

(kurz diskutieren)

Antwort 1) nachher!

Nachbesserung

- 1.) Der erwartete Wert für die Anfangs- bzw. maximale Permeabilität lässt sich für Ferromagnetische Stoffe auf $\mu \gg 1 \cdot \mu_0$ begrenzen (nach Wikipedia¹). Außerdem gelten speziell für Eisen Werte im Bereich von $(300 - 10000) \mu_0$ als realistisch (Quelle: Wikipedia¹). Die maximale Permeabilität fällt mit $\mu_{max} = (485,36 \pm 27,56) \mu_0$ in diesen Bereich, allerdings gilt dies nicht für die Anfangspermeabilität $\mu_A = (135,84 \pm 37,25) \mu_0$. Dies lässt sich wahrscheinlich auf den Einfluss von nicht ferromagnetischen Stoffen (bei denen die Permeabilität geringer ist) auf die Messungen zurückführen, da oftmals Literaturwerte auf idealen Umständen basieren.

Bestanden



¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische_Permeabilität.

