

Hinweis

Das vorliegende Protokoll wurde im Rahmen der jeweiligen Lehrveranstaltung an der Universität Bonn erstellt. Sofern im oberen Teil der ersten Seite oder auf der unten angegebenen Webseite nicht anders vermerkt, wurde dieses Protokoll von mir, Marvin Zanke, alleine angefertigt und eingereicht. Bei allem in einer anderen Farbe als dem üblichen Blau handelt es sich in der Regel um Korrekturen von mir oder des Tutors. Für mehr Informationen und meine gesamten Unterlagen, siehe:

<https://www.physics-and-stuff.com/>

Ich erhebe keinen Anspruch auf Richtigkeit und Vollständigkeit des vorliegenden Protokolls! Dies gilt ebenso für obengenannte Korrekturen.

Dieses Werk von [Marvin Zanke](#) ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung – Nicht-kommerziell – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](#).

18.11.2015 Versuch 240: Hysterese der Magnetisierung von Eisen

In diesem Versuch geht es um das Verhalten von ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld und die Möglichkeiten zur Messung von B -Feldern. Mit diesem Wissen soll dann das H -Feld mittels dem gemessenen B -Feld und der Kenntnis über den geflossenen Strom ermittelt werden.

Größen, Begriffe, Formeln, Schaltungen

Magnetischer Flussdichte \vec{B} : $\int \vec{B} d\vec{A} = \Phi$ (magnetischer Fluss)

Hängt mit der magnetischen Feldstärke über $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ zusammen, bloß dann im Fall von dazwischenliegenden magnetisierbaren Stoffen diese Magnetisierung mit in \vec{B} eingerechnet, also: $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{H} \mu_0 = \mu_0 \mu_r \vec{H}$

Magnetische Feldstärke \vec{H} : $\int \vec{H} ds = I$ Durch einen Stromfluß wird ein Magnetfeld mit obiger Feldstärke induziert. Dabei ist diese Größe unabhängig von äußeren Einflüssen.

Magnetischer Fluss Φ : $\int \vec{B} d\vec{A} = \Phi_B^A$ die Flussdichte integriert über eine Fläche wobei A keine geschlossene Fläche sein darf, sonst $\Phi_B^A = 0$

Magnetisierung: Verbindet \vec{B} und \vec{H} : $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$, bedeutet sozusagen die Stärke der Fähigkeit sich magnetisieren zu lassen bei äußeren Einflüssen durch Magnetfeld und konstantem \vec{H} .

Suszeptibilität: dimensionslos; Magnetisierbarkeit in einem äußeren Magnetfeld: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

Diamagnetismus: Magnetfeld im Inneren wirkt abschwächend auf äußeres Magnetfeld. ($\mu_r < 1$, heißt dass \vec{B} kleiner wird).

Aus energetische Gründen wollen Diamagnete deshalb in Richtung schwächerer Feldstärken wandern.

Die erzeugten magnetischen Dipole sind dem äußeren Feld entgegen gerichtet.

Paramagnetismus: Inneres Magnetfeld verstärkt das äußere Feld.

d.h. $\mu_r > 1$ also wird \vec{B} größer. Sie bewegen sich von selbst in Bereiche höherer Feldstärke.

„Elementarmagnete“ (Spins der Elektronen) werden in Richtung des Feldes ausgerichtet, dabei sind ungepaarte Elektronen wichtig. Nach Abschalten des äußeren Feldes verschwindet die Magnetisierung (thermische Bewegung)

Ferromagnetismus: Inneres Magnetfeld verstärkt äußeres Feld.

Merkmale $\mu_r \gg 1$. Bleibt nach Abschalten erhalten.

„Elementarmagnete“ werden durch äußeres Feld ausgerichtet

Neutrone: \vec{B} -Feld ~~von~~ eines Stoffes bei der ersten Magnetisierung mit \vec{H} -Feld, also ohne Restmagnetisierung.

Hystereseschleife: Bei Abschalten bleibt bei Ferromagneten

eine Restmagnetisierung (Ausrichtung). Bei entgegengesetzlicher

Anlegung eines \vec{H} -Feldes geht das \vec{B} -Feld auf

0 zurück und dann wieder auf den negativen

Wert des Sättigungswertes. Es bleibt wieder

eine Restmagnetisierung und man kann erneut ein

positives Feld anlegen um alles umzukehren.

Sättigungsfeld: Bei Erhöhung von H erreicht B ein Maximum. H_s ist die Feldstärke bei der dies passiert.

Remanenzfeld: Das Feld B_R , das bei Abschalten von H zurück bleibt.

Koerzitivfeld: Die nötige Feldstärke H_k um den Magneten zu Entmagnetisieren.

magnetisch weich/hart: weiche: leicht zu Magnetisieren,

schmale Hystereseschleife

hart: sehr hohe Koerzitivfeldstärken. Hoher Widerstand gegen Magnetisierung. Umagnetisierung sehr schwer, breite Hystereseschleife.

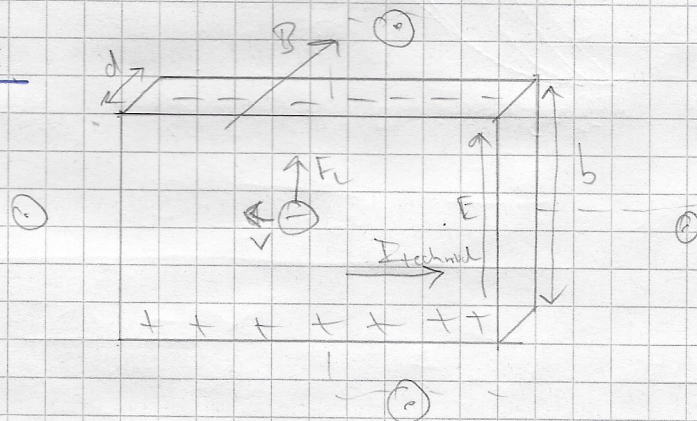
Permeabilität: $\mu = \frac{B}{H}$: Durchlässigkeit einer Materie für magnetische Felder. Vakuum: $\mu_0 = \mu = \text{Konst.}$

Kraft auf bew. Ladungen im M.feld: $F_L = q \cdot v \cdot B$ Lorentzkraft

Hall-Effekt: Aufgebauke (gegen-) Spannung entgegengerichtet gleich groß wie Lorentzkraft \Rightarrow Bleibend gleich

$$U_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot d} = A_H \cdot \frac{I}{d} \cdot B, \quad A_H = \frac{1}{n \cdot q} \text{ Materialconst.}$$

Hallsender:

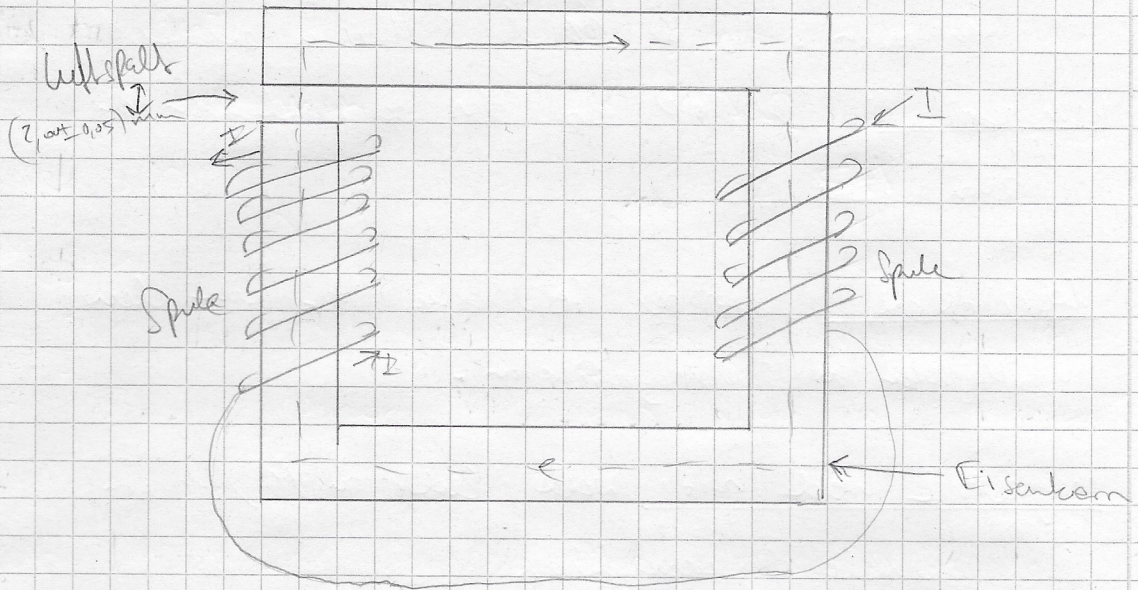


Tesla, Gauss, Oersted: Magnetische Flussdichte in Tesla gemessen. $1 T = 1 \frac{Vs}{m^2}$

Gauss: $1 Gs = 0,1 mT$

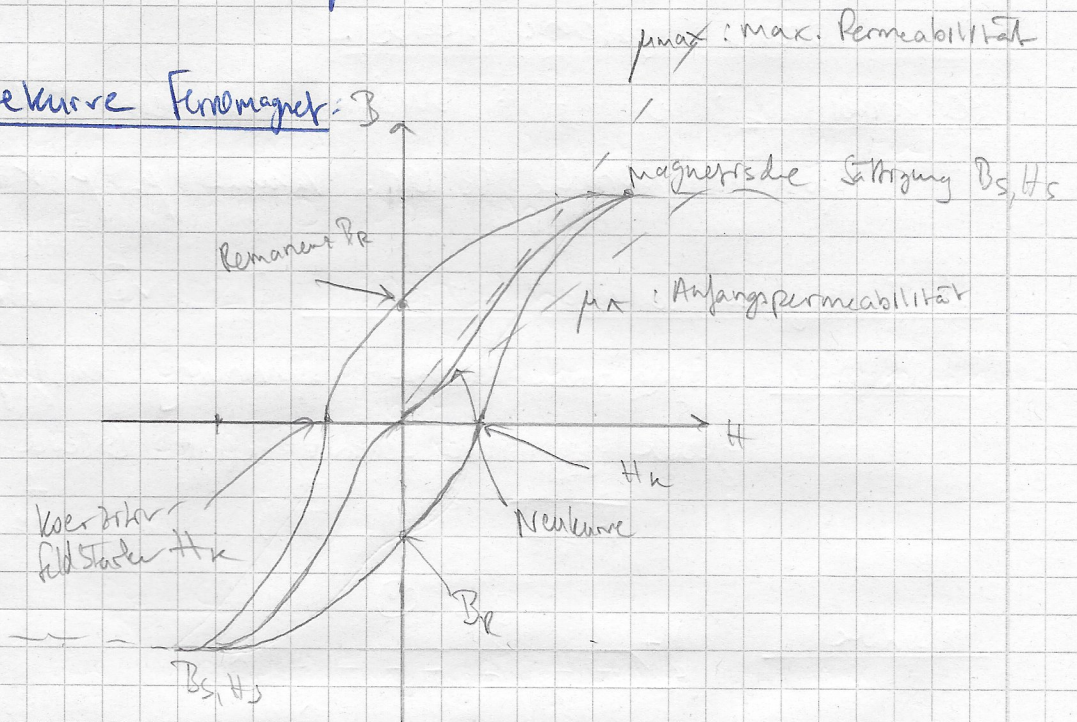
Oersted: $1 Oe = \frac{1000}{4\pi} \frac{A}{m} \approx 79,577 \frac{A}{m}$

Eisenkern mit Spulen

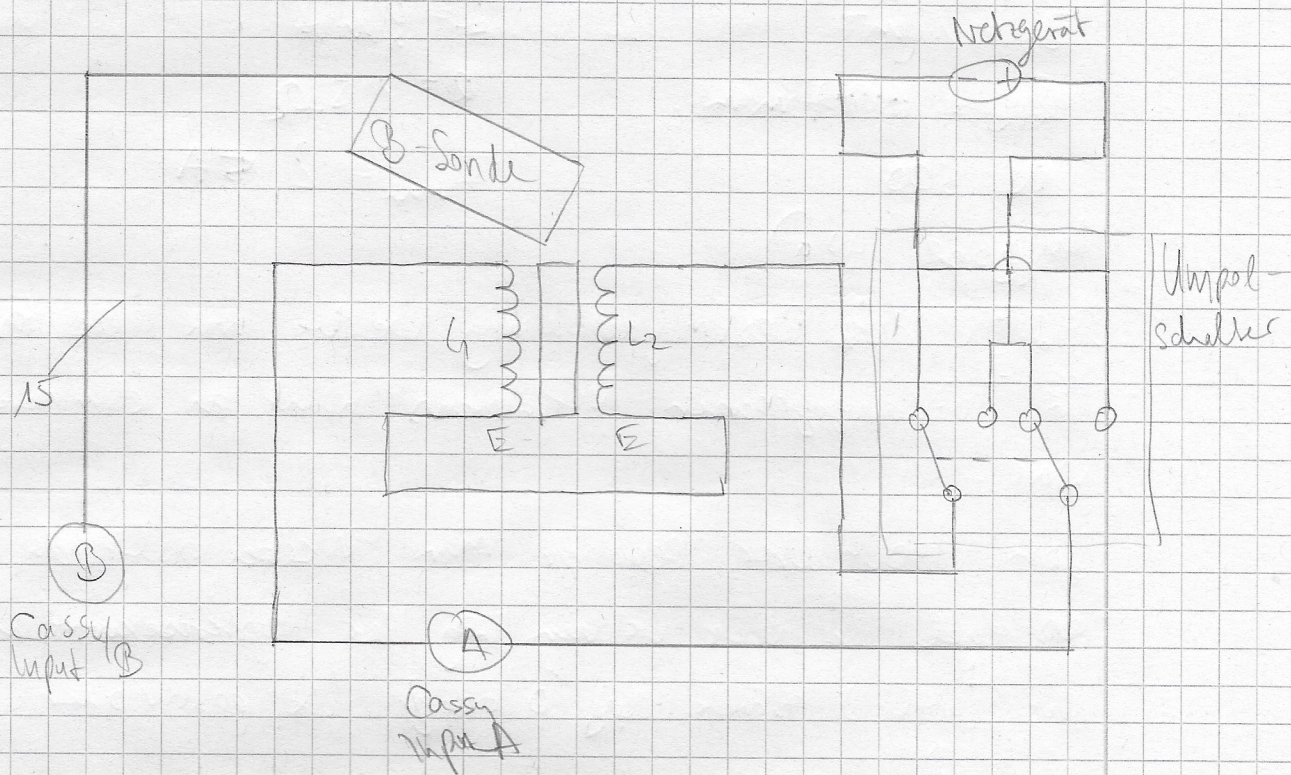


$$H_{Fe} = \frac{N \cdot I}{l_{Fe}} - \frac{d}{\mu_0 \cdot l_{Fe}} \cdot B_{Fe}$$

Hysteresekurve Ferrimagnet: B



Versuchsaufbau und Durchführung



Zu Beginn des Versuchs muss man den Eis Kern entmagnetisieren. Dafür werden die Spulen an einem Regeltransformator mit 0-260V betrieben und die Stromstärke kurz von 0 A bis 4 A hochgestellt und drückt wieder auf 0 A zurück. Kontrollmessung!

Danach misst man mit der oberen Schaltung das B -Feld im Luftspalt in Abhängigkeit von I . D.h. man misst die Messwerte bis I_{max} und dann die Hysteresekurve. Dabei darf das Magnetfeld nicht größer als 1 T und die Ströme nicht größer als 3 A werden.

Aus B und I wird dann H bestimmt. Danach wird B gegen H in ein Diagramm aufgetragen, woraus man μ_A und μ_{max} bestimmt.

Messung / Auswertung

$$B_0 = 12 \text{ mT}$$

$$L = 9 \text{ mH}$$

$$l_{Fe} = 477 \text{ mm}$$

$$R = 7,5 \Omega$$

$$N = 500$$

$$I_{\max} = 2,5 \text{ A}$$

Aufgabe 240 a)

B_0 ist die Restmagnetisierung, welche mit Hilfe des in a) angegebenen Verfahrens nicht zu „eliminieren“ war.

Den Umschalter benötigt man hierbei nicht, da es egal ist über welchem Weg der Hysteresekurve man das B -Feld zurück auf 0 bringt (x positiv oder negativ).

Des Weiteren verwenden wir folgende (Mess-)größen:

$$l_{Fe} = (0,477 \pm 0,0004) \text{ m}$$

$$d = (0,002 \pm 0,00005) \text{ m}$$

$$N = 1000 \text{ (da wir 2 Spulen à 500 Windungen benutzen)}$$

$$\mu_0 = 1,256637 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

Aufgabe 240 b / c

Wie in der Voraussetzung geteilt wurde gilt hier:

$$H_{Fe} = \frac{N \cdot I}{l_{Fe}} - \frac{d}{\mu_0 \cdot l_{Fe}} \cdot B_{Fe}$$

$$\Rightarrow \Delta H_{Fe} = \sqrt{\left(\frac{N}{l_{Fe}} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{N \cdot I - \frac{d B_{Fe}}{\mu_0}}{l_{Fe}^2} \Delta l_{Fe}\right)^2 + \left(\frac{B_{Fe}}{\mu_0 \cdot l_{Fe}} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{d}{\mu_0 \cdot l_{Fe}} \Delta B_{Fe}\right)^2}$$

außerdem schätzen wir ab: $\Delta I = 2\% I$

$$\Delta B = 5\% B$$

Und übernehmen alle Werte inklusive Fehler in meine Tabelle.

Anhand der Tabelle plottet man nun B gegen H auf (die Messwerte), wobei man die x-Achse in $\frac{A}{m}$ skaliert und die y-Achse in T.

Auf dem ersten Bild scheint die Kurve eine schöne Form zu haben, die Messwerte also gut genommen zu sein. In einem zweiten Plot trägt man die verbundenen Messwerte, dafür aber ohne Fehlerbalken auf.

Anhand von diesem Graphen kann man nun μ_A als Steigung im Nullpunkt und μ_{max} als Steigung der Tangente durch Nullpunkt an die Newtonkurve ablesen. Wir nehmen hierbei in x einen Ablesefehler von $25 \frac{A}{m}$ und in y einen Fehler von $0,01 T$ auf Grund der großen Skalierung an.

Damit gilt:

$$\mu_A = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \Rightarrow \Delta \mu_A = \sqrt{\left(\frac{\Delta y_2}{x_2 - x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y_1}{x_2 - x_1}\right)^2 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)^2} \Delta x_1\right)^2}$$

$$\mu_A = \frac{0,24 - 0}{800 - 0} = 3 \cdot 10^{-4} \frac{Tm}{A} = \left[\frac{Nms}{A^2 s m} \right] = \left[\frac{N}{A^2} \right]$$

In Einheiten von μ_0 : $\mu_A = 238,73 \mu_0$

Für μ_{max} folgt dann analog:

$$\mu_{max} = \frac{0,36 - 0}{600 - 0} = 6 \cdot 10^{-4} \frac{N}{A^2}$$

Und wieder in Einheiten von μ_0 : $\mu_{max} = 477,465 \mu_0$

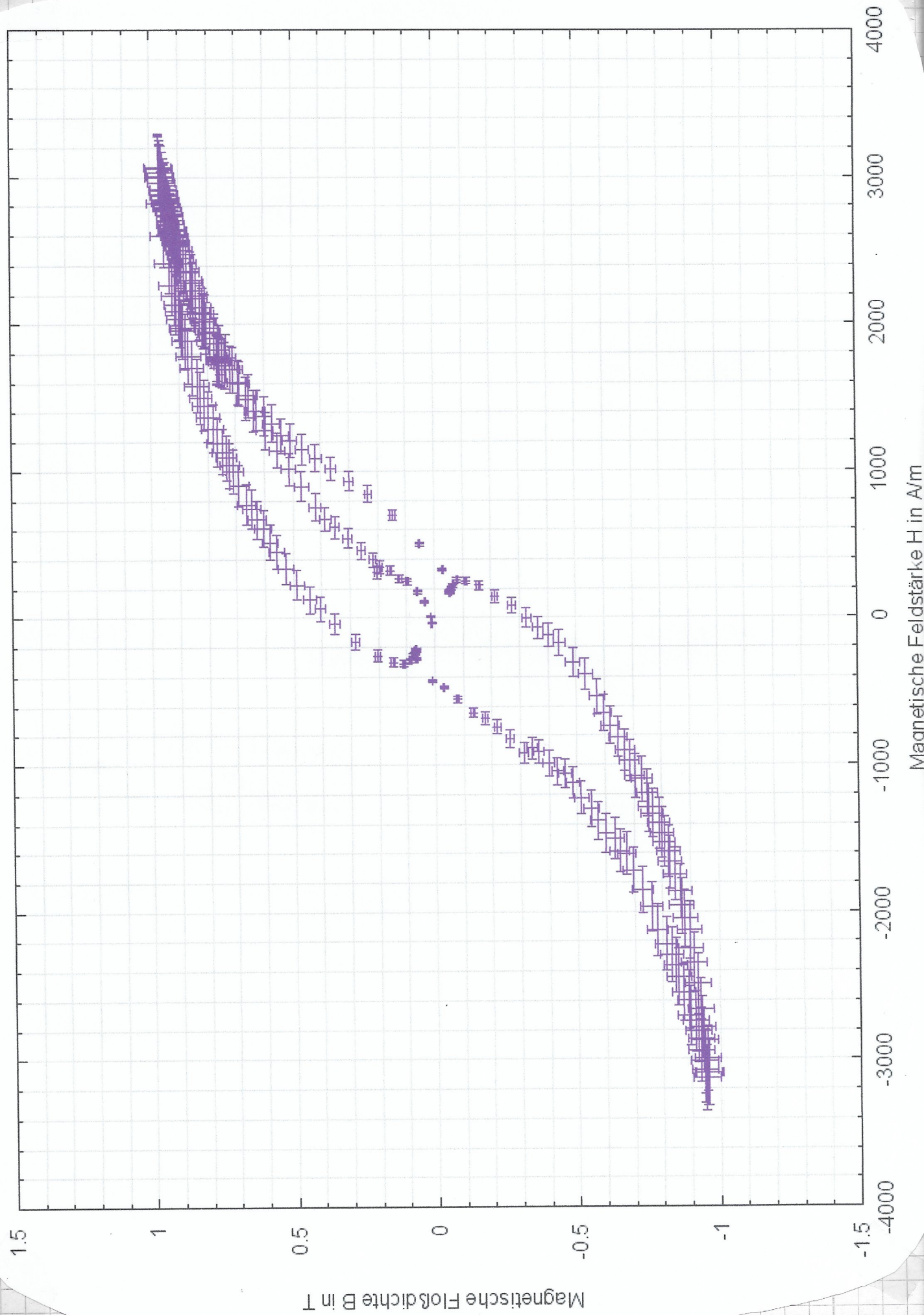
Die Fehler in μ_A und μ_{max} haben wir an dieser Stelle weggelassen, da sie uns nicht interessieren und außerdem immens hoch werden.

Die Tabelle soll dabei nur ausschnittsweise dargestellt sein
 da die ganze Tabelle den Rahmen sprengen würde und von
 kleiner Nutzen wäre.

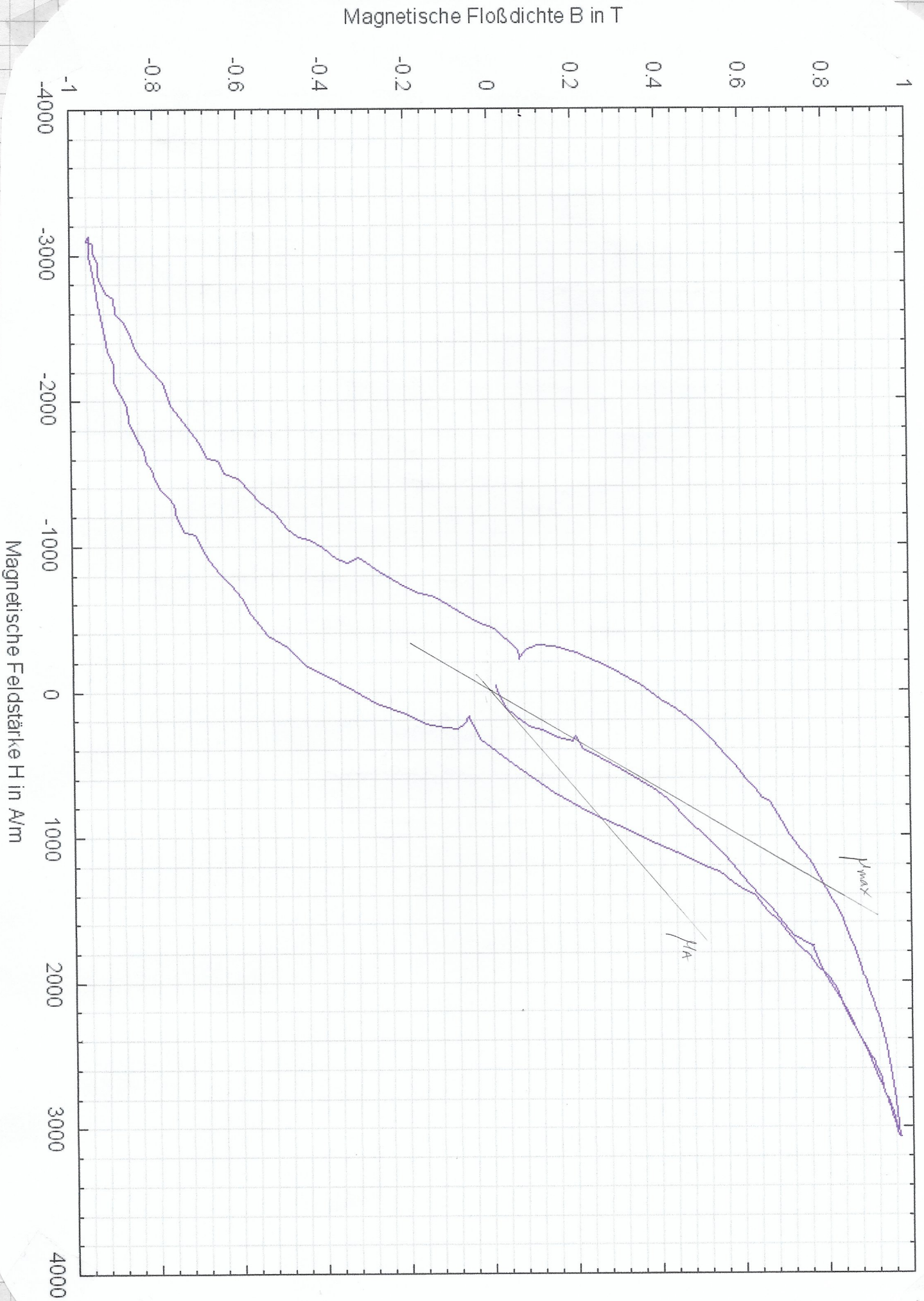
Stromstärke I in A	ΔI in A	Magn. Flußdichte B in mT	Magn. Flußdichte B2 in T	ΔB in T	Magn. Feldstärke H in A/m	ΔH in A/m
-0.0015	-0.00003	11	0.011	0.00055	-39.84813435	2.052752315
0	0	11.5	0.0115	0.000575	-38.37182027	2.145049964
0.0015	0.00003	11	0.011	0.00055	-33.55882617	2.052752315
0	0	11	0.011	0.00055	-36.70348026	2.051786922
0	0	11	0.011	0.00055	-36.70348026	2.051786922
-0.0015	-0.00003	11.5	0.0115	0.000575	-41.51647436	2.145973401
-0.0015	-0.00003	11	0.011	0.00055	-39.84813435	2.052752315
0.0015	0.00003	11	0.011	0.00055	-33.55882617	2.052752315
0	0	11	0.011	0.00055	-36.70348026	2.051786922
0	0	11.5	0.0115	0.000575	-38.37182027	2.145049964
-0.0015	-0.00003	11	0.011	0.00055	-39.84813435	2.052752315
0.0015	0.00003	11	0.011	0.00055	-33.55882617	2.052752315
-0.0015	-0.00003	11.5	0.0115	0.000575	-41.51647436	2.145973401
0.0015	0.00003	11	0.011	0.00055	-33.55882617	2.052752315
0	0	11	0.011	0.00055	-36.70348026	2.051786922
0	0	11	0.011	0.00055	-36.70348026	2.051786922
0	0	11	0.011	0.00055	-36.70348026	2.051786922
0.0255	0.00051	14	0.014	0.0007	6.745599169	2.822124861
0.1095	0.00219	35	0.035	0.00175	112.7759476	7.983501991
0.183	0.00366	61.5	0.0615	0.003075	178.4419773	13.80469925
0.27	0.0054	95.5	0.0955	0.004775	247.3847936	21.11152171
0.324	0.00648	122.5	0.1225	0.006125	270.5019802	26.58893101
0.4065	0.00813	158	0.158	0.0079	325.0058142	34.05226105
0.474	0.00948	193.5	0.1935	0.009675	348.0631073	41.21127001
0.468	0.00936	201	0.201	0.01005	310.4593908	42.32441095
0.537	0.01074	218.5	0.2185	0.010925	396.7215784	46.57141225
0.6315	0.01263	259.5	0.2595	0.012975	458.030905	55.18348451
0.747	0.01494	306.5	0.3065	0.015325	543.3453087	65.20085237
0.855	0.01712	352.5	0.3525	0.017625	619.417776	74.93367965

0.9345	0.01869	385.5	0.3855	0.019275	672.8293478	81.90484437
1.032	0.02064	422	0.422	0.0211	755.4430427	89.84162479
1.173	0.02346	468.5	0.4685	0.023425	895.8849059	100.298205
1.3005	0.02601	513	0.513	0.02565	1014.698242	110.1577662
1.4295	0.02859	555.5	0.5555	0.027775	1143.329593	119.728402
1.56	0.0312	597.5	0.5975	0.029875	1276.773938	129.2547384
1.6875	0.03375	636.5	0.6365	0.031825	1413.939014	138.240313
1.7715	0.03543	665.5	0.6655	0.033275	1493.275922	144.6919496
1.8705	0.03741	694.5	0.6945	0.034725	1604.059372	151.4692631
1.956	0.03912	721	0.721	0.03605	1694.882634	157.5569269
1.9965	0.03993	738.5	0.7385	0.036925	1721.396394	161.2288048
2.019	0.04038	748.5	0.7485	0.037425	1735.199405	163.3131904
2.034	0.04068	755	0.755	0.03775	1744.957526	164.6762827
2.043	0.04086	758.5	0.7585	0.037925	1752.14707	165.4303486
2.0475	0.04095	761	0.761	0.03805	1753.239332	165.9270425
2.0505	0.04101	762	0.762	0.0381	1756.191961	166.1518061
2.0535	0.04107	763	0.763	0.03815	1759.144589	166.3765705
2.0565	0.04113	763.5	0.7635	0.038175	1763.765557	166.5215681
2.055	0.0411	764	0.764	0.0382	1758.952563	166.5687361
2.055	0.0411	764	0.764	0.0382	1758.952563	166.5687361
2.0565	0.04113	764.5	0.7645	0.038225	1760.428877	166.6811171
2.0565	0.04113	764.5	0.7645	0.038225	1760.428877	166.6811171
2.058	0.04116	764.5	0.7645	0.038225	1763.573531	166.7137185
2.0565	0.04113	765	0.765	0.03825	1758.760537	166.7609126
2.058	0.04116	764.5	0.7645	0.038225	1763.573531	166.7137185
2.0565	0.04113	764.5	0.7645	0.038225	1760.428877	166.6811171
2.0565	0.04113	764.5	0.7645	0.038225	1760.428877	166.6811171
2.0595	0.04119	764.5	0.7645	0.038225	1766.718185	166.7463372
2.0595	0.04119	764.5	0.7645	0.038225	1766.718185	166.7463372
2.0565	0.04113	764.5	0.7645	0.038225	1760.428877	166.6811171

Hysteresekurve: B gegen H



Hysteresekurve: B gegen H



Unsere Graphen sind absolut keine "Fleischerhaken", die Messwerte liefern plausible Ergebnisse.

Eine Sache hätte man besser machen können, indem man die Skaleneinteilung im Omyplot anders gewählt hätte, sodass man die Fehler geringer hätte abschätzen können und dadurch annahmbarere Werte für μ_{Fe} und μ_{Mn} rausbekommen hätte. Da es in unserem Versuch aber bloß um eine grobe Einschätzung bzw. Messung der Größenordnung (Werte von μ_{Fe} und μ_{Mn} ging und mit diesen Werten nicht weitergerechnet wurde, reicht es, sich im Hinterkopf zu behalten, dass die Werte fehlerbehaftet sind.

Der Literaturwert für Eisen Permeabilitätszahlen liegt laut Wikipedia bei $300 \dots - 10.000 \mu_{\text{r}}$.

Das heißt wir liegen mit $\mu_{\text{Fe}} = \mu_{\text{OFe}} = 238 \mu_{\text{r}}$
und $\mu_{\text{Mn}} = 477 \mu_{\text{r}}$

gut in den Grenzen dieses Wertebereichs.

Der Versuch scheint ein voller Erfolg!