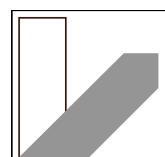


SS2010

PPA2

Transformer

Markus Sesselmann - Dominik Sieder



it's CREATIVE SCHOOL.

26

D

**kariert
mit Rand**

Protokollheft Versuch Tra

Markus Sesselmann, Dominik Lieder

Gruppe 33

www.Paperzone.de

DIN A4, 80g Papier aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff, **32 Blatt**

Versuch Magnetische Hysterese - Transformator

Teilnehmer: Dominik Lieder, Markus Lenzelmann

Datum: 11. 06. 2010

Titel des Versuchs: Magnetische Hysterese - Transformator

Gruppe: 33

Versuchsort: Am Fenster

Gliederung:

- | | |
|----------------------------|---------------|
| 1) Einleitung | S. 2 |
| 2) Fragen zur Vorbereitung | S. 3 - S. 13 |
| 3) Versuchsaufbau | S. 14 - S. 16 |
| 4) Messprotokoll | S. 17 - S. 24 |
| 5) Auswertung | S. 25 - S. 36 |
| 6) Zusammenfassung | S. 37 |

1) Einleitung

Magnetfelder sind diejenigen Felder, die Kräfte auf magnetische Dipole oder ^{und} stromdurchflossene Leiter ausüben. Hierbei wird Materie im magnetischen Feld magnetisiert. Dabei unterscheidet man dia-, para- und ferromagnetische Materialien. Auf die Eigenschaften dieser Materialien wird in den Fragen zur Vorbereitung eingegangen. Technische Anwendungen des Ferromagnetismus finden sich zum Beispiel in Permanent- oder Elektromagneten.

Die Ziele in unserem Versuch sind einerseits das Verhalten eines Ferromagneten im Magnetfeld zu bestimmen und die Hysteresekurve zu messen. Andererseits soll eine Analyse eines realen, widerstandsbeladenen, mit Verbraucher beladenen, Transformatoys gemacht werden.

2) Fragen zur Vorbereitung

2.1 Begriffserklärung

- Diamagnetisch nennt man Materialien, die die Tendenz haben, aus einem Magnetfeld herauszuwandern, bzw. bei denen die Dichte der Feldlinien eines extern angelegten Magnetfeldes in einer Probe abnimmt.

Der Ursprung des Diamagnetismus liegt der Lenzschen Regel zufolge am Magnetfeld das in jedem Atom/Molekül ein Dipolmoment induziert, das das Magnetfeld kennt. Dies liegt in der Größenordnung $\chi = 10^{-5}$. Dieser Effekt tritt in allen Materialien auf, wird jedoch in para- oder ferromagnetischen Materialien von anderen größeren Effekten überdeckt.

Diamagnetische Materialien sind nahezu temperaturunabhängig, ihre magnetische Suszeptibilität $\chi_m < 0$ und die relative Permeabilität dementsprechend

$$\mu_r < 1. \quad \text{Zusammstag } \chi, \chi_m, \mu_r$$

✓

- Als paramagnetisch bezeichnet man Substanzen, welche eine positive magnetische Suszeptibilität besitzen, d.h. $\chi_m > 0$. Somit folgt $\mu_r > 1$. Was? Paramagnetische Materialien magnetisieren sich in einem externen Magnetfeld so, dass sie das Magnetfeld in ihrem Inneren effektiv verstärkt.
Ursache des paramagnetischen Verhaltens liegt in der Ausrichtung der mikroskopischen magnetischen Momente eines Stoffes in einem Magnetfeld. Nach

Nachtrag: Curie-Gesetz: $\chi_m = \frac{C}{T}$
 mit $C = \mu_0 n \frac{\mu^2}{3k_B}$ mit μ_0 : magn. Feldkonstante
 n : Teilchendichte
 k_B : Boltzmann-Konstante

der Hundschlen Regel verteilen sich die Elektronen so auf die Niveaus einer freien Schale, dass der Gesamtspin maximal wird. Die mikroskopischen magnetischen ^{Momente} sind normalerweise statisch verteilt, richten sich im Magnetfeld aber so aus, dass es verstärkt wird. Jedoch wird eine solche Ausrichtung nach Abschalten des Magnetfeldes durch thermische Fluktuationen sofort wieder zerstört.

Bei der Temperaturabhängigkeit von paramagnetischen Materialien unterscheidet man zwei Fälle. Zuerst gibt es den Pauli-Paramagnetismus in paramagnetischen Materialien. Die magnetische Suszeptibilität χ_m ist aufgrund des freien Elektronengases der Leitungselektronen temperaturabhängig. Andererseits existiert der Langevin-Paramagnetismus, wonach χ nach dem Curie-Gesetz indirekt proportional zur absoluten Temperatur ist. Wie lautet das Curie-Gesetz?

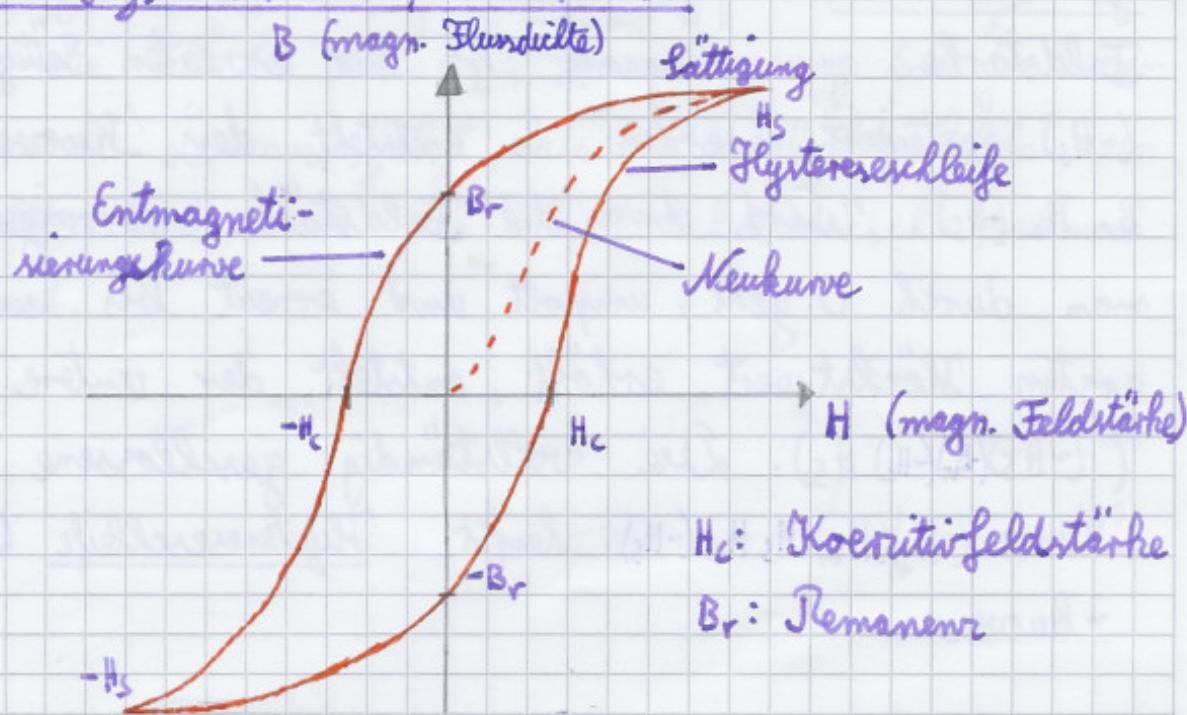
- Ferromagnetismus ist die Ursache dafür, dass Körper aus einigen wenigen Stoffen, wie z.B. Eisen, Permanentmagneten magnetisiert werden können, d.h. eine deutlich erkennbare Magnetisierung dauerhaft annehmen. Ferromagnetische Materialien magnetisieren sich in einem externen Magnetfeld so, dass sie das Magnetfeld in ihrem Inneren erheblich verstärken. Ursprünglich handelt es sich beim Ferromagnetismus um ein kollektives Phänomen von Festkörpern. Es kommt von Katern aus zu sogenannten Weiß'schen Bereichen, welche in der Größenordnung $0,01\text{ }\mu\text{m} - 1\text{ }\mu\text{m}$ ^{einget.}

liegen. In diesem Bereichen sind die magnetischen Momente parallel ausgerichtet (vgl. statische Verteilung beim Paramagnetismus). Grund dafür ist die Bandstruktur der Energieniveaus.

Die magnetische Ordnung von ferromagnetischen Materialien wird bei hohen Temperaturen aufgebrochen, die Ferromagneten sind dann nur noch paramagnetisch. Die Temperatur, ab der die ferromagnetische Ordnung verschwindet, wird als Curie-Temperatur berechnet, welche für Eisen $769^{\circ}\text{C} = 1042\text{ K}$ beträgt. Die Suszeptibilität χ ist dabei direkt proportional zu $\frac{1}{T - T_c}$, wobei T_c die Curie-Temperatur ist.

Ferromagnetische Werkstoffe weisen eine hohe Permeabilität $\mu \gg 1$ auf. Somit ist $\chi_m \gg 1$. Dadurch werden die magnetischen Feldlinien gut im Vergleich zum umgebenden Material geleitet. 0.105

2.2 Hysteresekurve, Keukurve



Magnetische Hysterese tritt bei ferromagnetischen Stoffen wie Eisen, Kobalt und Nickel auf. Der Hysteresevorgang lässt sich gut am Verlauf einer Hysteresekurve verdeutlichen. In dieser Kurve wird die magnetische Flussdichte B in einem ferromagnetischen Stoff über der Stärke eines den Stoff umgebenden Magnetfeldes H aufgetragen. Zu Beginn einer Magnetisierung sind sowohl die Magnetisierung als auch die Feldstärke des Magnetfeldes Null. Wird jetzt H erhöht, steigt B nicht linear an, bis es ein Maximum H_s erreicht. Es ist die Sättigungsfeldstärke erreicht. Dieser Vorgang entspricht der Kurve $0H_s$, die auch Aufkurve genannt wird. Wird H nun wieder auf Null gesenkt, geht B nicht auf Null zurück, sondern nur bis zur sogenannten remanenten Induktion B_r , kurz Remanenz B_r . Dies entspricht dem Betrag von $0B_r$. Um den Stoff wieder vollständig zu entmagnetisieren, muss ein dem zur Magnetisierung verwendeten Feld H_s entgegengesetztes Magnetfeld mit der Stoerritätsfeldstärke H_c aufgebaut werden. Diese magnetisch ^{warum?} Feldstärke muss langsam bis zur erneuten Sättigung ($-H_s$) gesteigert werden. Es entsteht der Kurvenzug $B_r H_c (-H_s)$. Wird dann die Feldstärke verringert, man durch 0 geht, umpolt und erneut bis zum ersten Höchstwert erhöht, entsteht der untere linie $(-H_s)(B_r)(-H_c) H_s$. Die vollständig geschlossene Kurve $(-H_s)(-H_c) H_s H_c (-H_s)$ heißt Hystereseelipse bzw. -kurve.

0,5 10,5

⑥

2.3 Hysteresekurve

Die Hysteresekurve beschreibt die Abhängigkeit zwischen umgebenden Magnetfeld H und dem resultierenden B -Feld innerhalb einer Materie (s. Aufgabe 2). Wichtig ist hierbei, dass die Fläche innerhalb der Hystereseschleife ein Maß für die Energiedichte beim Umpolen ist. Dies bedeutet, dass bei vorgegebenem Volumen der Materie die verbrauchte Energie nur von dieser Fläche abhängt.

Bei dem Einsatz von Permanentmagneten besteht der Wunsch nach hoher Koerzitülfeldstärke H_c und hoher Remanenz B_r . Je nach Anwendung wird mehr die eine oder die andere Kenngröße wichtig. Ein großes H_c bedeutet eine hohe Beständigkeit gegen äußere Felder. B_r sollte je nach Verwendung des Magneten möglichst groß sein. Somit ist klar, dass die Hysteresekurve sehr breit und die Fläche sehr groß ist.

Für den Transformator gilt, dass ein großer Fluss $\Phi = B \cdot A$ durch ein großes B erzielt wird. Jedoch ist die Fläche klein, d.h. es wird wenig Energie verbraucht. Daraus folgt, dass H_c möglichst klein sein sollte und somit die Hysteresekurve sehr schmal wird.

0,5 10,5

2.4 Idealer Transformator

$$\tilde{U}_1 = (R_1 + i\omega L_1) \tilde{I}_1 + i\omega L_{12} \tilde{I}_2 \quad (7)$$

$$\tilde{U}_2 = R \tilde{I}_2 = (R_2 + i\omega L_2) \tilde{I}_2 + i\omega L_{12} \tilde{I}_1 \quad (8)$$

idealer Transformator : $R_1 = R_2 = 0$

a) · Leerlauf: $R = \infty \Rightarrow \tilde{I}_2 = 0$

$$\Rightarrow (7) \quad \tilde{U}_1 = i\omega L_1 \tilde{I}_1 \Rightarrow |\tilde{U}_1| = \omega L_1 \underbrace{|i \operatorname{Re}(\tilde{I}_1) - i \operatorname{Im}(\tilde{I}_1)|}_{= |\tilde{I}_1|}$$

$$(8) \quad \tilde{U}_2 = i\omega L_{12} \tilde{I}_1$$

$$\Rightarrow |\tilde{U}_2| = \omega L_{12} |\tilde{I}_1| \quad (\text{I})$$

$$|\tilde{U}_2| = \omega L_{12} |\tilde{I}_1| \quad (\text{II})$$

$$(\text{II}) : (\text{I}) : \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{L_{12}}{L_1} = \frac{N_1 \cdot N_2}{N_1^2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$L_1 \sim N_1^2$
 $L_{12} \sim N_1 \cdot N_2$

$$\Rightarrow \boxed{\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{N_2}{N_1}} \quad \checkmark$$

I_1 Blindstrom \Rightarrow Blindleistung wieviel?

• Für $R \neq \infty$

$$\Rightarrow (7) \quad \tilde{U}_1 = i\omega L_1 \tilde{I}_1 + i\omega L_{12} \tilde{I}_2$$

$$(8) \quad \tilde{U}_2 = i\omega L_{12} \tilde{I}_1 + i\omega L_2 \tilde{I}_2$$

$$\Rightarrow |\tilde{U}_1| = \omega |L_1 (i \operatorname{Re}(\tilde{I}_1) - i \operatorname{Im}(\tilde{I}_1)) + L_{12} (i \operatorname{Re}(\tilde{I}_2) - i \operatorname{Im}(\tilde{I}_2))|$$

$$\underbrace{L_1 \sim N_1^2}_{L_{12} \sim N_1 \cdot N_2} \quad \underline{\underline{= \omega |N_1^2 (i \operatorname{Re} \tilde{I}_1 - i \operatorname{Im} \tilde{I}_1) + N_1 N_2 (i \operatorname{Re} \tilde{I}_2 - i \operatorname{Im} \tilde{I}_2)|}}$$

$$= \omega N_1 |N_1 (i \operatorname{Re} \tilde{I}_1 - i \operatorname{Im} \tilde{I}_1) + N_2 (i \operatorname{Re} \tilde{I}_2 - i \operatorname{Im} \tilde{I}_2)|$$

$$\begin{aligned}
 |\tilde{U}_2| &= w |L_2(i\operatorname{Re}(\tilde{I}_2) - i\operatorname{Im}(\tilde{I}_2)) + L_{12}(i\operatorname{Re}(\tilde{I}_1) - i\operatorname{Im}(\tilde{I}_1))| \\
 &= w |N_2^2(i\operatorname{Re}\tilde{I}_2 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_2) + N_1N_2(i\operatorname{Re}\tilde{I}_1 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_1)| \\
 &\stackrel{N_1 \sim N_2^2}{=} w N_2 |N_1(i\operatorname{Re}\tilde{I}_1 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_1) + N_2(i\operatorname{Re}\tilde{I}_2 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_2)|
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{w N_2 \cdot |N_1(i\operatorname{Re}\tilde{I}_1 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_1) + N_2(i\operatorname{Re}\tilde{I}_2 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_2)|}{w N_1 \cdot |N_1(i\operatorname{Re}\tilde{I}_1 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_1) + N_2(i\operatorname{Re}\tilde{I}_2 - i\operatorname{Im}\tilde{I}_2)|} = \frac{N_2}{N_1}$$

\Rightarrow Gl. (9) gilt auch unter Last, also für $R \neq \infty$ ✓ 0,910,5

b) Kurzschluss: $R=0 \Rightarrow \tilde{U}_2=0$

$$\Rightarrow (7) \quad \tilde{U}_1 = iwL_1\tilde{I}_1 + iwL_{12}\tilde{I}_2$$

$$(8) \quad 0 = iwL_2\tilde{I}_2 + iwL_{12}\tilde{I}_1$$

$$\Leftrightarrow iwL_2\tilde{I}_2 = -iwL_{12}\tilde{I}_1$$

$$\Leftrightarrow L_2\tilde{I}_2 = -L_{12}\tilde{I}_1$$

$$\Leftrightarrow \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} = -\frac{L_{12}}{L_2} = -\frac{N_1 \cdot N_2}{N_2^2} = -\frac{N_1}{N_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\left| \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} \right| = \frac{N_1}{N_2}} \quad \checkmark$$

0,910,5

2.5 Spannungsteiler

Nach der Maschenregel gilt:

- maximaler Strom durch die Spule bei "10" ✓
- minimaler Strom durch die Spule bei "0" ✓

Parallelschaltung von Spule und 0 bis 10 Widerständen \bar{R} .

Für Spannung verwende Potentiometerschaltung nach Formelsammlung „Physikalische Formeln und Tabellen“

⑨

Sei $R_1 = \bar{R}$ und $R_2 = 10 \bar{R}$

$$\Rightarrow U_{Spule} = U_0 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_0 \cdot \frac{10}{11} \frac{\bar{R}}{\bar{R}}$$

$\approx 10,5$

$$\Rightarrow U_{Spule} = U_0 \frac{10}{11} \quad \text{für minimals } I$$

\neq minimals $I \cdot V = ?$

2.6 Integrierglied



Aus der Beziehung $C = \frac{Q(t)}{U_c(t)}$ $\begin{cases} Q(t) \text{ mit Ladung} \\ \text{auf Kondensator} \end{cases}$

$$\text{folgt: } U_c(t) = \frac{Q(t)}{C}$$

$$\text{Weiterhin: } I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \rightarrow Q(\tau) = \int_0^\tau I(t) dt$$

$$\Rightarrow U_c(\tau) = \frac{1}{C} \int_0^\tau I(t) dt = \frac{1}{C} \int_0^\tau \frac{U_i - U_c}{R} dt = \frac{1}{RC} \int_0^\tau (U_i - U_c) dt$$

$$\approx \frac{1}{RC} \int_0^\tau U_i dt \quad \text{für } U_i \gg U_c .$$

Aus $U_c \ll U_i$ folgt:

$$\frac{I}{wC} \ll IR \Leftrightarrow 1 \ll RCw = RC \frac{2\pi}{\tau} \Leftrightarrow \tau \ll RC$$

D.h. die Gleichung $U_c \approx \frac{1}{RC} \int_0^\tau U_i dt$ gilt für
hinsichtlich groÙe Zeithorizonten. im Vergleich zu was?

Mit $R = 15 \cdot 10^6 \Omega$ und $C = 20 \cdot 10^{-6} F$ folgt für die Zeitkonstante:

$$\underline{RC = 300 s} \quad \checkmark$$

0/10,5

2.7 Transformator unter Ohmischer Last; Begriffserklärung
In der Primärspule ist ein rein induktiver Widerstand

$$\Rightarrow \tan \varphi = -\omega L \rightarrow -\infty$$

$$\Rightarrow \underline{\varphi = -\frac{\pi}{2}} \quad \checkmark$$

Strom und Spannung sind nicht in Phase. In der Sekundärspule erfolgt Spannungsabfall über einen ohmschen Widerstand

$$\Rightarrow \underline{\varphi = 0} \quad \checkmark$$

Strom und Spannung sind in Phase.

Wirkleistung: Sie ist die elektrische Leistung, die für die Umwandlung in andere Leistungen (mechanisch, thermisch und chemisch) verfügbar ist. Sie wird in Watt angeben. Sind U, I konstante Größen, so gilt: $P = U \cdot I$

Ansonsten gilt: $P = \bar{P} = \bar{U} \cdot \bar{I} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_1} U(t) \cdot i(t) dt$

Blindleistung: Sie ist ein Begriff der Elektrotechnik. Im elektrischen Energieversorgungsnetz soll Energie zum Verbraucher übertragen werden. Im mit Wechselstrom betriebenen Netz fließt zusätzliche Energie, die hin- und herpendelt. Wie hoch diese Energie pro Zeit ist, wird durch die Blindleistung qualifiziert. Beim induktiven Widerstand gibt es einen sinusförmigen Wechsel im Stromkreis vom positiven

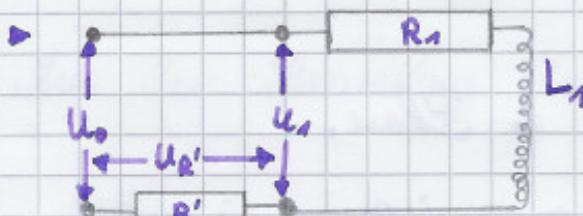
Feld zum negativen Feld. als Mittelwert ergibt sich 0.
=> „blinder Strom“

$$P=0$$

=> Blindleistung

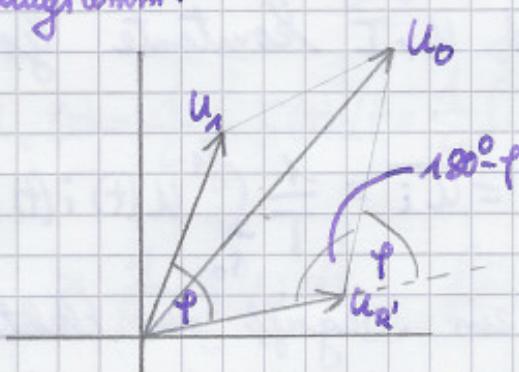
Scheinleistung: Sie ist die geometrische Summe aus Wirkleistung und Blindleistung, gleichzeitig das Produkt aus den Effektivwerten von Strom und Spannung.

$$S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = (P^2 + Q^2)^{1/2}$$



aufgrund der Spule sind U_R und U_R' um eine Phase φ verschoben:

Zeigerdiagramm:



Nach Kosinussatz gilt:

$$U_0^2 = U_R^2 + U_R'^2 - 2U_R \cdot U_R' \cos(180^\circ - \varphi) \\ = -2U_R \cdot U_R' \cos \varphi$$

$$\Rightarrow \cos \varphi = \frac{U_0^2 - U_R^2 - U_R'^2}{2 U_R \cdot U_R'}$$

- 1) Bei einem ohmschen Widerstand sind Strom und Spannung in Phase => $I_1 \parallel U_R'$
- 2) Bei einer Spule steht der Strom der Spannung hinterher => U_1 hat Vorspannung vor I_1
- 3) Mit komplexer Rechnung muss gelten: $\tilde{U}_0 = \tilde{U}_{R'} + \tilde{U}_1$
=> aus diesen 3 Punkten folgt das Zeiger - diagramm

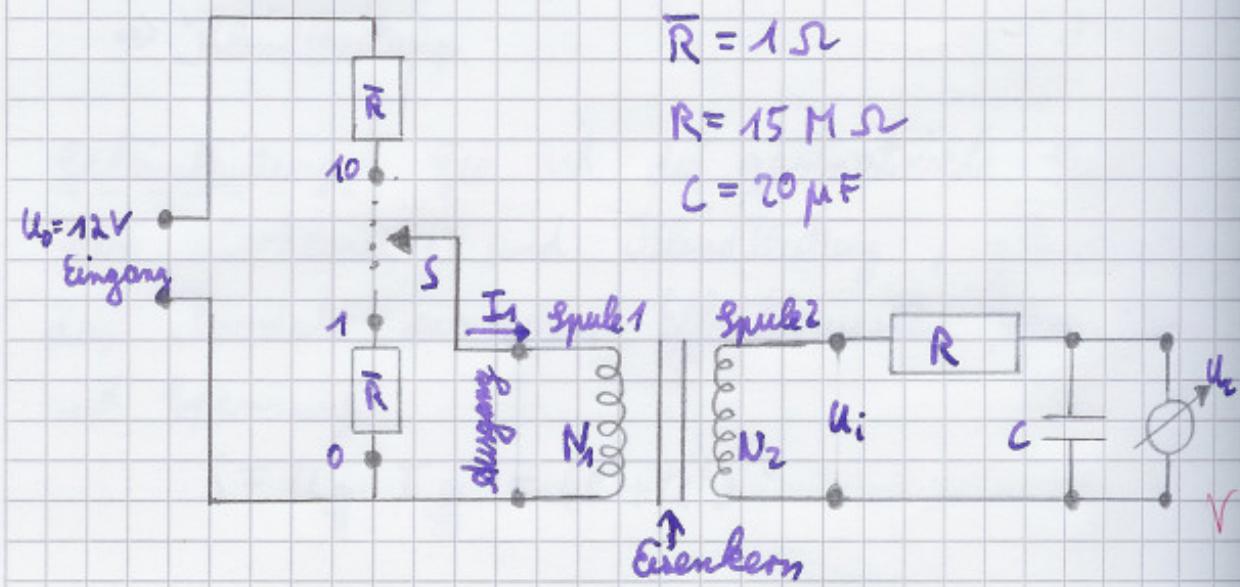
$$\Rightarrow \cos \varphi = \frac{U_0^2 - U_1^2 - U_R^2}{2 U_1 U_R} \quad \checkmark$$

0,5 P.F

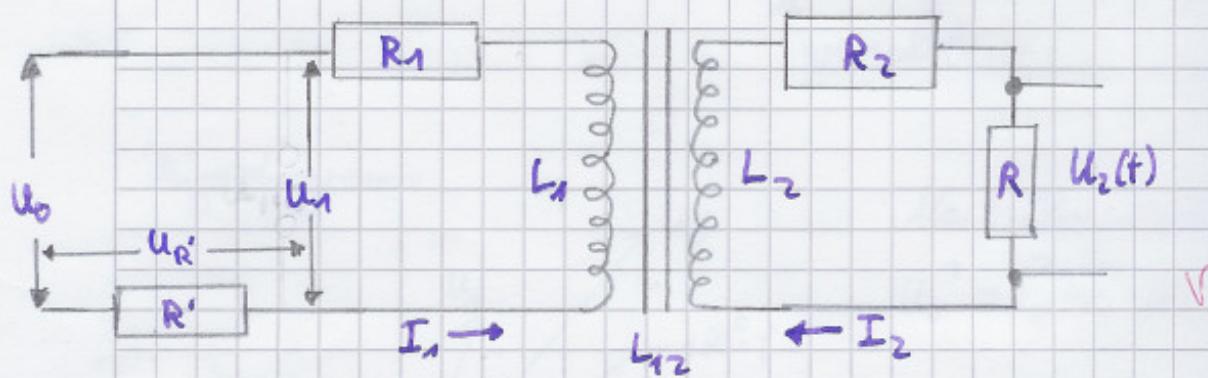
Phasenverschiebung zwischen U und I?

3) Versuchsaufbau

3.1 Messung der Hysteresekurve



3.2 Der reale Transformator



Technische Daten der Spulen:

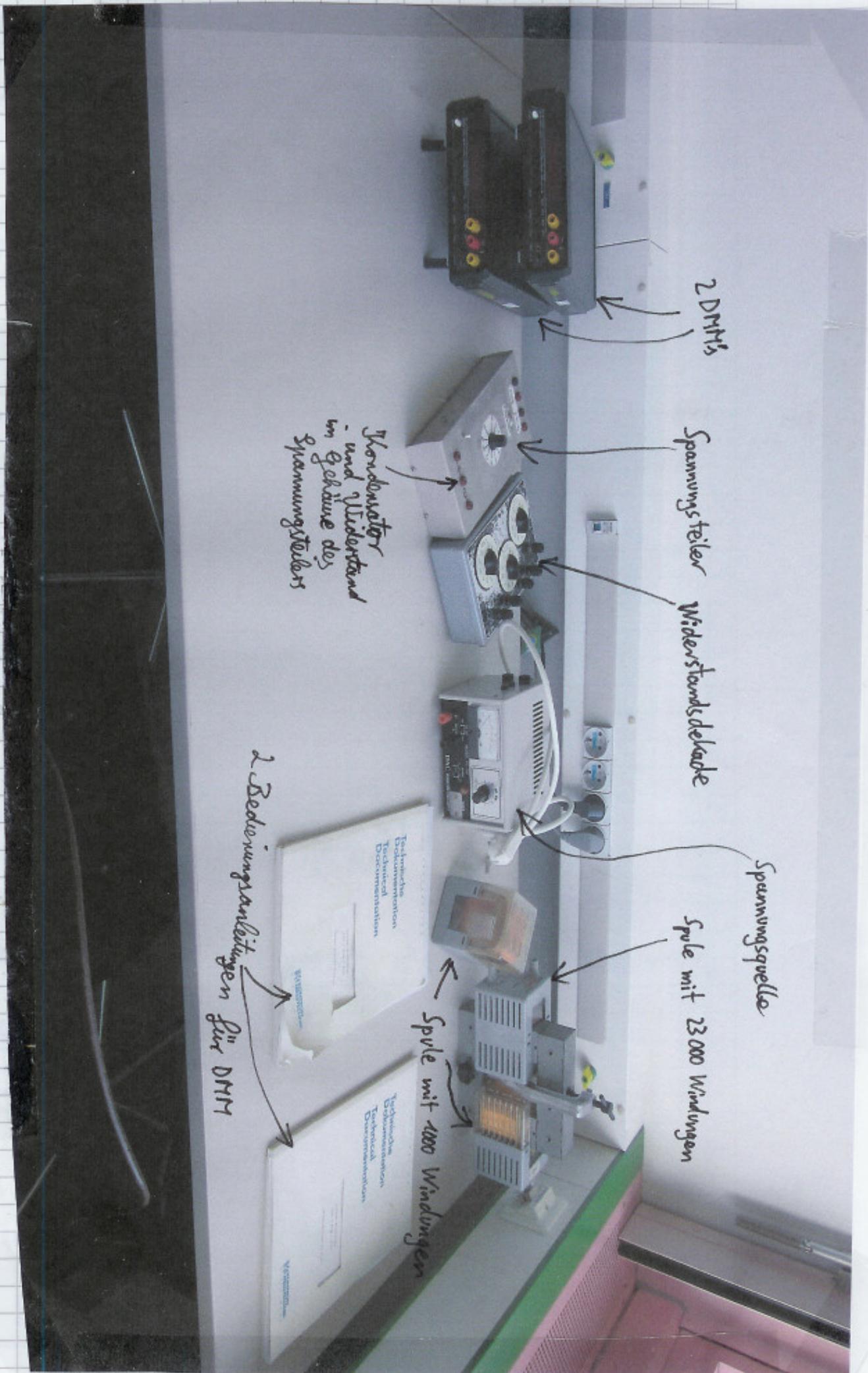
Spule 1: $N = 1000$; ca. $9,5 \Omega = R$

$L \approx 0,044 H$; max $1,25 A = I$

Spule 2: $N = 23000$; max $10000 V = R$

$L \approx 20 H$; max. $0,02 A = I$

Für $N = 500$ wird Spule 1 halbweit



4) Messprotokoll

4.1 Hysteresekurve von Trafoblech

Bei diesem Versuch werden zwei Spulen mit den Windungszahlen $N_1 = 1000$ und $N_2 = 23.000$ für den Transformator benutzt. Es wird eine Gleichspannung von 12V (gemessen 11,7V) angelegt.

4.1.1 Messung des Stroms durch Primärspule

Hierbei benutzen wir die Schaltung von 3.1, wobei zwischen Spule 1 und Spannungssteiler I ein- gebaut wird und der Stromkreislauf der Sekundärspule offen ist. Nun messen wir über den Digitalmultimeter den Strom durch die Primärspule drei mal.

Technische Daten: Gerät DMM 4121:

- Genauigkeit: $\pm (0,3\% \text{ v. M.} + 1 \text{ Digit})$

Einstellung DMM: 2000mA

Nachtrag: Einstellung DMM: 2000mA

1. Messreihe:

Schalterstellung S	10	9	8	7	6	5	4
Strom I in mA	620,29	586,14	549,23	509,42	464,72	402,03	329,17

S	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$I_{\text{in mA}}$	256,07	181,23	100,00	80,3	-86,05	-167,11	-241,07	-315,19	-387,20	-450,38

S	-7	-8	-9	-10
$I_{\text{in mA}}$	-435,28	-533,04	-569,87	-600,04

2. Messreihe:

5	10	9	8	7	6	5	4	3	2
I in mA	639,05	595,42	557,78	516,72	469,32	402,17	329,24	256,45	181,13

5	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8
I in mA	100,38	7,35	-85,02	-166,31	-240,83	-313,17	-356,67	-451,07	-496,53	-535,73

5	-9	-10
I in mA	-570,41	-602,01

3. Messreihe:

5	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2
I in mA	610,85	578,64	532,17	503,87	458,93	399,14	327,74	259,63	180,73	100,49	8,39	-85,30	-166,06

5	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
I in mA	-249,13	-313,57	-385,41	-444,02	-489,28	-527,44	-563,02	-594,17

4.1.2 Bestimmung der Hysteresekurve und Neukurve

Hysteresekurve:

Versuchsaufbau identisch mit 3.1.
 Ausgeland von Schalterstellung '10' mit dem
 Invertierungsenschalter in Stellung '+' wird der Strom
 in Stufen bis zur Stellung '0' erniedrigt, umgepolzt
 und weiter bis '-10' erniedrigt. Anschließend wird
 der Strom weiter von '-10' bis '10' durch Schalten
 und Umpolen erhöht.

Nun messen wir die Spannung U_C über den

Digitalmultimeter, welches wie in 3.1 eingebaut ist.
 Zu beachten ist, dass wir U_c im empfindlichsten
 Messbereich messen und dabei jeweils den Maximal-
 wert ablesen. Anschließend wird der Kondensator
 C kurzgeschlossen. Die Kurzschlussstaste wird erst
 kurz vor dem Umschalten von '5' wieder gelöst.
 Die Messung wird zweimal durchgeführt.

Technische Daten: Gerät DMM 4121:

- Genauigkeit: $\pm (0,05\% \text{ v. M.} + 1 \text{ Digit})$

Einstellung DMM: 200 Einheit?

Nachtrag: Einstellung DMM: 200 mV

1. Messreihe:

Schalterstellung S	10	9	8	7	6	5	4	3
Spannung U_c in mV	0,33	0,49	0,68	0,82	1,04	1,30	2,70	3,70

S	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
U_c in mV	5,48	9,89	37,93	150,00	32,00	11,83	6,91	5,00	3,15	2,65

S	-8	-9	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4
U_c in mV	1,50	1,30	0,90	-0,49	-0,58	-0,79	-1,05	-1,60	-2,60

S	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
U_c in mV	-3,73	-5,50	-10,00	-38,30	-152,79	-328,91	-13,00	-7,03	-5,00	-3,02	-2,00

S	8	9	10
U_c in mV	-1,15	-1,30	-0,96

2. Messreihe

S	10	9	8	7	6	5	4	3
$U_c \text{ in mV}$	0,04	0,46	0,71	0,80	1,05	1,75	2,84	3,81

S	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
$U_c \text{ in mV}$	5,54	10,08	37,88	151,52	33,03	12,00	7,02	5,03

S	-6	-7	-8	-9	-10	-9	-8	-7
$U_c \text{ in mV}$	3,13	2,08	1,60	1,24	1,11	-0,46	-0,56	-0,75

S	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
$U_c \text{ in mV}$	-1,10	-1,62	-2,66	-3,90	-5,50	-10,06	-38,32	-153,28	-33,00

S	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_c \text{ in mV}$	-12,03	-7,05	-4,35	-2,83	-2,00	-1,51	-1,43	-1,00

Kennkurve:

Versuchsaufbau identisch mit 3.1.

Vor der Messung wird der Eisenkern entmagnetisiert, indem der Strom ständig umgepolt wird und durch Zurückdrehen der Spannung am Kettengekett langsam zu 0 wird. Nun wird die Kennkurve von der Schalterstellung '0' bis '10' mit dem Invertierungs-Schalter in Stellung '+'. Hierbei wird der DMM von der Schaltung entfernt. Nein! wie soll ich dann messen?

Messung von U_c analog zur Hysteresekurve.

Technische Daten analog zur Hysteresekurve

1. Messreihe

Schalterstellung S	0	1	2	3	4	5
U_c in mV	0,03	80,06	29,87	19,45	6,40	4,80

S	6	7	8	9	10
U_c in mV	3,26	1,84	-1,47	1,20	0,93

2. Messreihe

Schalterstellung S	0	1	2	3	4	5	6
U_c in mV	0,05	-82,09	-30,94	-11,17	-6,73	-4,36	-3,12

S	7	8	9	10
U_c in mV	-2,02	-1,44	-1,21	-1,01

4.2 Der reale Transformator

Es wird die Schaltung nach 3.2 verwendet. Nun wird der Wirkungsgrad eines realen Transformatos als Funktion eines Lastwiderstandes gemessen. Im Transformator gilt $N_1=500$, $N_2=1000$. Es liegt Wechselspannung ^{an} an. Als Widerstand R' zur Messung der Phasenverschiebung werden die Widerstände der Spannungsteilerkaskade in Reihe verwendet. Als Lastwiderstand R im Sekundärkreis dient die Widerstandsdeckade. Es werden für verschiedene Widerstände R die Effektivwerte U_2 , I_2 , U_1 , I_1 , U_R und U_0 gemessen.

Wie groß ist R' ?

Nachtrag:

R' wird gemessen mit dem DMM

Einstellung des DMM auf: „200 Ω“

Schalterstellung off S auf 10:

Messwert: 10,29 Ω

<u>R in Ω</u>	$U_2 \text{ in V}$	$I_2 \text{ in mA}$	$U_1 \text{ in V}$	$I_1 \text{ in mA}$	$U_R \text{ in V}$	$U_0 \text{ in V}$
00	22,14	0,00	11,93	40,20	0,50	12,09
10k	22,09	2,20	11,88	41,57	0,50	12,08
5k	21,91	4,36	11,82	43,42	0,52	12,07
2k	21,36	10,59	11,67	50,71	0,61	12,06
1k	20,41	20,38	11,43	65,65	0,79	12,02
500	18,52	36,89	11,04	95,53	1,15	11,99
200	13,78	68,98	10,45	158,41	1,91	11,93
100	9,22	92,28	10,30	206,30	2,49	11,91
50	5,40	107,75	10,41	237,10	2,86	11,90
20	2,35	117,58	10,62	257,00	3,10	11,91
10	1,20	120,91	10,72	263,20	3,18	11,92
0	0,05	124,12	10,84	269,50	3,25	11,93

Einstellung auf
Bei DMM mindestens 200 mV für I und 200 kV für U möglich!

Technische Daten: Gerät DMM 4121:

- Wechselspannung: • Genaugkeit: Eingang > 10% v. Endwert
 - im Bereich: 45Hz - 10kHz: +/- (0,6% v.M. + 20 Digit)
- Wechselstrom: • Genaugigkeit: • Eingang 10% v. Endwert
 - +/- (1% v.M. + 20 Digit)

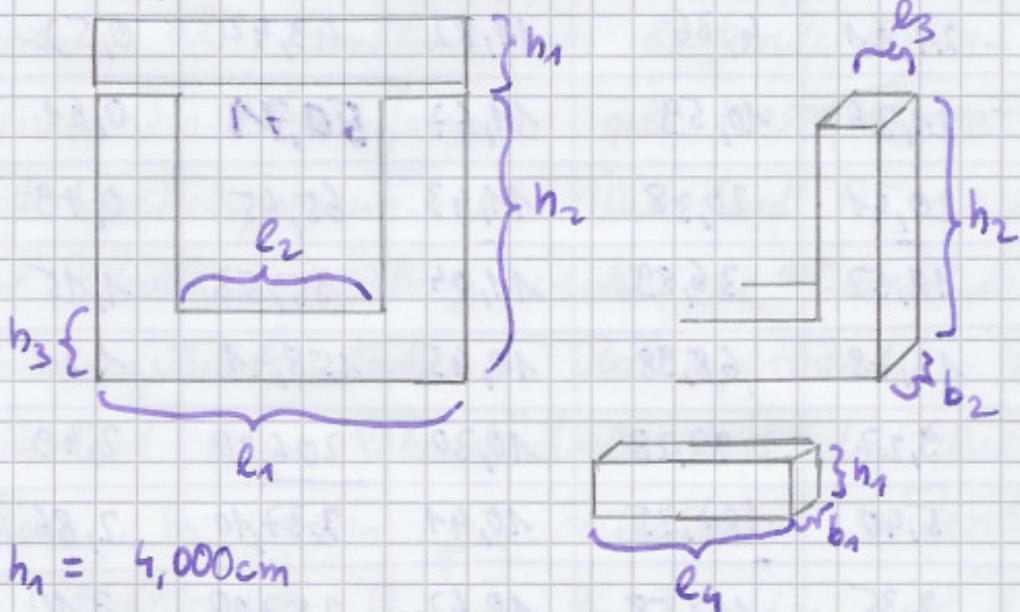
Bei dem Versuch haben wir mit 4 DMMs alle Spannungen gleichzeitig gemessen und dabei R verändert. Anschließend haben wir mit 2 DMMs die Ströme gleichzeitig gemessen und dabei R verändert. ✓

11.6.10 Uli Parry's Vorlesung

Nachtrag:

Messung des Eisenkerns via Messchieber:

Ableref Fehler: $s_{a_3} = 0,025 \text{ mm}$, system. Fehler: $s_x = 0,05 \text{ mm} + 1 \cdot 10^{-3} l$



$$h_1 = 4,000 \text{ cm}$$

$$h_2 = 13,020 \text{ cm}$$

$$h_3 = 4,000 \text{ cm}$$

$$l_2 = 6,940 \text{ cm}$$

$$l_3 = 4,000 \text{ cm}$$

$$b_1 = 3,830 \text{ cm}$$

$$b_2 = 3,830 \text{ cm}$$

Messung von l_4 über Stahlmaßstab:

Ableref Fehler: $s_{a_5} = 0,25 \text{ mm}$; system. Fehler: $s_x = 0,05 \text{ mm} + 5 \cdot 10^{-3} l$

$$l_4 = 14,940 \text{ cm}$$

$$l_1 = 14,940 \text{ cm}$$

5) Umlaufvermessung

5.1 Hysteresekurve von Trafoblech

Berechnung der gemessenen Messwerte:

- I_1 : I_1 wurde drei mal gemessen \Rightarrow Mittelwert

$$\underline{I_1 = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 I_{1,n}}$$

n: die „n-te“ Messreihe

Fehler zu I_1 : $\underline{u_{I_1} = 0,003 \cdot I_1 + 0,01 \text{ mA}}$

eingestellte Schaleneinheit

- ΔI_1 : $\underline{I_{1,nach} - I_{1,vor}}$
- nach: Schalterstellung danach jetzt
vor: Schalterstellung vorher

Fehler zu ΔI_1 : $\underline{u_{\Delta I_1} = \left[\left(\frac{\partial \Delta I_1}{\partial I_{1,nach}} \cdot u_{I_{1,nach}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta I_1}{\partial I_{1,vor}} \cdot u_{I_{1,vor}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} =$

$$= \left[\underline{u_{I_{1,nach}}^2 + u_{I_{1,vor}}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

- l : l ist die mittlere Länge des Eisenkerns

$$\begin{aligned} \underline{l} &= \frac{1}{2} (l_1 + l_2 + 2(h_1 + h_2) + 2l_3 + 2(h_2 - h_3)) \\ &= \frac{1}{2} (l_1 + 2l_2 + l_4 + 2h_1 + 4h_2 - 2h_3) = \underline{\frac{1}{2} l_1 + l_2 + \frac{1}{2} l_4 + h_1 + 2h_2 - h_3} \end{aligned}$$

Fehler zu l : $\underline{u_{\text{Mess}} = \sqrt{u_{a_M}^2 + u_{r_M}^2}} = u_{l_2} = u_{h_1} = u_{h_2} = u_{h_3}$

$$\underline{u_{\text{Stahl}} = \sqrt{u_{a_S}^2 + u_{r_S}^2}} = u_{e_1} = u_{e_4}$$

$$\Rightarrow \underline{u_l = \left[\frac{1}{4} u_{e_1}^2 + u_{e_2}^2 + \frac{1}{4} u_{e_3}^2 + u_{h_1}^2 + 4u_{h_2}^2 + u_{h_3}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

- $H = \underline{\frac{N_1 \cdot I_1}{l}}$ mit $N_1 = 1000$

Fehler zu H : $\frac{\partial H}{\partial I_1} = \frac{N_1}{l}; \quad \frac{\partial H}{\partial l} = \frac{0 - N_1 I_1}{l^2} = -\frac{N_1 I_1}{l^2}$

$$\Rightarrow u_H = \left[\frac{N_1^2}{e^2} u_{I_1}^2 + \frac{N_1^2 I_1^2}{e^2} u_e^2 \right]^{1/2}$$

• $\Delta H = H_{\text{nach}} - H_{\text{vor}}$

Fehler zu ΔH : $u_{\Delta H} = \left[u_{H_{\text{nach}}}^2 + u_{H_{\text{vor}}}^2 \right]^{1/2}$

• U_c wurde 2 mal gemessen \Rightarrow Mittelwert

$$U_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 U_{c,i}$$

Fehler zu U_c : $u_{U_c} = 0,0005 \cdot U_c + 0,01 \text{ V}$

\hookrightarrow eingestellte Skaleneinheit

• ~~$B = \mu_0 \cdot H$~~ mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

Fehler zu B : ~~$u_B = \left[\mu_0^2 u_H^2 \right]^{1/2} = \mu_0 \cdot u_H$~~

• ~~$\Delta B = B_{\text{nach}} - B_{\text{vor}}$~~

~~Fehler zu ΔB : $u_{\Delta B} = \left[u_{B_{\text{nach}}}^2 + u_{B_{\text{vor}}}^2 \right]^{1/2}$~~

• ~~$\mu_{\text{diff}} = \frac{dB}{dH} \approx \frac{\Delta B}{\Delta H}$~~

~~Fehler zu μ_{diff} : $u_{\mu_{\text{diff}}} = \left[\left(\frac{1}{\Delta H} u_{\Delta B} \right)^2 + \left(-\frac{\Delta B}{(\Delta H)^2} u_{\Delta H} \right)^2 \right]^{1/2}$~~

• ~~$\mu_{\text{diff}} = \frac{R \cdot C \cdot |u_{cl}| \cdot l}{N_1 \cdot N_2 \cdot A \cdot |\Delta I_{kl}|}$~~

mit $R = 15 \text{ M}\Omega = 15 \cdot 10^6 \text{ }\Omega$,
 $C = 20 \mu\text{F} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

$N_1 = 1000$

$N_2 = 23000$,
 $A = b_2 \cdot l_3 = 15,32 \text{ cm}^2$
 $= 0,01532 \text{ m}^2$

Fehler zu μ_{diff}

Berechnung für ℓ :

$$\ell = \frac{1}{2} \cdot 14,940 \text{ cm} + 6,940 \text{ cm} + \frac{1}{2} 14,940 \text{ cm} + 4,000 \text{ cm} + 2 \cdot 73,020 \text{ cm} - 4,000 \text{ cm} = \\ = \underline{47,920 \text{ cm}} \approx 0,48 \text{ m}$$

$$u_e = \left[\frac{1}{4} \cdot \frac{\partial u_{e_1}^2}{\partial t} + \frac{1}{4} u_{e_1}^2 + u_{e_2}^2 + u_{h_1}^2 + 4 u_{h_2}^2 + u_{h_3}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \\ = \left[\frac{1}{2} u_{e_1}^2 + u_{e_2}^2 + 4 \cdot u_{h_2}^2 + 2 \cdot u_{h_3}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ = \left[\frac{1}{2} \cdot (0,027937446136816 \text{ cm})^2 + (0,0062186522655637 \text{ cm})^2 + \right. \\ \left. + 4 \cdot (0,0067797643026878)^2 + 2 \cdot (0,0053506302187247)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ = \underline{0,02614580084832 \text{ cm}} \approx 0,026 \text{ cm}$$

Diagramm:

$$\underline{u_{\mu\text{diff}}} = \left[\left(\frac{\partial \mu_{\text{diff}}}{\partial I_{k1}} u_{I_{k1}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu_{\text{diff}}}{\partial R} u_R \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu_{\text{diff}}}{\partial A} u_A \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial \mu_{\text{diff}}}{\partial I_{h1}} u_{I_{h1}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \\ = \left[\left(\frac{R \cdot C \cdot \ell \cdot u_{I_{k1}}}{N_1 N_2 A | \Delta I_{k1} |} \right)^2 + \left(\frac{R \cdot C \cdot I_{k1} u_R}{N_1 N_2 A | \Delta I_{k1} |} \right)^2 + \left(\frac{-R C M_{k1} \cdot N_1 N_2 | \Delta I_{h1} | u_A}{N_1^2 N_2^2 A^2 | \Delta I_{h1}|^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{-M_{k1} R C \ell \cdot u_{I_{h1}}}{N_1 N_2 A | \Delta I_{k1}|^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{mit } u_A = \left[(l_3 u_{b_2})^2 + (b_2 \cdot u_{e_3})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \cancel{\text{mit } u_{I_{h1}} = \left[(l_3 u_{b_2})^2 + (b_2 \cdot u_{e_3})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$
$$= 0,000014370773883128215 \text{ m}^2$$
$$\approx 37,3 \text{ mm}^2$$

$$\bullet \Delta B: \quad \underline{\Delta B = \mu_{\text{diff}} \cdot \Delta H}$$

Fehler zu ΔB : $\underline{u_{\Delta B} = \left[(\Delta H \cdot u_{\mu_{\text{diff}}})^2 + (\mu_{\text{diff}} \cdot u_{\Delta H})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$

- B :
 - **Kennkurve:** B entsteht durch sukzessives Aufaddieren der ΔB (für jedes beliebige H)
 - **Hysteresekurve:** Für die erste Schalterstellung '0' wird das B der Schalterstellung '0' der Kennkurve übernommen. Für die nächsten Schalterstellungen wird auf B wieder ΔB addiert.

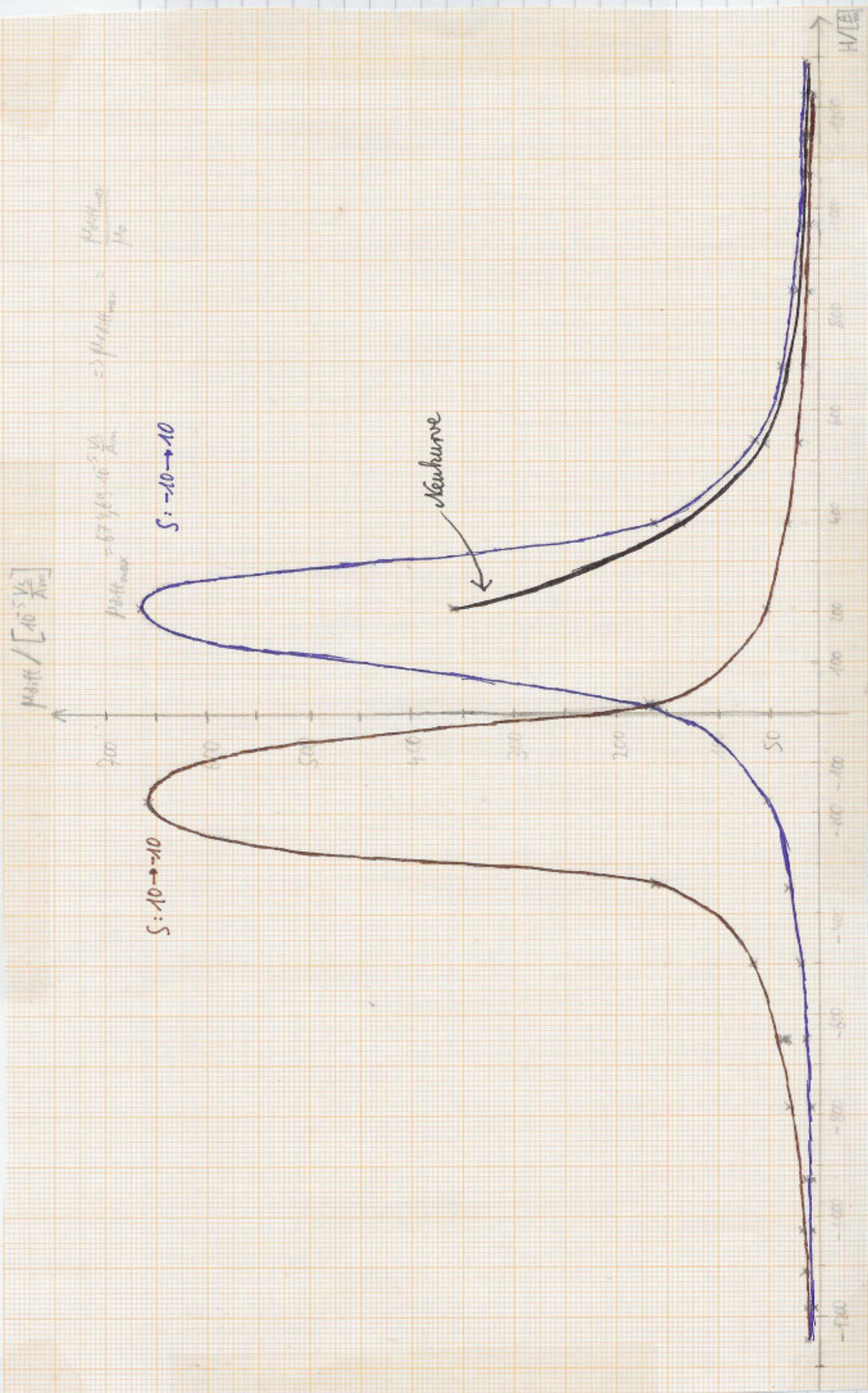
Tabelle für Kennkurve:

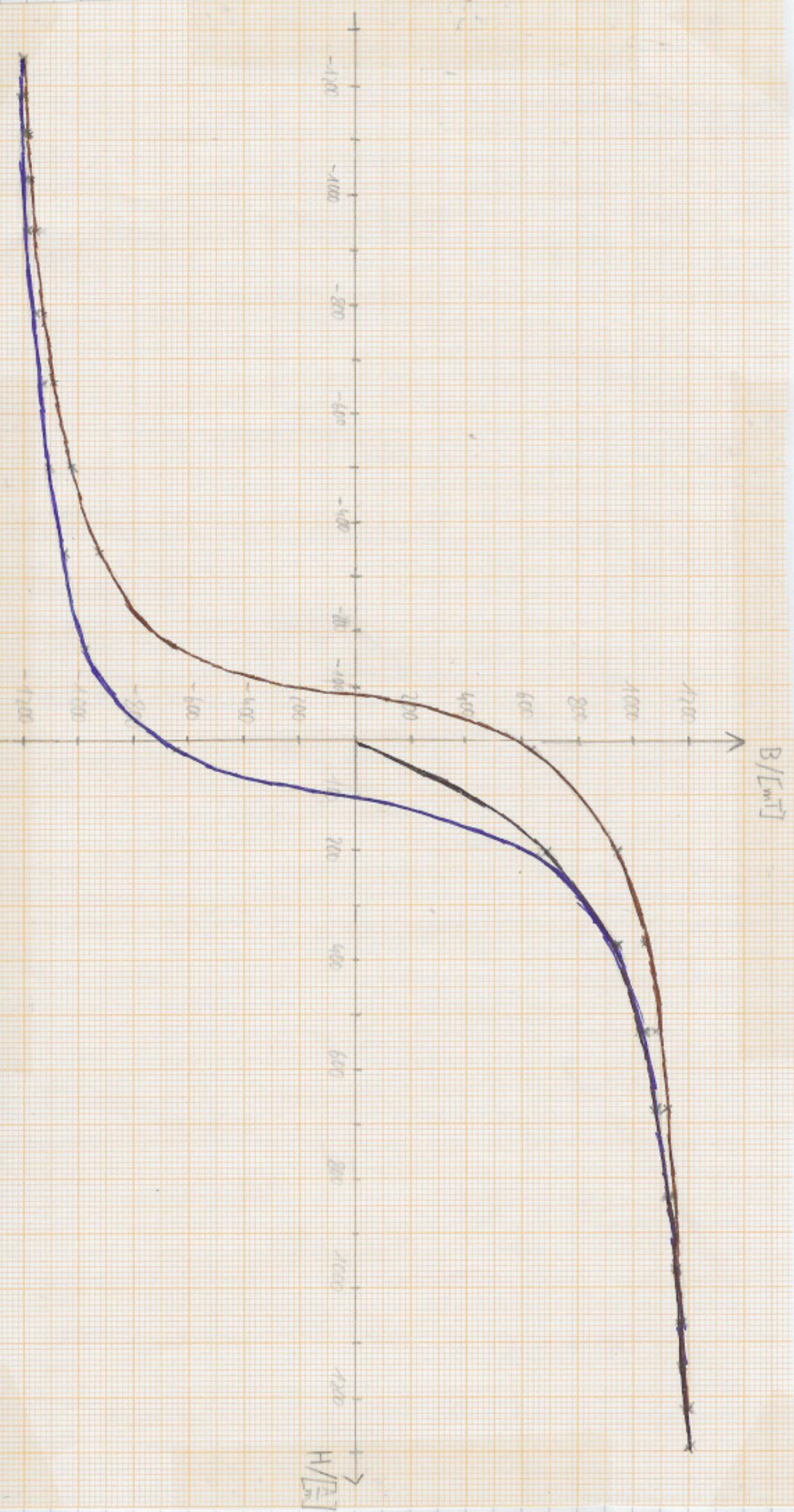
Schalterstellung S	I_1 in mA	ΔI_1 in mA	H in $\frac{A}{m}$	ΔH in $\frac{A}{m}$	U_C in mV	μ_{diff} in $10^{-5} \frac{Vs}{Am}$	ΔB in mT	B in mT
0	7,92	-	16,53	-	0,04	-	-	-
1	100,29	92,37	209,29	192,76	81,08	358,13	690,33	690,33
2	181,06	80,77	377,85	168,56	27,91	140,98	237,64	927,97
3	255,74	74,67	533,674	155,82	10,81	59,07	92,04	1020,01
4	328,72	72,98	685,97	152,30	6,57	36,73	55,94	1075,95
5	401,11	72,40	837,05	151,08	4,88	27,50	41,55	1117,50
6	464,32	63,21	968,96	131,91	3,19	20,59	27,16	1144,66
7	510,00	45,68	1064,28	95,32	1,98	17,68	16,85	1161,51
8	549,73	39,73	1147,18	82,90	1,46	14,99	12,43	1173,94
9	586,73	37,01	1224,40	77,22	1,21	13,34	10,30	1184,24
10	620,12	33,39	1294,08	69,68	0,97	11,85	8,26	1192,50

Tabelle für Hysteresekurve:

Schalterstellung S	I_1 in mA	ΔI_1 in mA	H in $\frac{A}{m}$	ΔH in $\frac{A}{m}$	U_C in mV	μ_{diff} in $10^{-5} \frac{Vs}{Am}$	ΔB in mT	B in mT
10	620,12	-	1294,08	-	0,19	-	-	1192,50
9	586,73	-33,39	1224,40	-69,68	0,48	5,87	-4,09	1188,41
8	549,73	-37,01	1147,18	-77,22	0,70	7,72	-5,96	1182,45
7	510,00	-39,73	1064,28	-82,90	0,81	8,32	-6,90	1175,55
6	464,32	-45,68	968,96	-95,32	1,05	9,38	-8,94	1166,61
5	401,11	-63,21	837,05	-131,91	1,83	11,81	-15,58	1151,03
4	328,72	-72,40	685,97	-151,08	2,77	15,61	-23,58	1127,45
3	255,74	-72,98	533,67	-152,30	3,76	21,02	-32,01	1095,44
2	181,06	-74,67	377,85	-155,82	5,51	30,11	-46,92	1048,52
1	100,29	-80,77	209,29	-168,56	9,99	50,46	-85,06	963,46
0	7,92	-92,37	16,53	-192,76	37,91	167,45	-322,78	640,68
-1	-85,47	-93,39	-178,36	-194,89	150,76	658,62	-1283,58	-642,90
-2	-166,49	-81,02	-347,44	-169,08	32,52	163,76	-276,89	-919,79
-3	-240,68	-74,18	-502,25	-154,81	11,92	65,56	-101,49	-1021,28
-4	-313,97	-73,30	-655,20	-152,95	6,97	38,80	-59,34	-1080,62
-5	-376,43	-62,45	-785,53	-130,33	5,02	32,80	-42,75	-1123,37
-6	-448,51	-72,08	-935,95	-150,42	3,14	17,77	-26,37	-1149,74
-7	-493,70	-45,19	-1030,26	-94,31	2,37	21,40	-20,18	-1169,92
-8	-532,09	-53,55	-1110,37	-80,11	1,56	11,89	-9,53	-1179,45
-9	-567,77	-35,68	-1184,82	-74,45	1,27	14,52	-10,81	-1190,26
-10	-598,74	-30,97	-1249,46	-64,64	1,01	13,31	-8,60	-1198,86
-9	-567,77	30,97	-1184,82	64,64	-0,48	6,32	4,09	-1194,77
-8	-532,09	35,68	-1110,37	74,45	-1,14	13,04	9,71	-1185,06
-7	-493,70	53,55	-1030,26	80,11	-0,77	5,87	4,70	-1180,36
-6	-448,51	45,19	-935,95	94,31	-1,08	9,75	9,20	-1171,16
-5	-376,43	72,08	-785,53	150,42	-1,61	9,11	13,70	-1157,46
-4	-313,97	62,45	-655,20	130,33	-2,63	17,18	22,39	-1135,07
-3	-240,68	73,30	-502,25	152,95	-3,85	21,43	32,78	-1102,29
-2	-166,49	74,18	-347,44	154,81	-5,5	30,25	46,83	-1055,46
-1	-85,47	81,02	-178,36	169,08	-10,03	50,51	85,40	-970,06
0	7,92	93,39	16,53	194,89	-38,31	167,36	326,17	-643,89
1	100,29	92,37	209,29	192,76	-152,75	674,69	1300,53	656,64
2	181,06	80,77	377,85	168,56	-32,95	166,44	280,55	937,19
3	255,74	74,67	533,674	155,82	-12,02	65,68	102,34	1039,53
4	328,72	72,98	685,97	152,30	-7,07	39,52	60,19	1099,72
5	401,11	72,40	837,05	151,08	-4,98	28,06	42,39	1142,11
6	464,32	63,21	968,96	131,91	-2,96	19,11	25,20	1167,31
7	510,00	45,68	1064,28	95,32	-2,00	17,86	17,02	1184,33
8	549,73	39,73	1147,18	82,90	-1,48	15,20	12,60	1196,93
9	586,73	37,01	1224,40	77,22	-1,37	15,01	11,59	1208,52
10	620,12	33,39	1294,08	69,68	-0,98	11,97	8,34	1216,86

Fehler darin auf Seite 34





Berechnung von $\mu_{\text{diff,max}}$:

$$\mu_{\text{diff,max}} = \frac{\mu_{\text{diff,max}}}{\mu_0} = 674,69 \cdot 10^5 \frac{V_A}{Am}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V_A}{Am}$$

$$\Rightarrow \underline{\mu_{\text{diff,max}} = 5369,012428}$$

Zusammenhang zwischen μ_{diff} (H) und B(H):

Im Allgemeinen beschreibt die Permeabilität μ_{diff} die Steigung $\frac{dB}{dH}$ von der magnetischen Flussdichte B. Also ist μ_{diff} die Ableitung von B nach H, d.h.

$$\mu_{\text{diff}} = \frac{dB}{dH}.$$

Graphische Integration:

Fläche von Hystereseschleife $\hat{=} H \cdot B$

$$[H \cdot B] = \frac{A}{m} \cdot \frac{V_A}{m^2} = \frac{E}{m} \checkmark$$

$$\Rightarrow H \cdot B \hat{=} \frac{E}{V} \quad \text{mit } E: \text{Energieverluste im Trafo} \\ V: \text{Volumen}$$

$$\Leftrightarrow E = H \cdot B \cdot V$$

$$\begin{aligned} V &= l_1 \cdot (h_1 + h_2) \cdot b_1 - l_2 \cdot l_2 \cdot (h_2 - h_3) = \\ &= 0,1456m \cdot 0,1702m \cdot 0,0383m - (0,0694m)^2 \cdot 0,0902m \\ &= \underline{0,000539452132 m^3} \end{aligned}$$

Abräkung der Kästchen 1mm auf 1mm:

$$1 \text{ Kästchen} \stackrel{!}{=} 20 \text{ mT} \cdot 10 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 0,2 \frac{\text{T}}{\text{m}^3}$$

Kästchen $\approx \underline{2135}$

$$\Rightarrow \text{Energiedichte} = 2135 \cdot 0,2 \frac{\text{T}}{\text{m}^3} = 427 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

$$\Rightarrow \text{Energieverlust} = 427 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \cdot 0,000539452132 \text{ m}^3 = \\ = \underline{0,23034606 \text{ J}} \approx 0,23 \text{ J} \checkmark$$

Fehler für Kurve:

Schalterstellung S	Fehler zu I_1 in mA	Fehler zu ΔI_1 in mA	Fehler zu H in $\frac{A}{m}$	Fehler zu ΔH in $\frac{A}{m}$	Fehler zu U_C in mV	Fehler zu μ_{diff} in $10^{-5} \frac{Vs}{Am}$	Fehler zu ΔB in 10^{-8} mT
0	0,034	-	0,071	-	0,010	-	-
1	0,311	0,313	0,659	0,663	0,051	3,581	0,083
2	0,553	0,635	1,173	1,345	0,024	1,644	0,169
3	0,777	0,954	1,648	2,022	0,015	0,833	0,254
4	0,996	1,263	2,112	2,679	0,013	0,613	0,337
5	1,213	1,570	2,573	3,329	0,012	0,533	0,418
6	1,403	1,855	2,975	3,933	0,012	0,502	0,494
7	1,540	2,083	3,266	4,418	0,011	0,627	0,555
8	1,659	2,264	3,519	4,801	0,011	0,651	0,603
9	1,770	2,426	3,754	5,145	0,011	0,661	0,647
10	1,870	2,575	3,966	5,461	0,010	0,685	0,686

Fehler für Hysteresekurve:

Schalterstellung S	Fehler zu I_1 in mA	Fehler zu ΔI_1 in mA	Fehler zu H in $\frac{A}{m}$	Fehler zu ΔH in $\frac{A}{m}$	Fehler zu U_C in mV	Fehler zu μ_{diff} in $10^{-5} \frac{Vs}{Am}$	Fehler zu ΔB in 10^{-8} mT
10	1,870	-	3,966	-	0,010	-	-
9	1,770	2,575	3,754	5,461	0,010	0,340	0,686
8	1,660	2,426	3,519	5,145	0,010	0,371	0,647
7	1,540	2,264	3,266	4,801	0,010	0,349	0,603
6	1,403	2,083	2,976	4,418	0,011	0,316	0,555
5	1,213	1,855	2,573	3,933	0,011	0,262	0,494
4	0,996	1,570	2,112	3,329	0,011	0,268	0,418
3	0,777	1,263	1,648	2,679	0,012	0,306	0,337
2	0,553	0,954	1,173	2,022	0,013	0,367	0,254
1	0,311	0,635	0,659	1,345	0,015	0,518	0,169
0	0,033	0,313	0,071	0,662	0,029	1,580	0,083
-1	-0,246	0,249	0,523	0,528	0,085	6,439	0,066
-2	-0,489	0,548	1,039	1,163	0,026	1,834	0,146
-3	-0,712	0,864	1,511	1,833	0,016	0,885	0,230
-4	-0,932	1,173	1,977	3,489	0,013	0,618	0,313
-5	-1,119	1,456	2,375	3,090	0,013	0,669	0,388
-6	-1,336	1,743	2,833	4,697	0,012	0,375	0,465
-7	-1,471	1,987	3,121	4,215	0,011	0,732	0,530
-8	-1,586	2,163	3,365	4,590	0,011	0,378	0,577
-9	-1,693	2,320	3,592	4,922	0,011	0,713	0,619
-10	-1,786	2,461	3,789	5,221	0,011	0,790	0,656
-9	-1,693	2,461	3,592	5,221	0,010	0,374	0,656
-8	-1,586	2,320	3,365	4,922	0,010	0,602	0,619
-7	-1,471	2,163	3,121	4,590	0,010	0,185	0,577
-6	-1,336	1,987	2,833	4,215	0,010	0,314	0,530
-5	-1,119	1,743	2,375	4,697	0,010	0,173	0,465
-4	-0,932	1,456	1,977	3,090	0,010	0,308	0,388
-3	-0,712	1,173	1,511	3,489	0,010	0,293	0,313
-2	-0,489	0,864	1,039	1,833	0,010	0,350	0,230
-1	-0,246	0,548	0,523	1,163	0,010	0,499	0,146
0	0,033	0,249	0,071	0,528	-0,010	1,574	0,066
1	0,311	0,313	0,659	0,662	-0,066	6,740	0,083
2	0,553	0,635	1,173	1,345	-0,006	1,936	0,169
3	0,777	0,954	1,648	2,022	0,004	0,921	0,254
4	0,996	1,263	2,112	2,679	0,006	0,656	0,337
5	1,213	1,570	2,573	3,329	0,008	0,541	0,418
6	1,403	1,855	2,976	3,933	0,009	0,464	0,494
7	1,540	2,083	3,266	4,418	0,009	0,630	0,555
8	1,660	2,264	3,519	4,801	0,009	0,657	0,603
9	1,770	2,426	3,754	5,145	0,009	0,743	0,647
10	1,870	2,575	3,966	5,461	0,010	0,690	0,686

5.2 Der reale Transformator

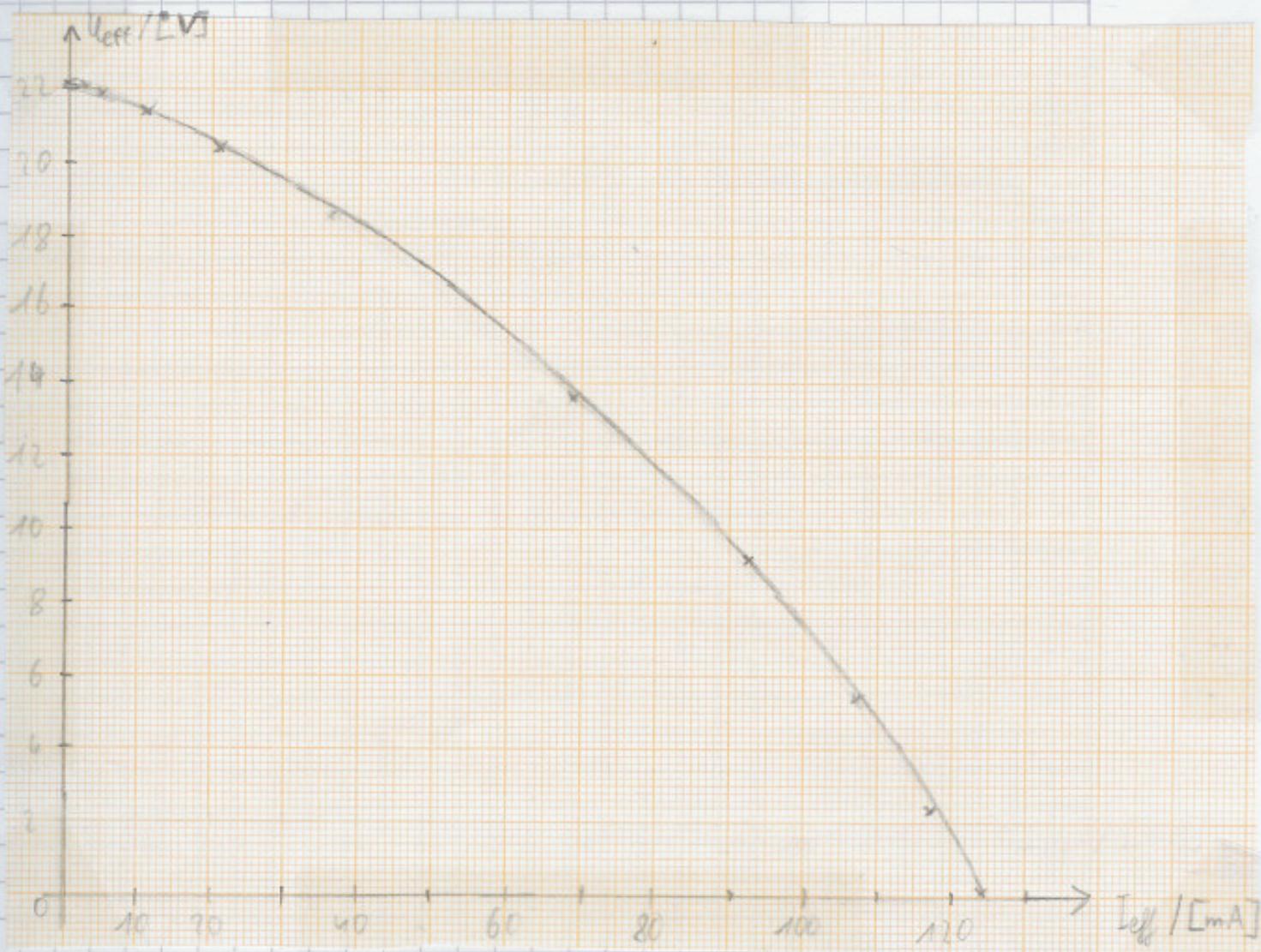
$$P_i^w = U_{\text{eff},i} \cdot I_{\text{eff},i} \cos \varphi \quad (i=1,2)$$

$$\cos \varphi = \frac{U_0^2 - U_1^2 - U_R^2}{2U_1 U_R}$$

$$\eta = \frac{P_2^w}{P_1^w}$$

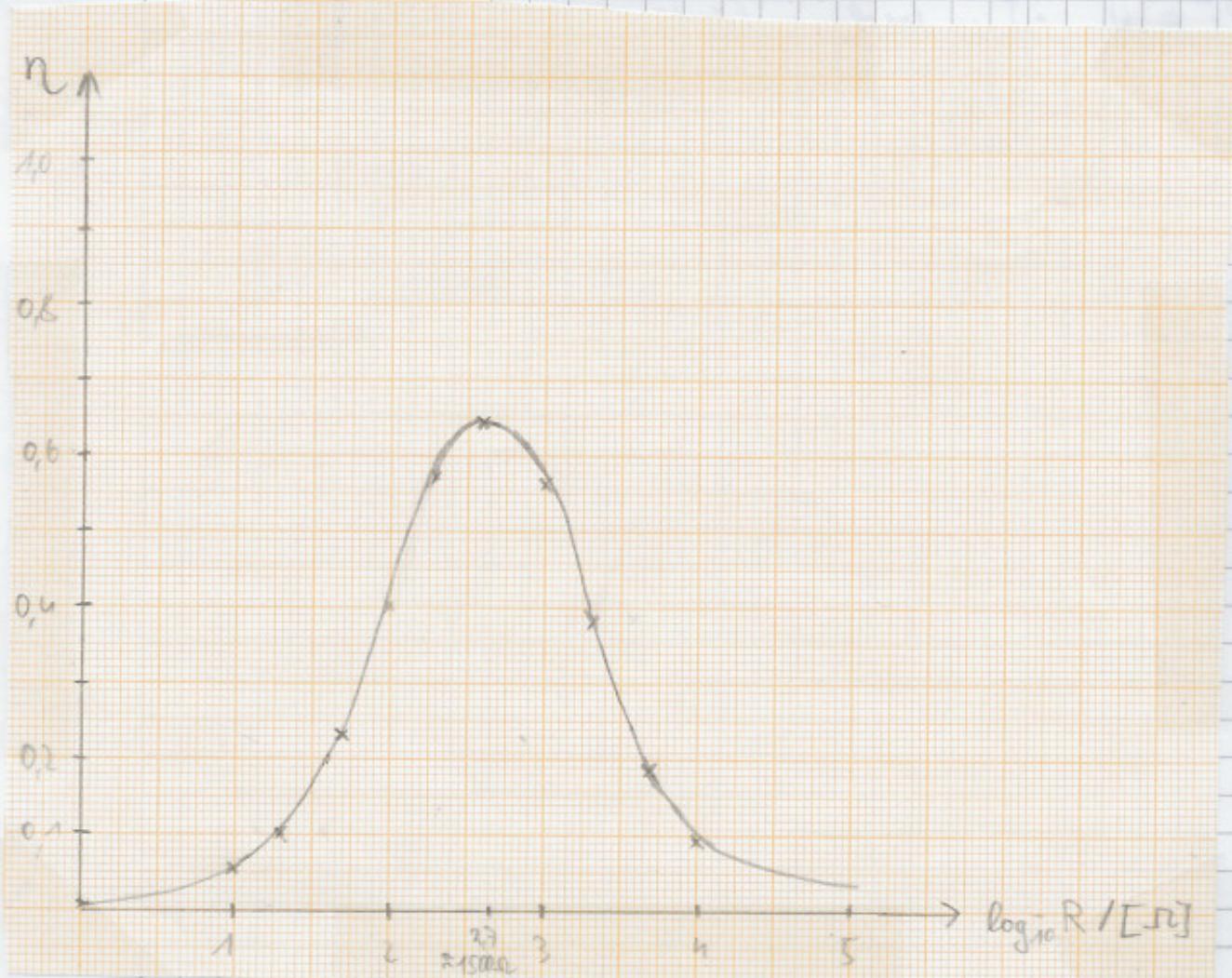
bereit in %!

$\log_{10} R$ in Ω	$\cos(\varphi)$	Wirkleistung P_1^w in 10^{-3} VA	Wirkleistung P_2^w in 10^{-3} VA	Wirkungsgrad η in 10^{-5}
$\rightarrow \infty$	0,306	146,734	0,008	5,542
4,0	0,384	189,788	18,671	9837,791
3,7	0,461	236,387	43,962	18597,269
3,3	0,622	368,328	140,806	38228,312
3,0	0,741	556,247	308,343	55432,724
2,7	0,805	849,384	550,032	64756,514
2,3	0,740	1225,174	703,579	57426,862
2,0	0,572	1215,420	486,474	40025,192
1,7	0,420	1037,149	244,518	23576,019
1,3	0,298	812,978	82,328	10126,663
1,0	0,251	709,243	36,489	5144,763
0,0	0,201	586,702	1,246	212,434



Effektive Spannung am Sekundärkreis in Abhängigkeit des fließenden Stroms

Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Lautwiderstand:



6) Zusammenfassung

Im Verlauf unserer Kurzwertung sind uns einige Dinge besonders aufgefallen:

- Unsere Neukurve ist näherungsweise von der Hysteresekurve eingeschlossen, was unseren Erwartungen entsprach. Jedoch sollte die Neukurve nicht so nahe an der Grenzkurve liegen, d.h. wir hatten ungenaue Messwerte aufgrund der Qualität der Messgeräte. Eins war kaputt, das andere hat nicht so genau gemessen wie erwartet. Allerdings ist eine optische Annäherung an die Literatur vorhanden. Dies spiegelte sich auch in der μ_{diff-H} -Funktion wider.
- Zum realen Transformator bemerkten wir im Vergleich zu anderen Praktikumteilnehmern, dass unsere Werte konstant unter denen der anderen lagen, der Kurvenverlauf jedoch ähnelte.

ok. 30.6.2010 Ulis Gang 20P