



Praktikum

Grundlagen der Elektrotechnik

Versuch 4

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessungen

MUSTERPROTOKOLL

Farblegende für das Musterprotokoll:

- Blau: in der Durchführung aufgenommene Werte
- Grün: Lösungen
- Rot: Punktevergabe

4.9 Permanentmagnete im Rückschlussjoch

4.9.1 Messung der $B(H)$ -Kennlinie eines Ferritmagnets aus Barium-Ferrit (Prüfling 1: Gruppe 1) oder Strontium-Ferrit (Prüfling 2: Gruppe 2)

Tabelle 4.9.1-1:

PRÜFLING 1

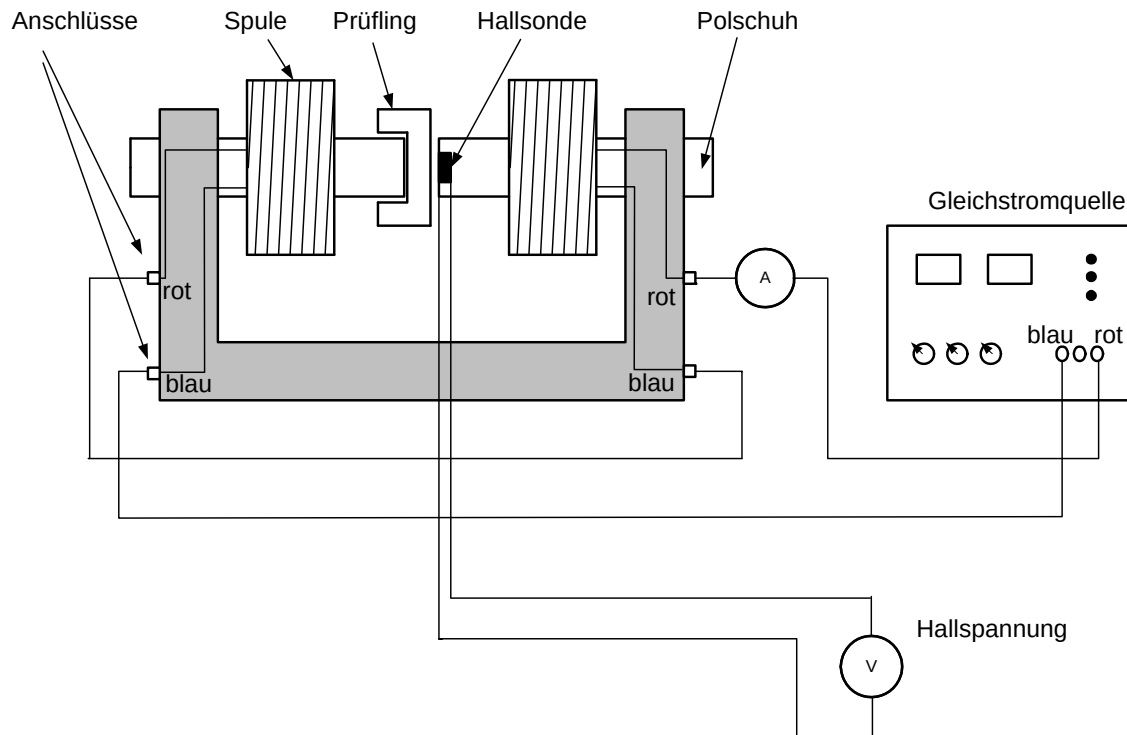
Teil A				Teil B			
Messung im Quadranten IV und I				Messung im Quadranten II und III			
I / A	U_H / V	I / A	U_H / V	I / A	U_H / V	I / A	U_H / V
0	-0,214	4	0,618	0	0,220	-4	-0,612
0,25	-0,186	3,75	0,607	-0,25	0,186	-3,75	-0,601
0,5	-0,156	3,5	0,595	-0,5	0,154	-3,5	-0,589
0,75	-0,123	3,25	0,581	-0,75	0,121	-3,25	-0,575
1	-0,09	3,0	0,566	-1	0,087	-3,0	0,559
1,25	-0,056	2,75	0,547	-1,25	0,051	-2,75	-0,541
1,5	-0,022	2,5	0,526	-1,5	0,019	-2,5	-0,521
1,75	0,064	2,25	0,501	-1,75	-0,064	-2,25	-0,496
2	0,302	2,0	0,475	-2	-0,30	-2,0	-0,468
2,25	0,407	1,75	0,445	-2,25	-0,40	-1,75	-0,44
2,5	0,473	1,5	0,413	-2,5	-0,46	-1,5	-0,408
2,75	0,507	1,25	0,383	-2,75	-0,501	-1,25	-0,377
3	0,54	1,0	0,351	-3	-0,534	-1,0	-0,345
3,25	0,564	0,75	0,319	-3,25	-0,558	-0,75	-0,314
3,5	0,585	0,5	0,287	-3,5	-0,579	-0,5	-0,28
3,75	0,603	0,25	0,253	-3,75	-0,596	-0,25	-0,248
4	0,618	0	0,22	-4	-0,612	0	-0,215
	1P		1P		1P		1P
Umpolen →							

Tabelle zu 4.9.1-1: PRÜFLING 2

Teil A				Teil B			
Messung im Quadranten IV und I				Messung im Quadranten II und III			
I / A	U_H / V	I / A	U_H / V	I / A	U_H / V	I / A	U_H / V
0	-0,161	4	0,654	0	0,228	-4	-0,647
0,25	-0,124	3,75	0,644	-0,25	0,185	-3,75	-0,637
0,5	-0,084	3,5	0,634	-0,5	0,141	-3,5	-0,626
0,75	-0,037	3,25	0,621	-0,75	0,093	-3,25	-0,614
1	0,069	3,0	0,608	-1	-0,079	-3,0	-0,601
1,25	0,291	2,75	0,583	-1,25	-0,285	-2,75	-0,586
1,5	0,379	2,5	0,576	-1,5	-0,370	-2,5	-0,569
1,75	0,442	2,25	0,555	-1,75	-0,433	-2,25	-0,549
2	0,489	2,0	0,532	-2	-0,481	-2,0	-0,525
2,25	0,526	1,75	0,503	-2,25	-0,519	-1,75	-0,495
2,5	0,558	1,5	0,468	-2,5	-0,548	-1,5	-0,461
2,75	0,579	1,25	0,430	-2,75	-0,571	-1,25	-0,423
3	0,597	1,0	0,393	-3	-0,591	-1,0	-0,387
3,25	0,614	0,75	0,354	-3,25	-0,607	-0,75	-0,346
3,5	0,630	0,5	0,307	-3,5	-0,622	-0,5	-0,306
3,75	0,642	0,25	0,271	-3,75	-0,636	-0,25	-0,263
4	0,654	0	0,228	-4	-0,647	0	-0,221
	(1P)		(1P)		(1P)		(1P)
Umpolen →							

4.9.2 Auswertung

Skizze Versuchsaufbau:



Verwendete Geräte:

- Magnetisierjoch
- Gleichstromquelle PS-405-D
- digitales Strommessgerät
- Hallsonde
- digitales Spannungsmessgerät
- Gruppe 1: Prüfling 1 (Barium-Ferrit, $d_a = 30 \text{ mm}$, $h_M = 9 \text{ mm}$, $\rho = 4800 \text{ kg/m}^3$)
- Gruppe 2: Prüfling 2 (Strontium-Ferrit, $d_a = 40 \text{ mm}$, $h_M = 7 \text{ mm}$, $\rho = 5000 \text{ kg/m}^3$)

2P

- a) Berechnen Sie die magnetische Feldstärke H aus den eingestellten Strömen und tragen Sie die Werte in die Tabellen 4.9.1 und 4.9.2 ein.

$$H = \frac{2 \cdot N_c \cdot I}{h_M}$$

Prüfling1: $N_C = 842$, $h_M = 9 \text{ mm} = 0,009 \text{ m} \Rightarrow H = 187,1 \cdot I_{\text{Tabelle}} \text{ kA/m}$

1P

Prüfling2: $N_C = 842$, $h_M = 7 \text{ mm} = 0,007 \text{ m} \Rightarrow H = 240,6 \cdot I_{\text{Tabelle}} \text{ kA/m}$

(1P)

- b) Berechnen Sie die magnetische Induktion B aus den gemessenen Spannungen U_H und tragen Sie die Werte in die Tabellen 4.9.1 und 4.9.2 ein.

$$U_H = 1 \text{ V} \cong 1,35 \text{ T}, \text{ da } U_H \propto B \text{ ist.}$$

Es ist eine lineare Abhängigkeit zwischen U_H und B gegeben:

$$\frac{U_{HTabelle}}{B} = \frac{1V}{1,35T} \Rightarrow B = \frac{U_{HTabelle}}{1V} \cdot 1,35T$$

1P

PRÜFLING 1:

Tabelle 4.9.2-1							
Messung im Quadranten IV und I							
I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T	I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T
0	0,00	-0,214	-0,29	4	748,44	0,618	0,83
0,25	46,78	-0,186	-0,25	3,75	701,67	0,607	0,82
0,5	93,56	-0,156	-0,21	3,5	654,89	0,595	0,80
0,75	140,33	-0,123	-0,17	3,25	608,11	0,581	0,78
1	187,11	-0,09	-0,12	3,0	561,33	0,566	0,76
1,25	233,89	-0,056	-0,08	2,75	514,56	0,547	0,74
1,5	280,67	-0,022	-0,03	2,5	467,78	0,526	0,71
1,75	327,44	0,064	0,09	2,25	421,00	0,501	0,68
2	374,22	0,302	0,41	2,0	374,22	0,475	0,64
2,25	421,00	0,407	0,55	1,75	327,44	0,445	0,60
2,5	467,78	0,473	0,64	1,5	280,67	0,413	0,56
2,75	514,56	0,507	0,68	1,25	233,89	0,383	0,52
3	561,33	0,54	0,73	1,0	187,11	0,351	0,47
3,25	608,11	0,564	0,76	0,75	140,33	0,319	0,43
3,5	654,89	0,585	0,79	0,5	93,56	0,287	0,39
3,75	701,67	0,603	0,81	0,25	46,78	0,253	0,34
4	748,44	0,618	0,83	0	0,00	0,22	0,30

1P

1P

1P

1P

Tabelle 4.9.2-2							
Messung im Quadranten II und III							
I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T	I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T
0	0,00	0,220	0,30	-4	-748,44	-0,612	-0,83
-0,25	-46,78	0,186	0,25	-3,75	-701,67	-0,601	-0,81
-0,5	-93,56	0,154	0,21	-3,5	-654,89	-0,589	-0,80
-0,75	-140,33	0,121	0,16	-3,25	-608,11	-0,575	-0,78
-1	-187,11	0,087	0,12	-3,0	-561,33	-0,559	-0,75
-1,25	-233,89	0,051	0,07	-2,75	-514,56	-0,541	-0,73
-1,5	-280,67	0,019	0,03	-2,5	-467,78	-0,521	-0,70
-1,75	-327,44	-0,064	-0,09	-2,25	-421,00	-0,496	-0,67
-2	-374,22	-0,30	-0,41	-2,0	-374,22	-0,468	-0,63
-2,25	-421,00	-0,40	-0,54	-1,75	-327,44	-0,44	-0,59
-2,5	-467,78	-0,46	-0,62	-1,5	-280,67	-0,408	-0,55

Fortsetzung Tabelle 4.9.2-2							
Messung im Quadranten II und III							
I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T	I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T
-2,75	-514,56	-0,501	-0,68	-1,25	-233,89	-0,377	-0,51
-3	-561,33	-0,534	-0,72	-1,0	-187,11	-0,345	-0,47
-3,25	-608,11	-0,558	-0,75	-0,75	-140,33	-0,314	-0,42
-3,5	-654,89	-0,579	-0,78	-0,5	-93,56	-0,28	-0,38
-3,75	-701,67	-0,596	-0,80	-0,25	-46,78	-0,248	-0,33
-4	-748,44	-0,612	-0,83	0	0,00	-0,215	-0,29
1P		1P		1P		1P	

PRÜFLING 2:

Tabelle 4.9.2-1							
Messung im Quadranten IV und I							
I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T	I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T
0	0,00	-0,161	-0,22	4	962,29	0,654	0,88
0,25	60,14	-0,124	-0,17	3,75	902,14	0,644	0,87
0,5	120,29	-0,084	-0,11	3,5	842,00	0,634	0,86
0,75	180,43	-0,037	-0,05	3,25	781,86	0,621	0,84
1	240,57	0,069	0,09	3,0	721,71	0,608	0,82
1,25	300,71	0,291	0,39	2,75	661,57	0,583	0,79
1,5	360,86	0,379	0,51	2,5	601,43	0,576	0,78
1,75	421,00	0,442	0,60	2,25	541,29	0,555	0,75
2	481,14	0,489	0,66	2,0	481,14	0,532	0,72
2,25	541,29	0,526	0,71	1,75	421,00	0,503	0,68
2,5	601,43	0,558	0,75	1,5	360,86	0,468	0,63
2,75	661,57	0,579	0,78	1,25	300,71	0,430	0,58
3	721,71	0,597	0,81	1,0	240,57	0,393	0,53
3,25	781,86	0,614	0,83	0,75	180,43	0,354	0,48
3,5	842,00	0,630	0,85	0,5	120,29	0,307	0,41
3,75	902,14	0,642	0,87	0,25	60,14	0,271	0,37
4	962,29	0,654	0,88	0	0,00	0,228	0,31
(1P)		(1P)		(1P)		(1P)	

Tabelle 4.9.2-2							
Messung im Quadranten II und III							
I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T	I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T
-0	0,00	0,228	0,31	-4	-962,29	-0,647	-0,87
-0,25	-60,14	0,185	0,25	-3,75	-902,14	-0,637	-0,86
-0,5	-120,29	0,141	0,19	-3,5	-842,00	-0,626	-0,85
-0,75	-180,43	0,093	0,13	-3,25	-781,86	-0,614	-0,83

Fortsetzung Tabelle 4.9.2-2							
Messung im Quadranten II und III							
I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T	I / A	$H / \text{kA/m}$	U_H / V	B / T
-1	-240,57	-0,079	-0,11	-3,0	-721,71	-0,601	-0,81
-1,25	-300,71	-0,285	-0,38	-2,75	-661,57	-0,586	-0,79
-1,5	-360,86	-0,370	-0,50	-2,5	-601,43	-0,569	-0,77
-1,75	-421,00	-0,433	-0,58	-2,25	-541,29	-0,549	-0,74
-2	-481,14	-0,481	-0,65	-2,0	-481,14	-0,525	-0,71
-2,25	-541,29	-0,519	-0,70	-1,75	-421,00	-0,495	-0,67
-2,5	-601,43	-0,548	-0,74	-1,5	-360,86	-0,461	-0,62
-2,75	-661,57	-0,571	-0,77	-1,25	-300,71	-0,423	-0,57
-3	-721,71	-0,591	-0,80	-1,0	-240,57	-0,387	-0,52
-3,25	-781,86	-0,607	-0,82	-0,75	-180,43	-0,346	-0,47
-3,5	-842,00	-0,622	-0,84	-0,5	-120,29	-0,306	-0,41
-3,75	-902,14	-0,636	-0,86	-0,25	-60,14	-0,263	-0,36
-4	-962,29	-0,647	-0,87	0	0,00	-0,221	-0,30
(1P)		(1P)		(1P)		(1P)	

- c) Zeichnen Sie die $B(H)$ -Kennlinie in ein Diagramm. Verwenden Sie dabei Millimeterpapier (DIN A4). Markieren Sie im Diagramm die Remanenz B_r und die Koerzitivfeldstärke H_C und tragen Sie die gemessenen Werte in Tabelle 4.9.2-3 ein.

PRÜFLING 1: siehe Graph 1

PRÜFLING 2: siehe Graph 2

Punkteverteilung auf die Graphen 1 und 2 (ebenfalls auf Graphen vermerkt):

- Vollständige Achsenbeschriftungen 2P
- Messpunkte eingezeichnet 1P
- Messpunkte verbunden (Kurve eingezeichnet) 2P
- Kurvenlineal verwendet 1P
- Remanenzflussdichten und Koerzitivfeldstärken eingezeichnet 2P

PRÜFLING 1

Tabelle 4.9.2-3				
	Positive x-Achse	Negative x-Achse	Positive y-Achse	Negative y-Achse
B_R / T	-	-	0,3 1P	-0,29 1P
$H_C / \text{kA/m}$	300 1P	-290 1P	-	-

PRÜFLING 2

Tabelle 4.9.2-3				
	Positive x-Achse	Negative x-Achse	Positive y-Achse	Negative y-Achse
B_R / T	-	-	0,31 (1P)	-0,27 (1P)
$H_C / \text{kA/m}$	220 (1P)	-215 (1P)	-	-

d) Ermitteln Sie die maximale Induktion aus der $B(H)$ -Kennlinie.

PRÜFLING 1: $B_{\max} = 0,83 T$

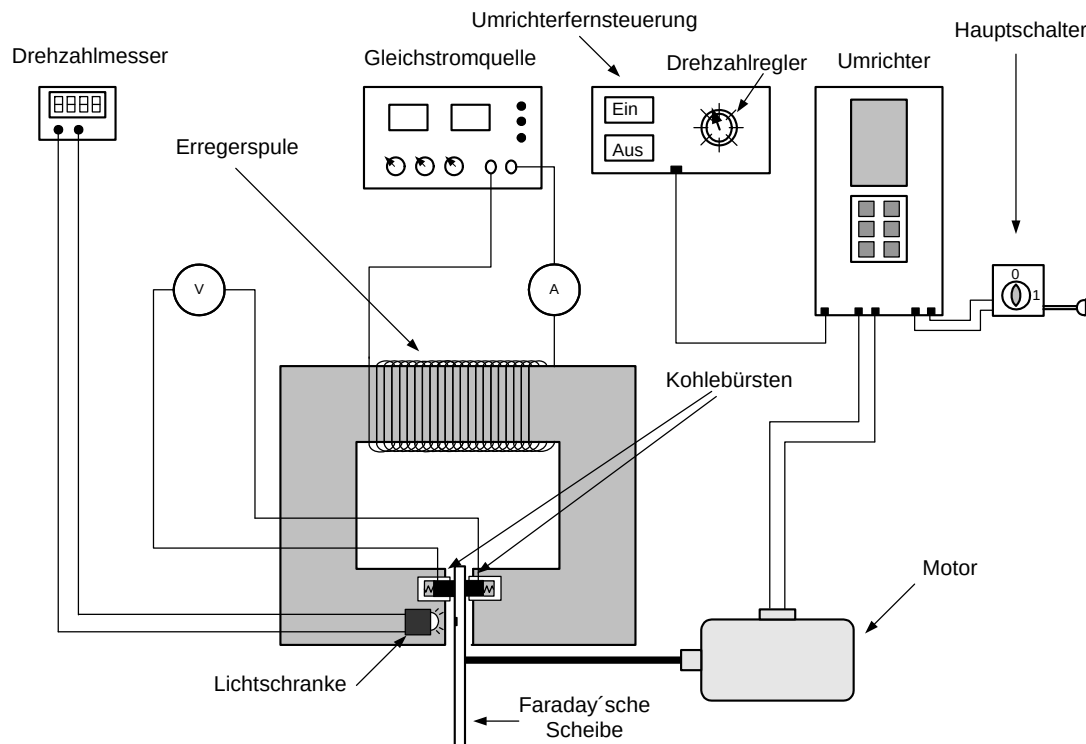
1P

PRÜFLING 2: $B_{\max} = 0,88 T$

(1P)

4.10 FARADAY'sche Scheibe als Wirbelstrombremse

Skizze Versuchsaufbau:



Verwendete Geräte:

- Drehzahlmesser
- Gleichstromquelle PS-302A
- Umrichterfernsteuerung
- Umrichter
- Hauptschalter
- Asynchronmotor
- FARADAY'sche Scheibe
- Erregerspule

2P

4.10.1 Messung der $U_i(n)$ -Kennlinie

4.10.1.1 Durchführung

Messwerttabelle zu Versuchsstand V4.1:

n / min^{-1}	0	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000
U_i / mV	0	15,5	23	27,7	31,6	35,0	38,1	40,6	43,4	45,1	46,3

1P

Messwerttabelle zu Versuchsstand V4.2:

n / min^{-1}	0	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000
U_i / mV	0	26,7	47,5	62,1	72,8	83,6	93,3	101,3	108,3	116,5	119,4

(1P)

4.10.1.2 Auswertung

- a) Zeichnen Sie die $U_i(n)$ -Kennlinie in ein Diagramm. Verwenden Sie dazu Millimeterpapier (DIN A4) und folgende Maßstäbe:

$$n: \quad \lambda_n = 150 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{cm}}$$

$$U_i: \quad \lambda_U = 10 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}$$

V4.1:Graph 3

V4.2:Graph 4

Punkteverteilung auf die Graphen 3 und 4 (ebenfalls auf Graphen vermerkt):

- Vollständige Achsenbeschriftungen 1P
- Messpunkte eingezeichnet 0,5P
- Messpunkte verbunden (Kurve eingezeichnet) 1P
- Kurvenlineal verwendet 0,5P

4.10.2 Messung der $U_i(I_f)$ -Kennlinie bei konstanter Drehzahl $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ **4.10.2.1 Durchführung****Messwerttabelle zu V4.1:**

I_f / A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
U_i / mV	5,1	8,0	11,0	14,5	20,6	24,8	29,0	36,6	42,0	50,0	60,4

1P

Messwerttabelle zu V4.2:

I_f / A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
U_i / mV	13,0	21,4	30,5	41,5	49,3	58,2	70,4	82,4	94,5	109,8	127,0

(1P)

4.10.2.2 Auswertung

- a) Zeichnen Sie die $U_i(I_f)$ -Kennlinie in ein Diagramm. Verwenden Sie dazu Millimeterpapier (DIN A4). Verwenden Sie folgende Maßstäbe:

$$I_f: \quad \lambda_I = 0,05 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$U_i: \quad \lambda_U = 10 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}$$

V4.1:Graph 5

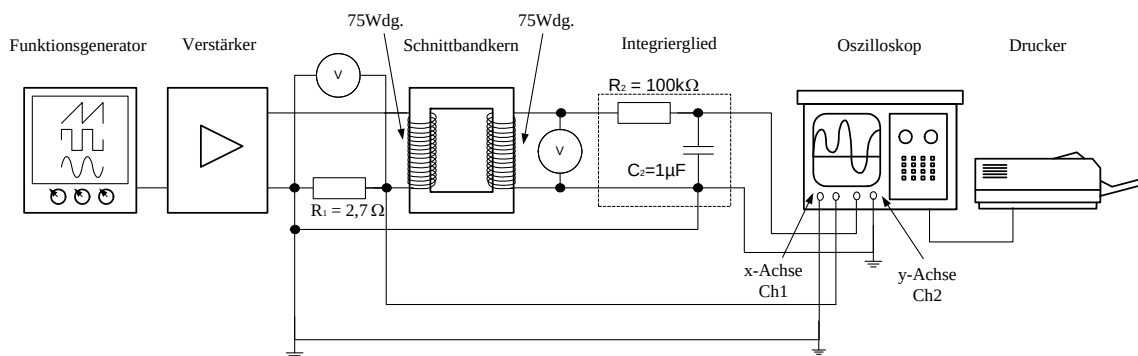
V4.2:Graph 6

Punkteverteilung auf die Graphen 5 und 6 (ebenfalls auf Graphen vermerkt):

- Vollständige Achsenbeschriftungen 1P
- Messpunkte eingezeichnet 0,5P
- Messpunkte verbunden (Kurve eingezeichnet) 1P
- Kurvenlineal verwendet 0,5P

4.11 Hysteresis-Kennlinien und Ummagnetisierungsverluste in einem Schnittbandkern

Skizze Versuchsaufbau:



Verwendete Geräte:

- Funktionsgenerator FG 200
- Widerstand $R_1 = 2,7 \Omega$ (50W)
- Verstärker
- Schnittbandkern
- 2 Spulen mit je 75 Windungen
- Oszilloskop TDS 1002
- Drucker

2P

4.11.1 Oszillographieren der Hysteresis-Schleifen für verschiedene Frequenzen

Messwerttabelle:

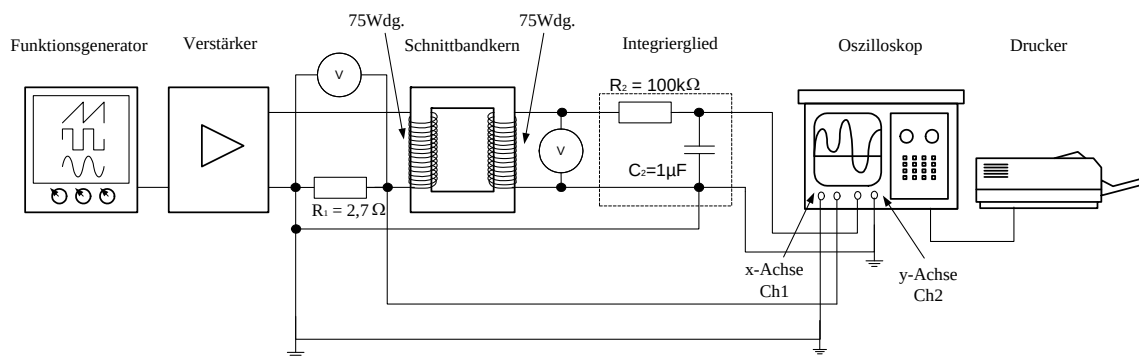
$f_{\text{soll}} / \text{Hz}$	20	35	45	70	90	120	160	190	200	
$f_{\text{abgelesen}} / \text{Hz}$	20	35	45,1	70,3	90,2	120,5	160,1	190	200,1	1P
$U_{\text{sek,berechnet}} / \text{V}$	6	10,5	13,5	21	27	36	48	57	60	
$U_{\text{sek,gemessen}} / \text{V}$	6,03	10,53	13,53	21	27	36	48,06	57,06	59,97	1P
$U_{\text{prim,gemessen}} / \text{V}$	0,617	0,667	0,680	0,709	0,735	0,770	0,828	0,864	0,870	1P
$I_{\text{prim}} = U_{\text{prim}} / R_1 / \text{A}$	0,229	0,247	0,252	0,263	0,272	0,285	0,307	0,320	0,322	2P

4.11.2 Auswertung:

- a) Ermitteln Sie die maximalen Induktionen $B_{\max}$ und maximalen Feldsärken $H_{\max}$ für jeden Messpunkt aus den Hysteresis-Schleifen und tragen Sie die Werte in die Tabelle 4.11.2-1 und in die Oszillogrammausdrucke ein.

Problem: Ermittlung der Maßstäbe für $H_{\max}$ und $B_{\max}$ aus den ausgedruckten Hystereseschleifen, da 2 Spannungen übereinander aufgetragen sind, bzw. ihr Phasenversatz (XY-Darstellung, auch bekannt als Lissajousfigur).

Ansatz: Bild 4.11-1 als Grundlage.



- 1) Auf der Abszisse (x-Achse) wird in den Hystersekurven die Spannung, die über $R_1 = 2,7 \Omega$ anliegt, angezeigt (CH1). Diese Spannung entspricht einer Feldstärke H :

$$\int H ds = N_C \cdot I_{\text{Prim}} = H \cdot l_m \quad I_{\text{Prim}} = \frac{U_{\text{CH1}}}{R_1} \quad [U_{\text{CH1}}] = 500 \text{ mV / Div}$$

1P 1P 1P („Div“ bedeutet Division, also Abschnitt)

$$\Rightarrow H = \frac{N_C \cdot U_{\text{CH1}}}{l_m \cdot R_1} = \frac{75 \cdot 500 \frac{\text{mV}}{\text{Div}}}{0,376 \text{ m} \cdot 2,7 \Omega} = 36,9 \frac{\text{A}}{\text{m} \cdot \text{Div}}$$

(d.h., dass 500mV auf der Abszisse 36,9 A/m entsprechen)

- 2) Auf der Ordinate (y-Achse) wird in den Hystersekurven die Spannung über dem Kondensator C_2 angezeigt (CH2). Diese Spannung entspricht einer Flussdichte B . Allerdings muss noch der *Ohm'sch-Kapazitive* Spannungsteiler berücksichtigt werden:

Spannungsteiler:

$$\left| \frac{U_{\text{CH2}}}{U_{\text{Sek}}} \right| = \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{\sqrt{R_2^2 + \frac{1}{(\omega C_2)^2}}} \quad R_2^2 \gg \frac{1}{(\omega C_2)^2} \quad (\text{z.B. Ausrechnen für } f = 20\text{Hz})$$

$\frac{1}{(\omega C_2)^2}$ trägt in der Summe mit R^2 wenig bei; im Nenner vernachlässigbar.

(falls Vernachlässigung nicht vorgenommen, KEIN PUNKTABZUG !)

$$\left| \frac{U_{CH2}}{U_{Sek}} \right| = \frac{U_{CH2}}{U_{Sek}} = \frac{1}{\omega R_2 C_2}$$

Weiterhin ist aus der Vorbereitung 4.12.4 bekannt:

$$U_i = U_{Sek} = \omega \cdot N_C \cdot B \cdot A \Rightarrow B = \frac{U_{CH2} \cdot R_2 \cdot C_2}{N_C \cdot A} = \frac{200 \frac{mV}{Div} \cdot 100 k\Omega \cdot 1 \mu F}{75 \cdot 9 \cdot 10^{-4} m^2} = 0,296 \frac{T}{Div}$$

Beide Maßstäbe sind frequenzunabhängig und daher für jeden Plot gültig.

H_{max} und B_{max} sind jetzt aus den Plots ablesbar (Siehe Graph 7 bis 15). Die Skalierung ist linear. Die Werte sind in Tabelle 4.11.1 abgelegt.

Punkteverteilung auf die Graphen 7 bis 15:

- Auf jedem Graph H_{max} und B_{max} eingezeichnet 1P
- Werte von H_{max} und B_{max} an jeden Graph geschrieben 1P
- Auf jedem Graph H_{Div} und B_{Div} angegeben 2P
- Raster eingezeichnet (feineres Raster ergibt mehr Punkte, weil genauer) 4P

- b) Aus den Flächen der Hysteresis-Schleifen sind die Ummagnetisierungsverluste zu ermitteln und in Abhängigkeit von der Frequenz graphisch auf ein Millimeterpapier (DIN A4) darzustellen. Verwenden Sie folgende Maßstäbe:

$$p_{Hys}: \lambda_p = 5 \frac{W/dm^3}{cm}$$

$$P_{Hys}: \lambda_P = 1 \frac{W}{cm}$$

$$f: \lambda_f = 10 \frac{Hz}{cm}$$

Planimetrieren Sie dazu die Flächen A_{Hys} innerhalb der Hysteresis-Schleifen und tragen sie die ermittelten Werte in die Messwerttabelle ein. Berechnen Sie daraus die Ummagnetisierungsverlustdichte p_{Hys} und die Ummagnetisierungsverluste P_{Hys} . Tragen Sie die Werte ebenfalls in Tabelle 4.11.2-1 ein.

Tragen Sie generell die Maßstabsfaktoren in die Diagramme mit ein!

Lösung: Die verlustdichtebezogene Fläche $A_{Hysteresis}$ (in cm^2 !) lässt sich durch Abzählen der Divisions- bzw. Unterdivisions (genauere Werte) und der entsprechenden Umrechnung (1 Division entspricht $1,7 \times 1,7 = 2,89 cm^2$) bestimmen (siehe Graph 7 bis 15; Werte in Tabelle 4.11.1).

Die Leistungsdichte p_{Hys} berechnet sich mit folgender Formel:

$$p_{Hys} = H_{Div} \cdot B_{Div} \frac{A_{Hys}}{2,89 \text{ cm}^2} \cdot 1 \text{ Div} \cdot 1 \text{ Div} \cdot f = 3,779 \cdot \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^2 \cdot \text{m}^3} A_{Hys} \cdot f$$

2P

Die Verlustleistung geht aus Multiplikation der Leistungsdichte mit dem Eisenvolumen hervor:

$$P_{Hys} = p_{Hys} \cdot V_{Fe} = p_{Hys} \cdot l_m \cdot A = p_{Hys} \cdot 0,376 \text{ m} \cdot 9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = p_{Hys} \cdot 3,384 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

1P

Ergebnisse in Tabelle 4.11.2-1.

Tabelle 4.11.2-1									
$f_{\text{soll}} / \text{Hz}$	20	35	45	70	90	120	160	190	200
$B_{\text{max}} / \text{T}$	1,036	1,006	1,012	1,030	1,006	1,021	1,018	1,036	1,027
$H_{\text{max}} / \text{A/m}$	78,40	78,4	80,3	82,1	83,9	85,1	90,0	92,3	94,8
A_{Hy} / cm^2	12,6	18,6	23	27,9	32,1	33,5	41	42,1	43,8
$p_{Fe} / \text{W/dm}^3$	0,952	2,46	3,91	7,38	10,92	15,19	24,79	30,23	33,1
P_{Fe} / W	0,3	0,8	1,3	2,5	3,7	5,1	8,4	10,2	11,2

Jede Reihe 1P

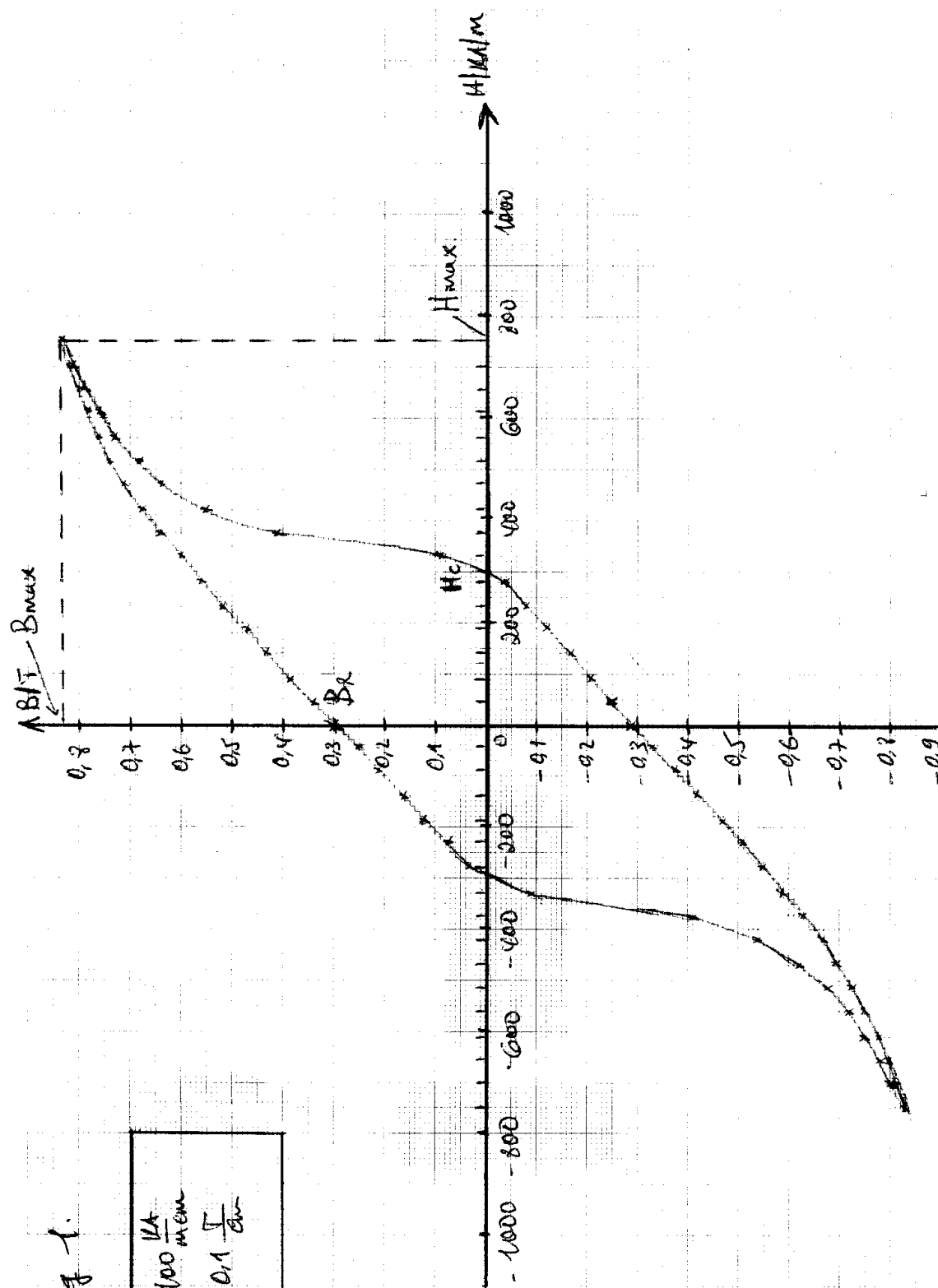
Hinweis: H_{CB} ist vom Betrag kleiner als $-H_{CB}$, d.h. die Hysteresekurven sind alle Richtung Quadrant 2 und 3 verschoben.

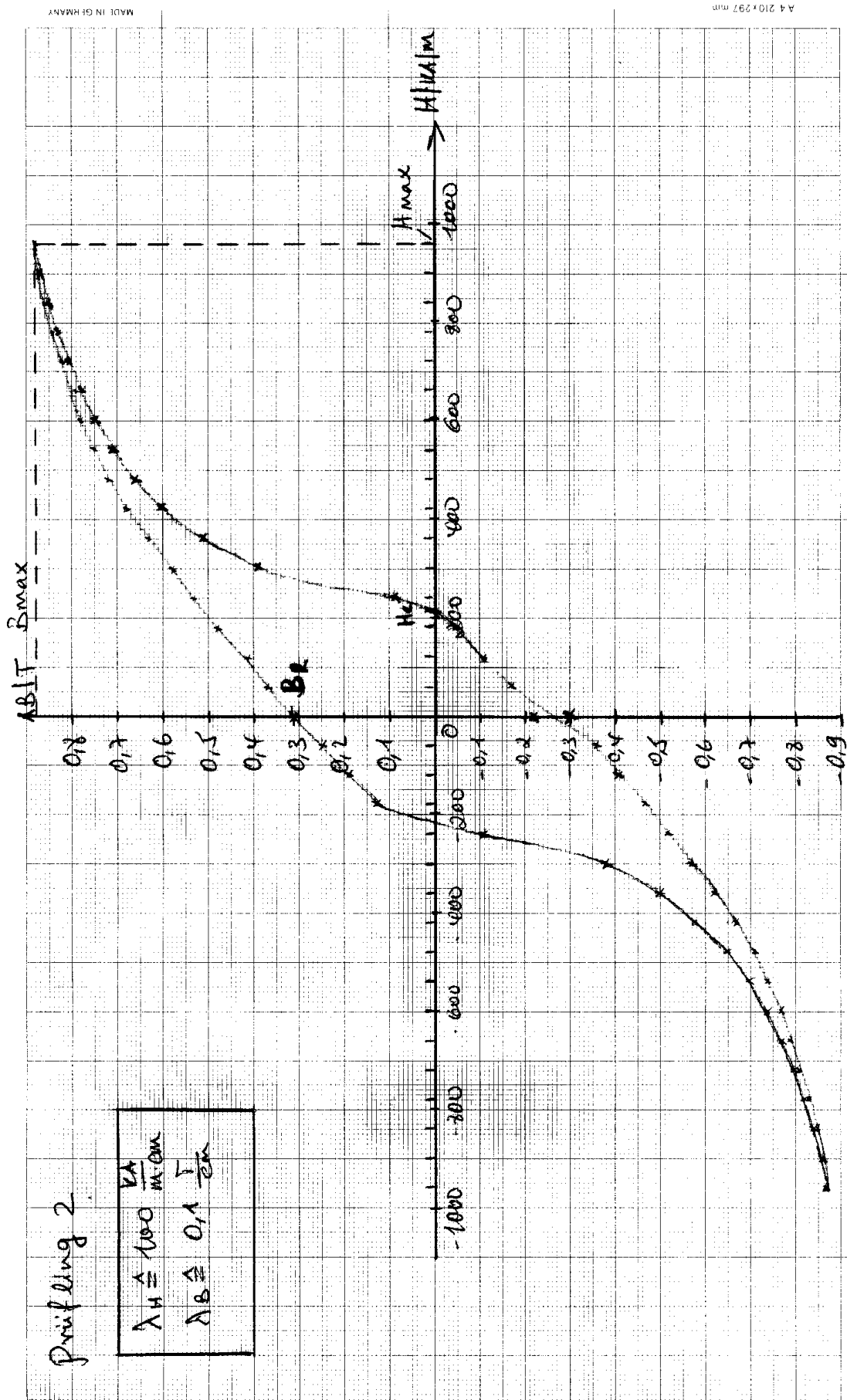
Die in Tabelle 4.11.1-1 angegebenen maximalen Feldstärken H_{max} sind arithmetische Mittelwerte aus $+H_{\text{max}}$ und $-H_{\text{max}}$:

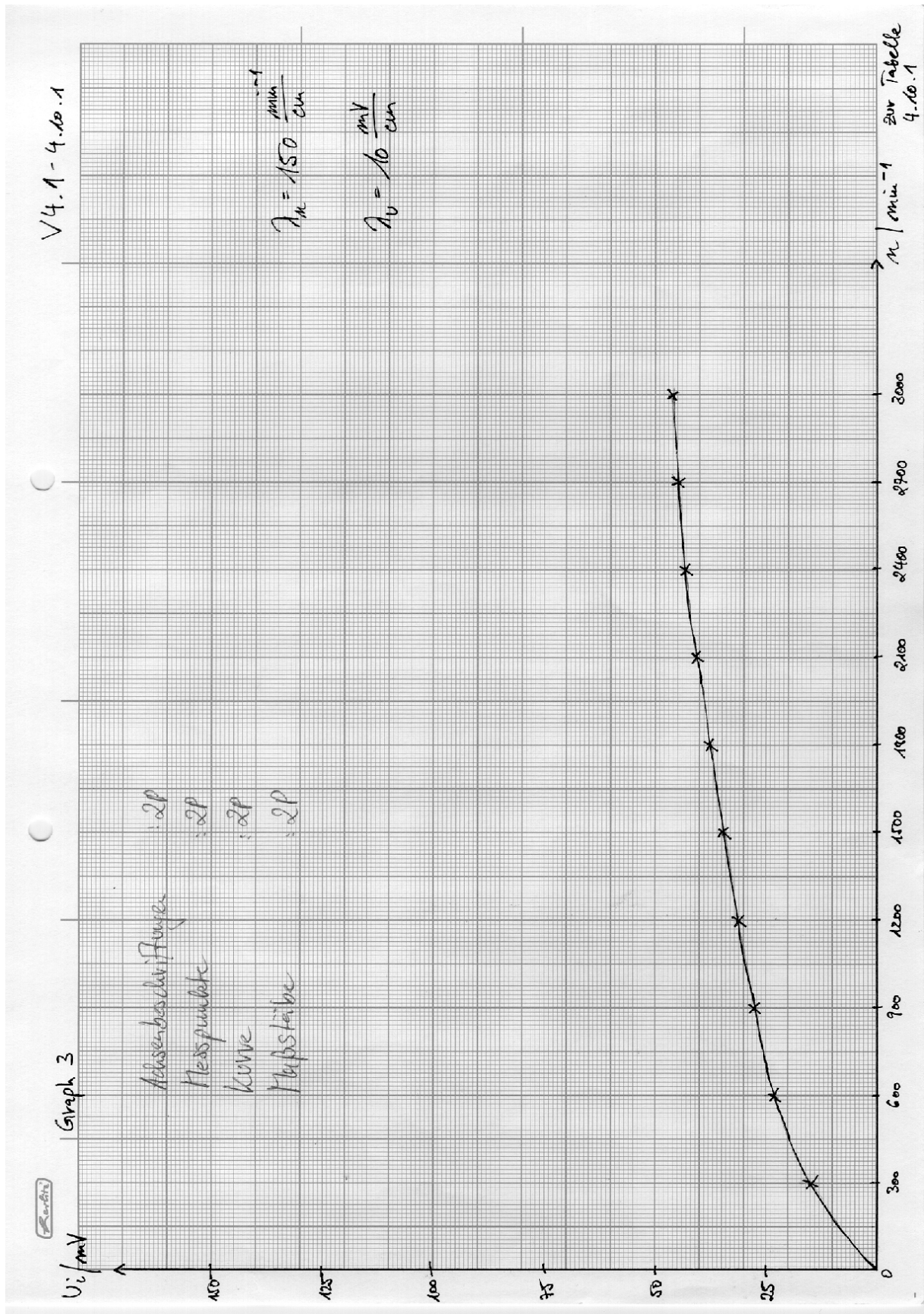
$$0,5 (|H_{\text{max}}| + |-H_{\text{max}}|) = H_{\text{max}}$$

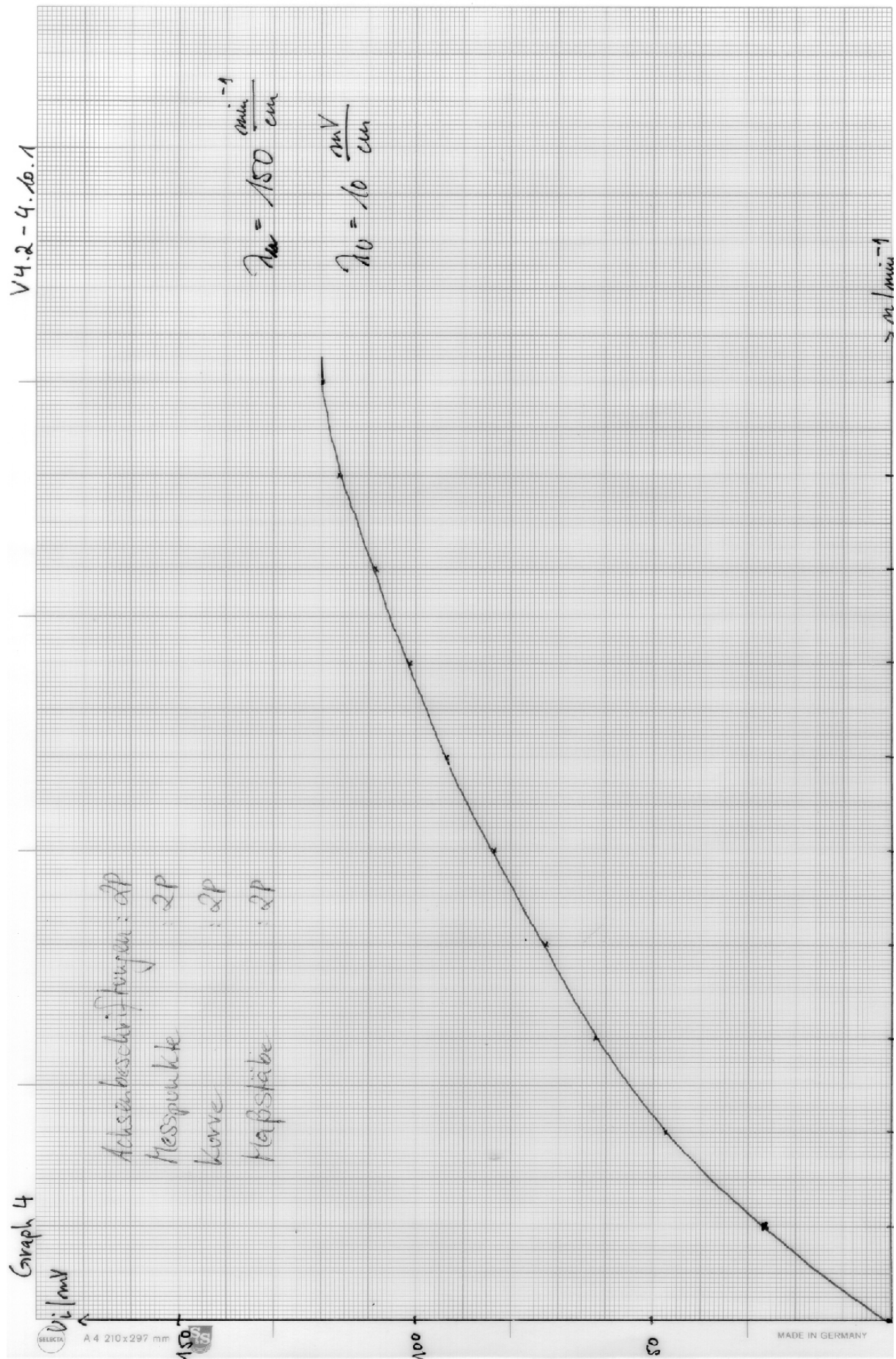
Punkteverteilung auf den Graphen 16 (ebenfalls auf Graph vermerkt):

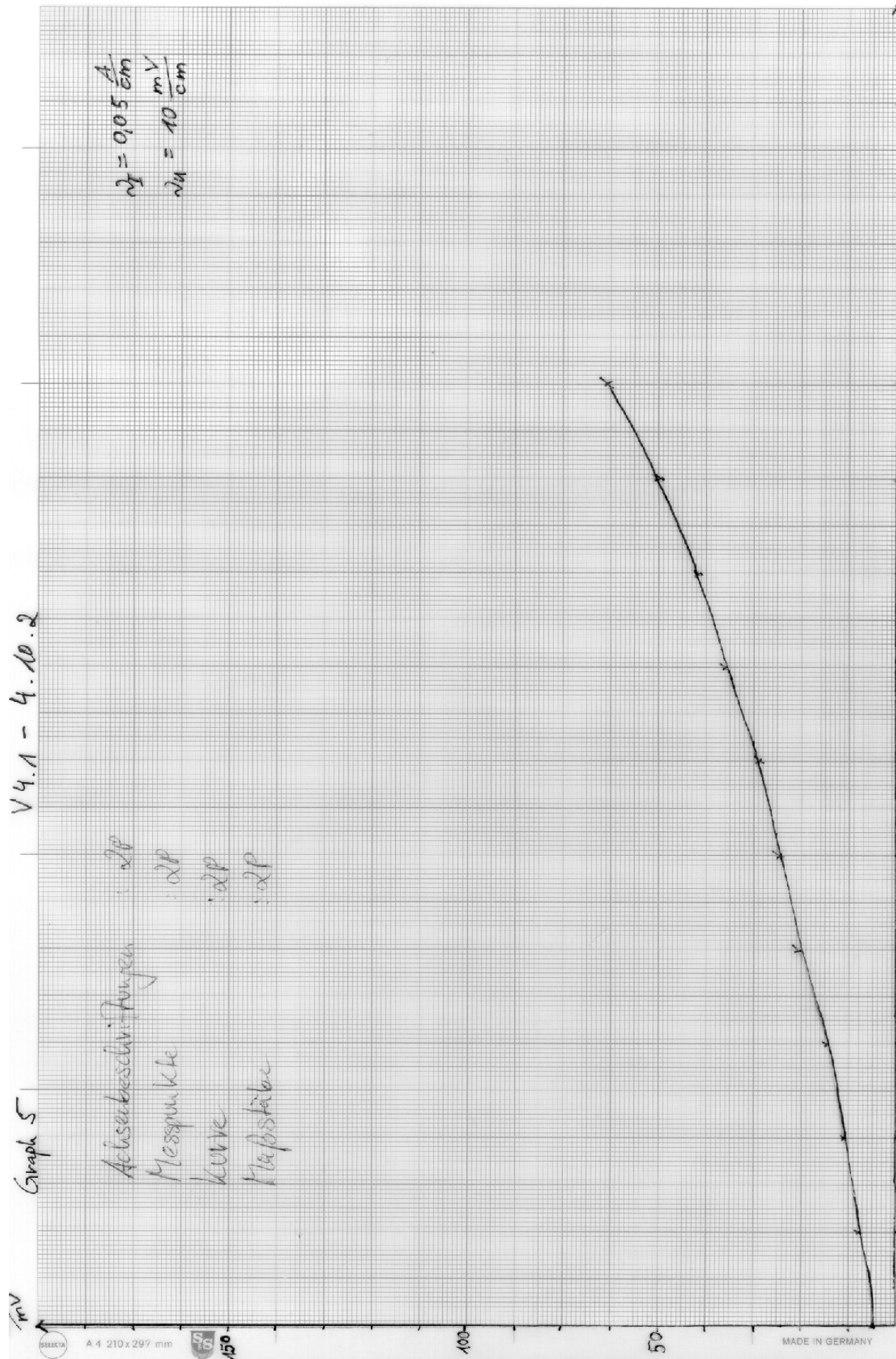
- Vollständige Achsenbeschriftungen 1P
- Zwei Y-Achsen eingezeichnet 1P
- Messpunkte eingezeichnet 1P
- Messpunkte verbunden 1P
- Maßstäbe Legende, bzw. Kurvenbeschriftung 1P
- Kurvenlineal verwendet 1P

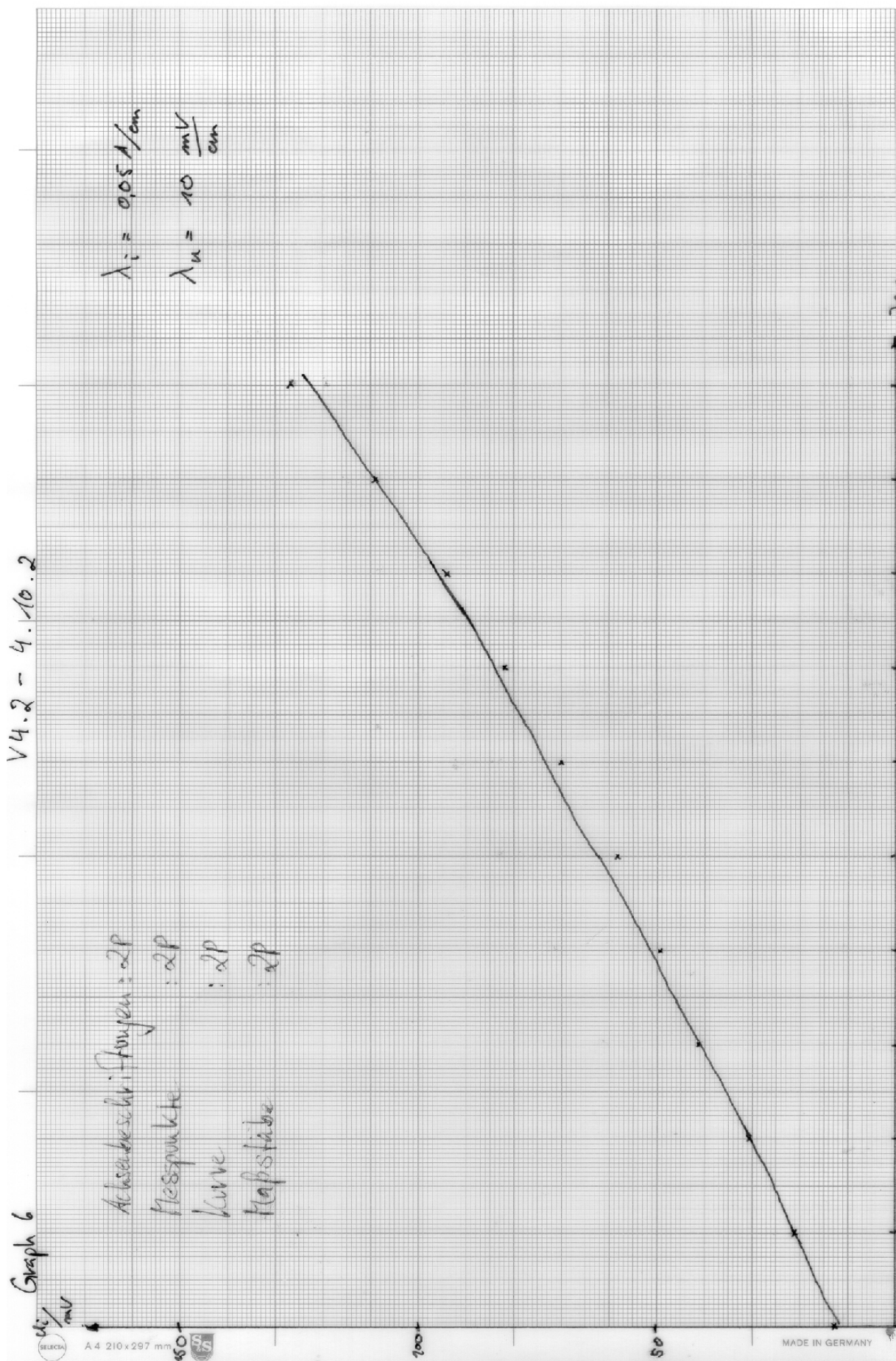






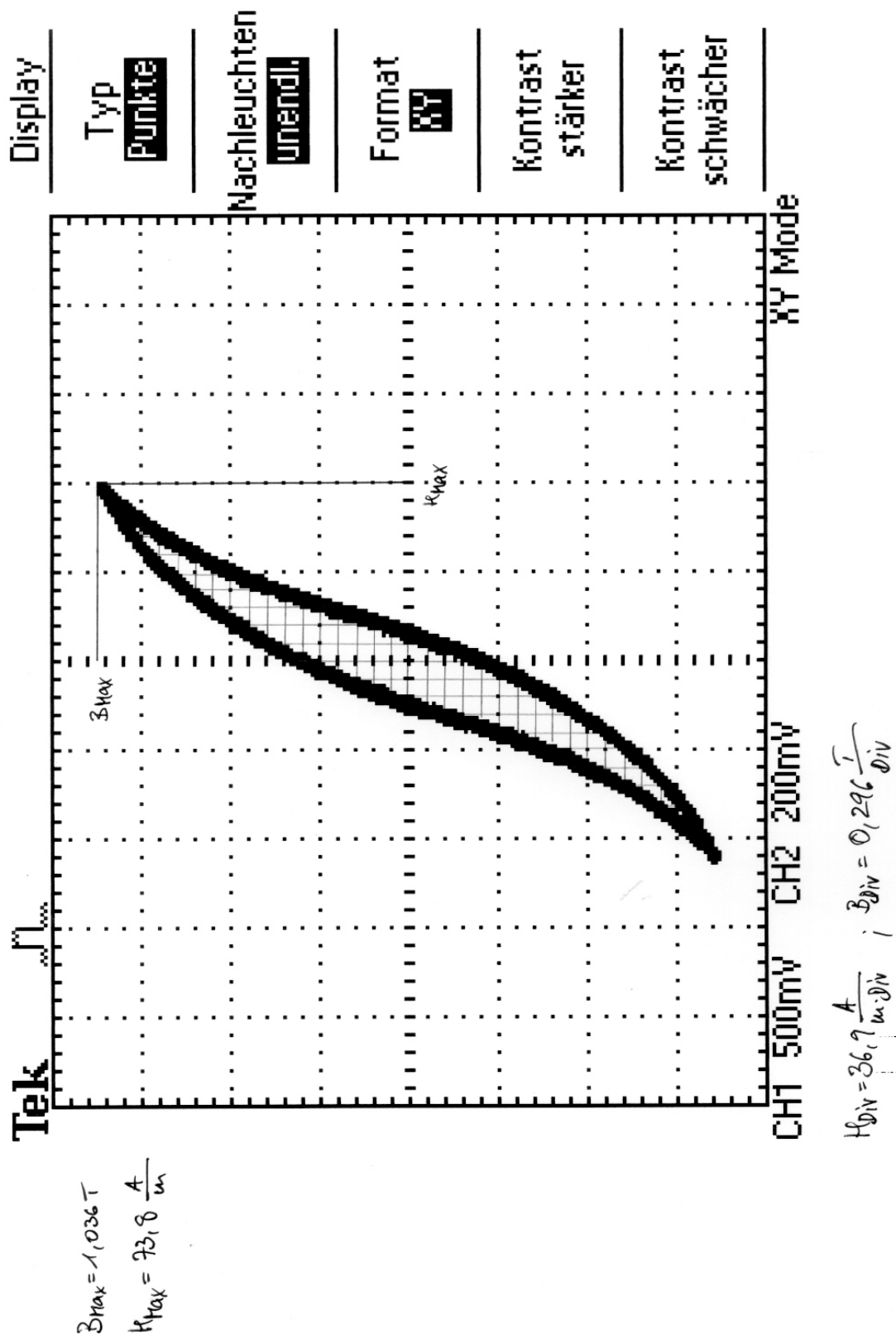






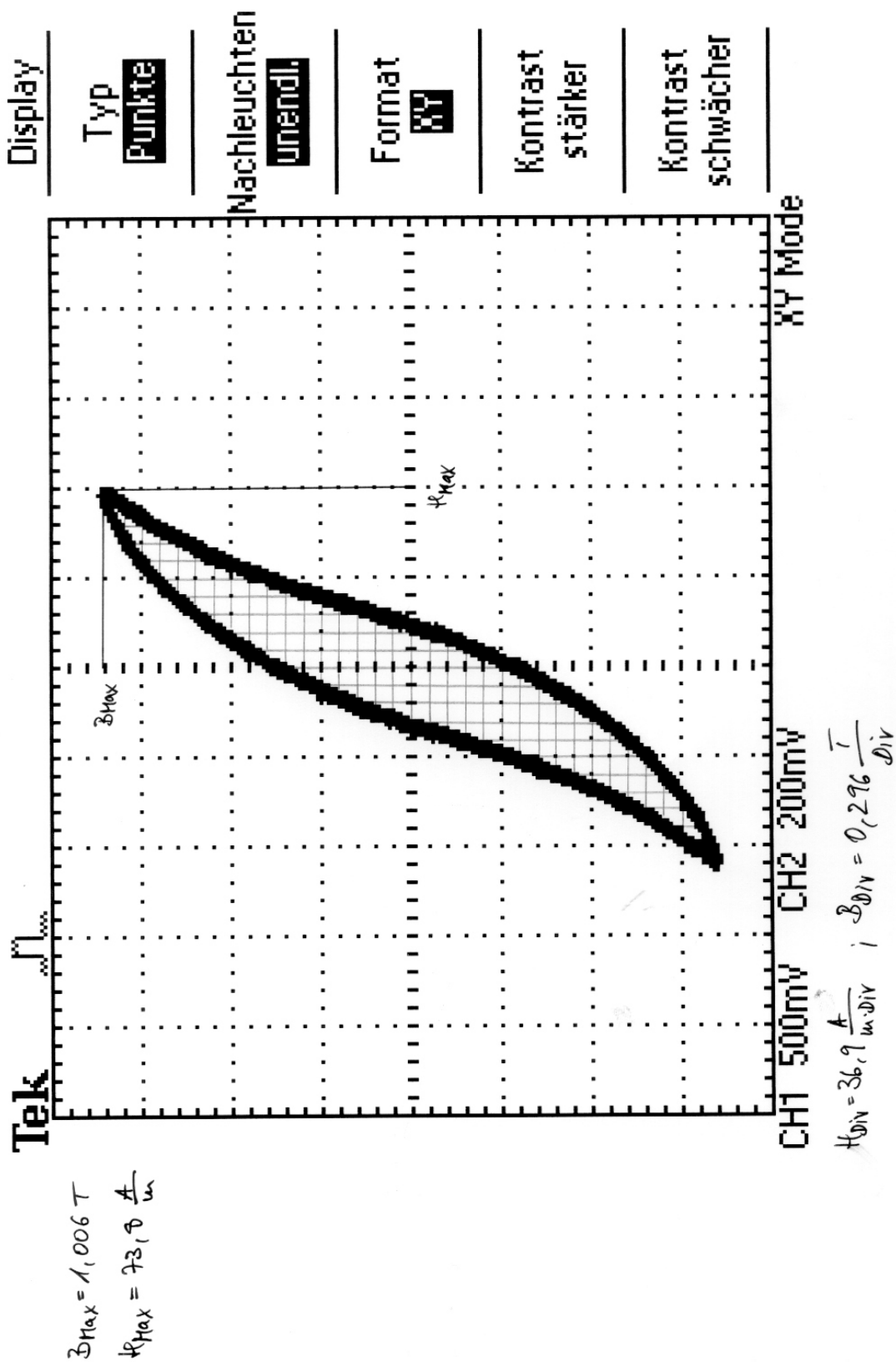
$$f = 20 \text{ kHz}$$

Graph 7



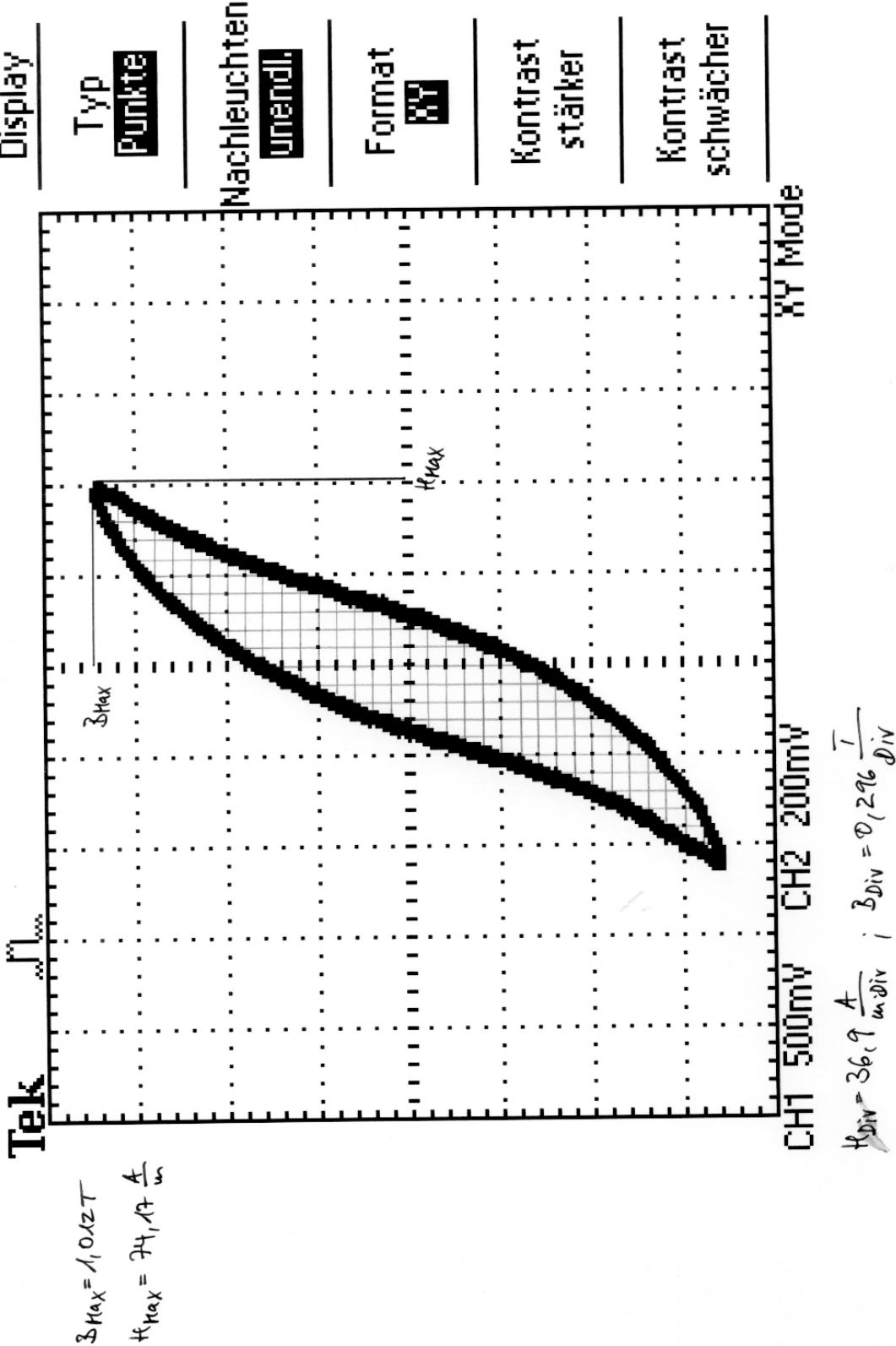
$$f = 35 \text{ Hz}$$

Graph 8



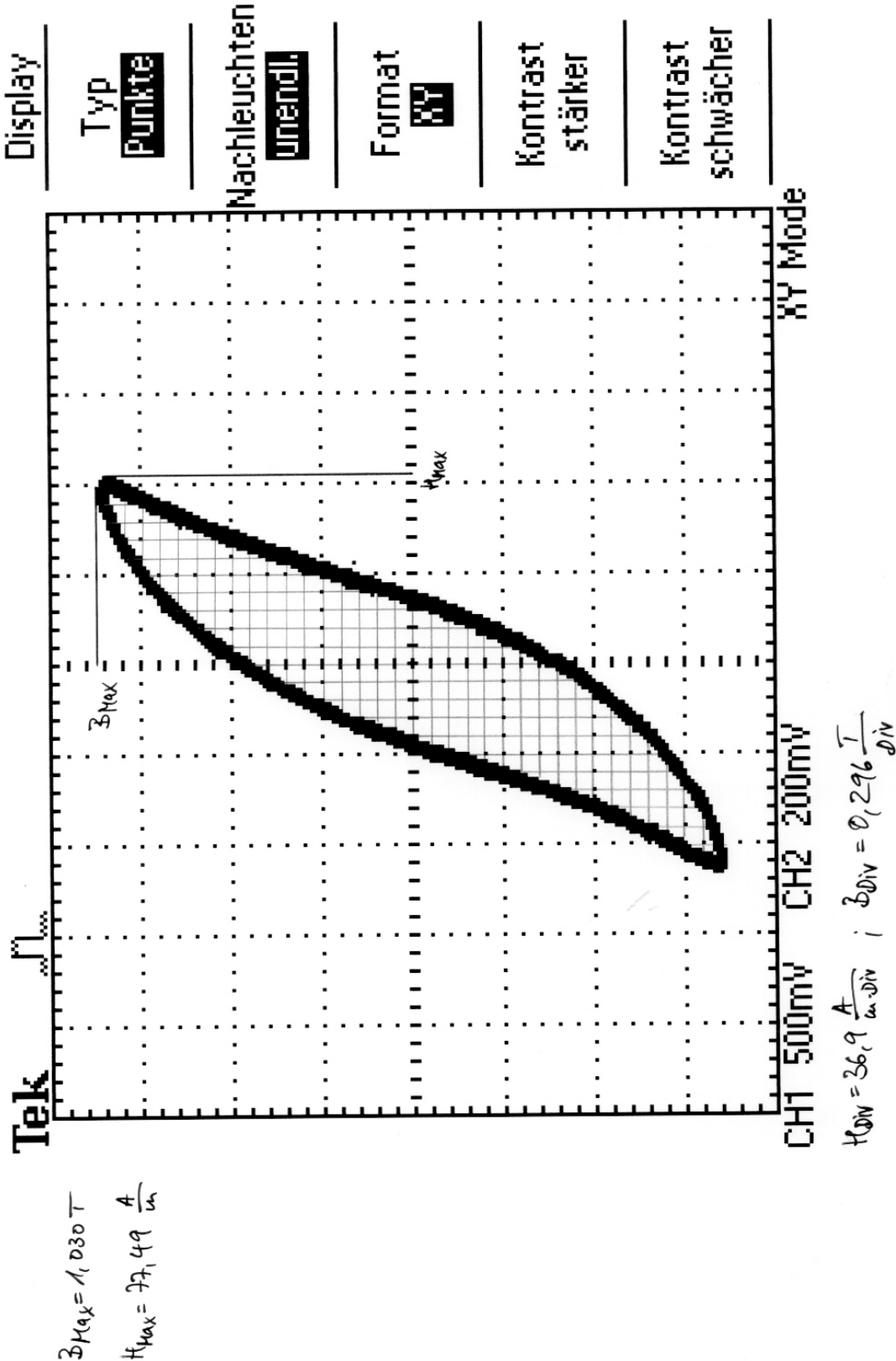
$f = 45\text{ Hz}$

Graph 9



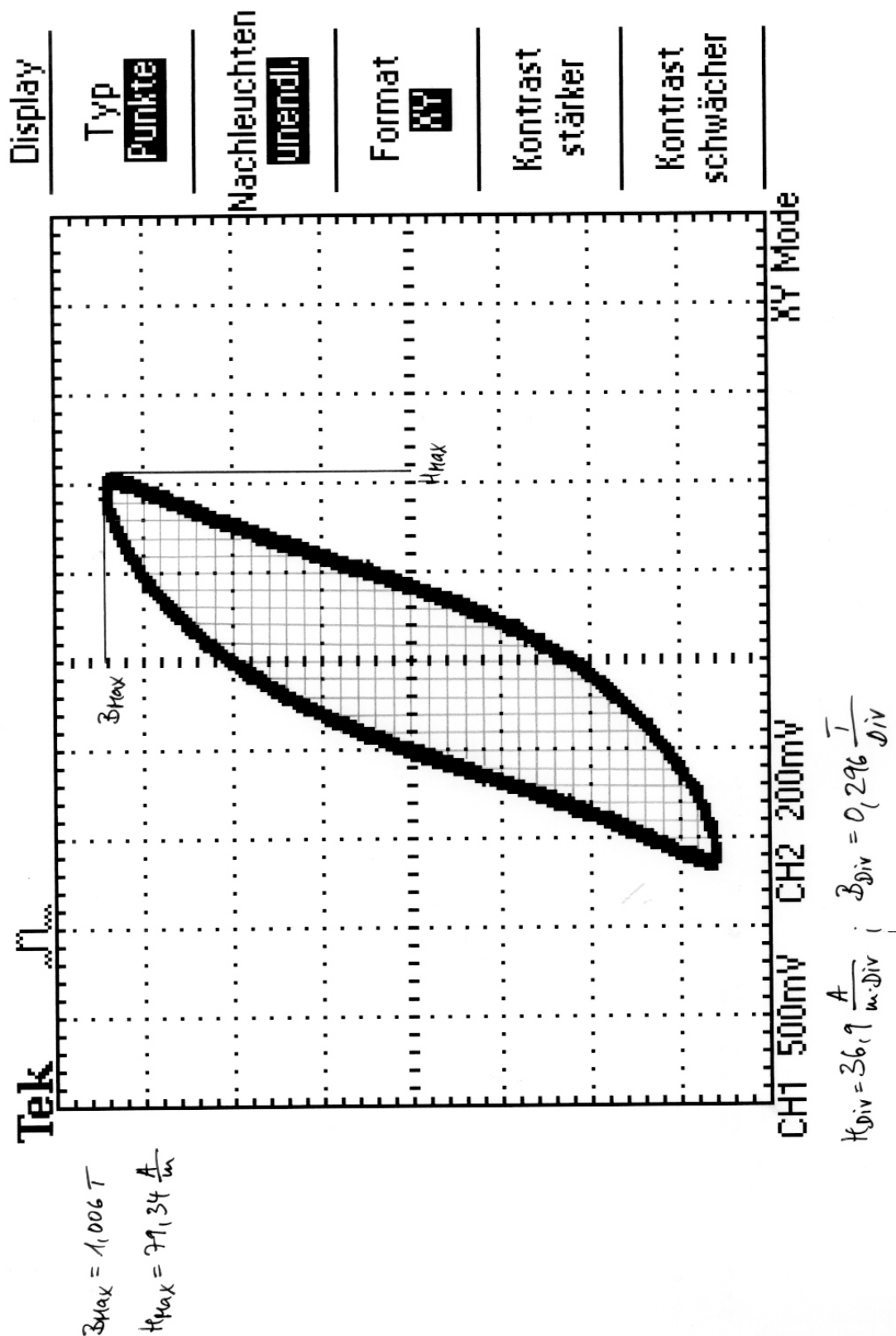
$f = 70\text{ Hz}$

Graph 10



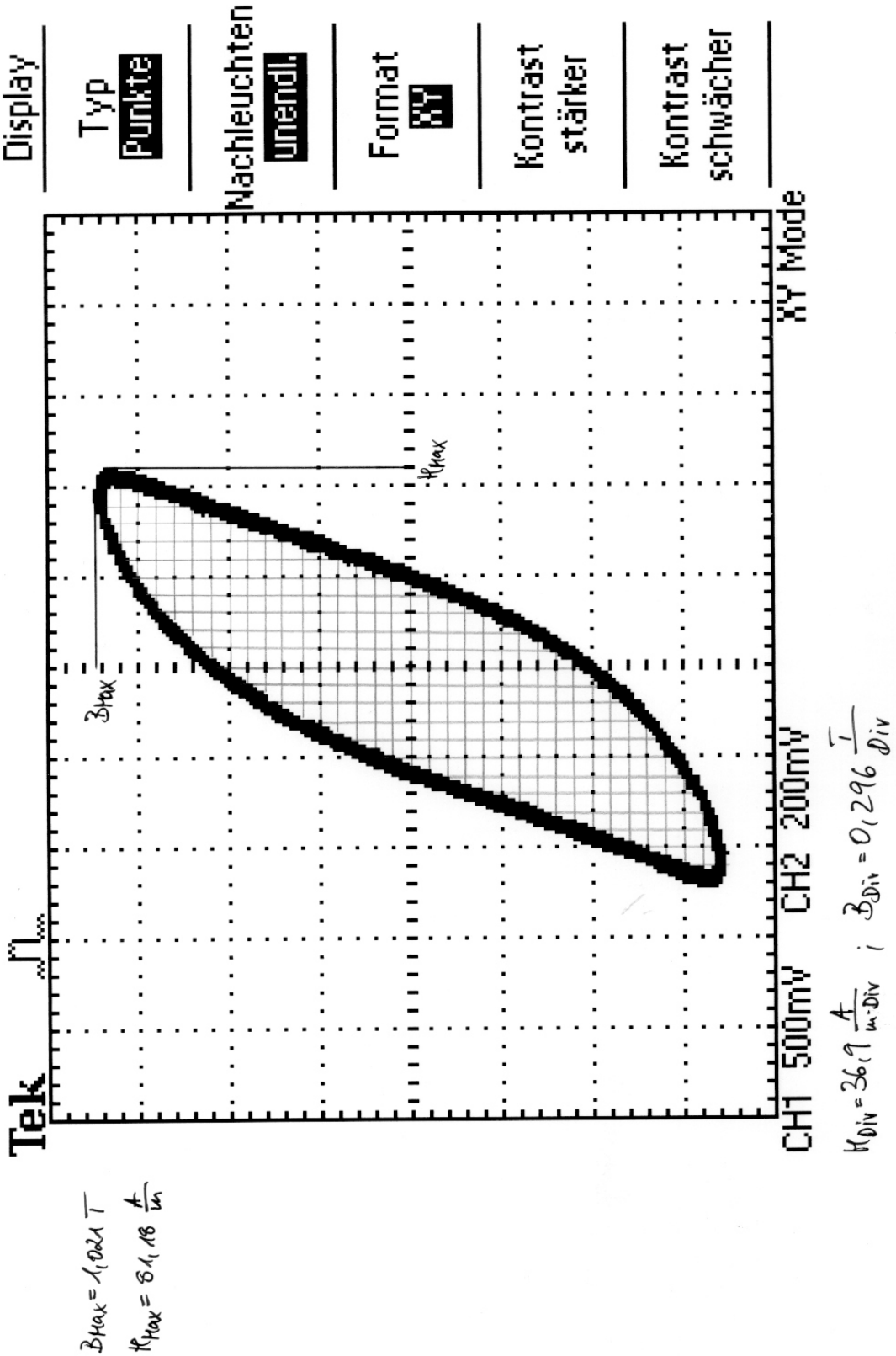
Graph 11

$$f = 90 \text{ Hz}$$



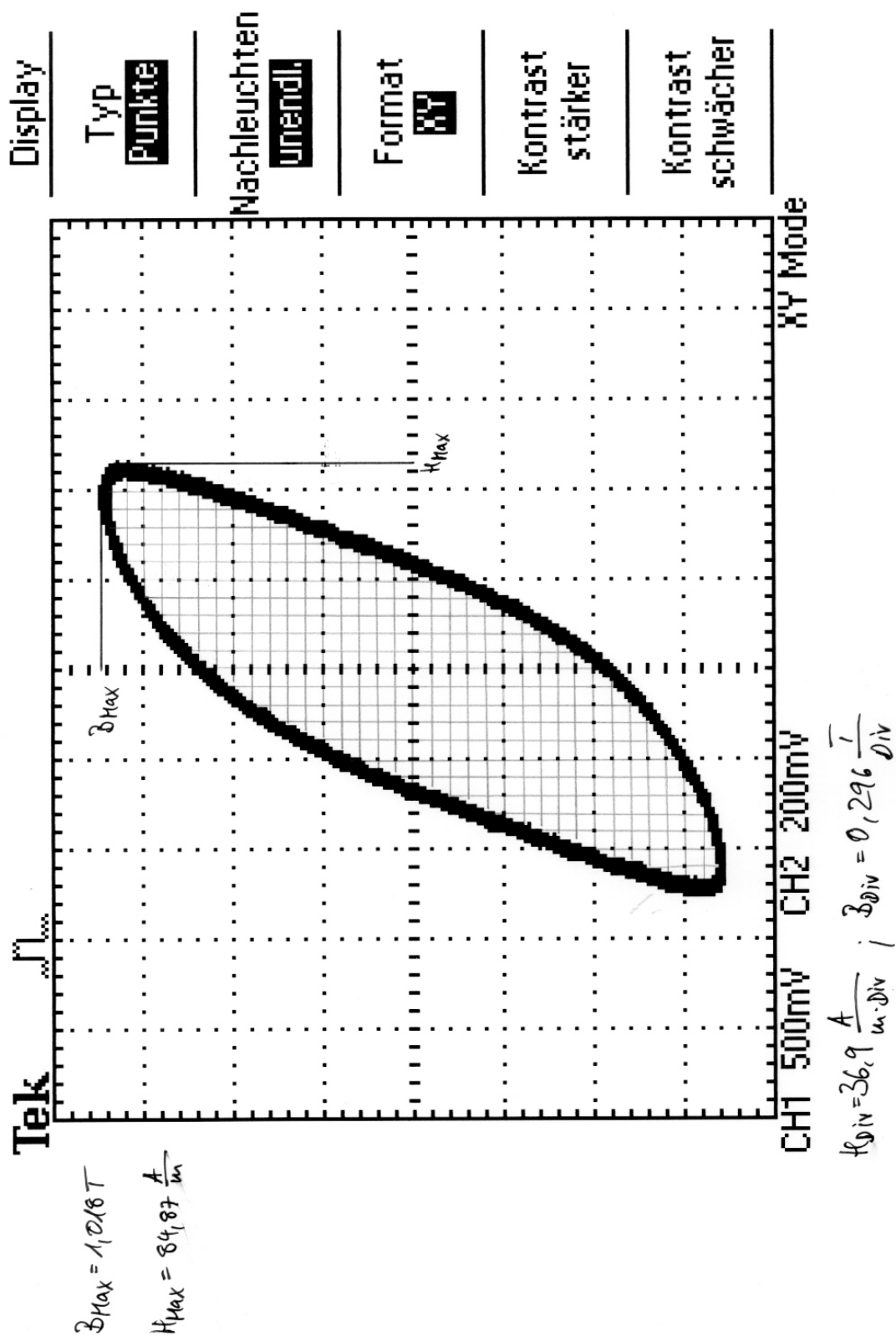
f = 120 Hz

Graph 12



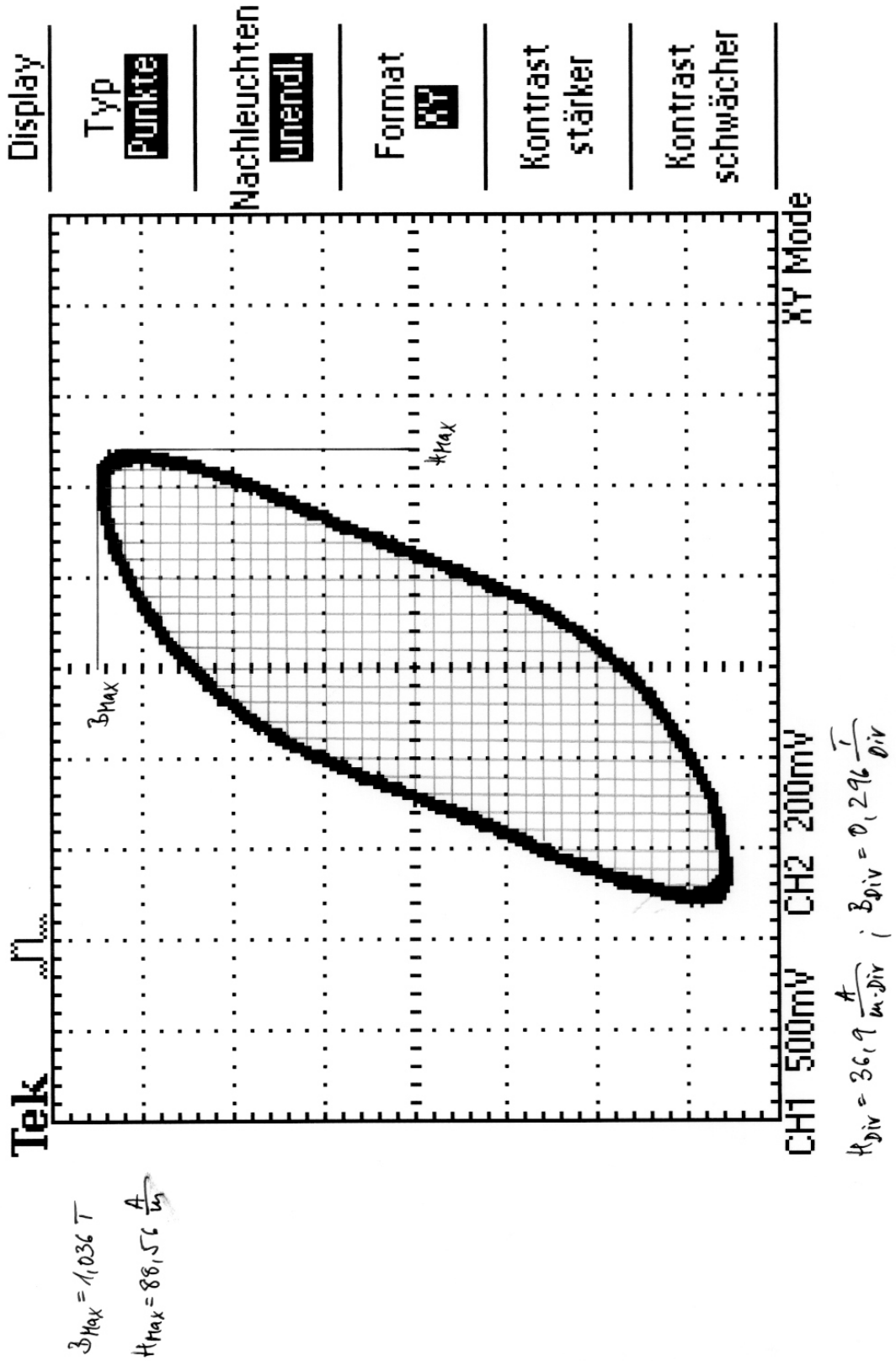
$$f = 160 \text{ Hz}$$

Graph 13



$$f = 170 \text{ Hz}$$

Graph 14



Graph 16 4.11.1.2 – Ummagnetisierungsverluste

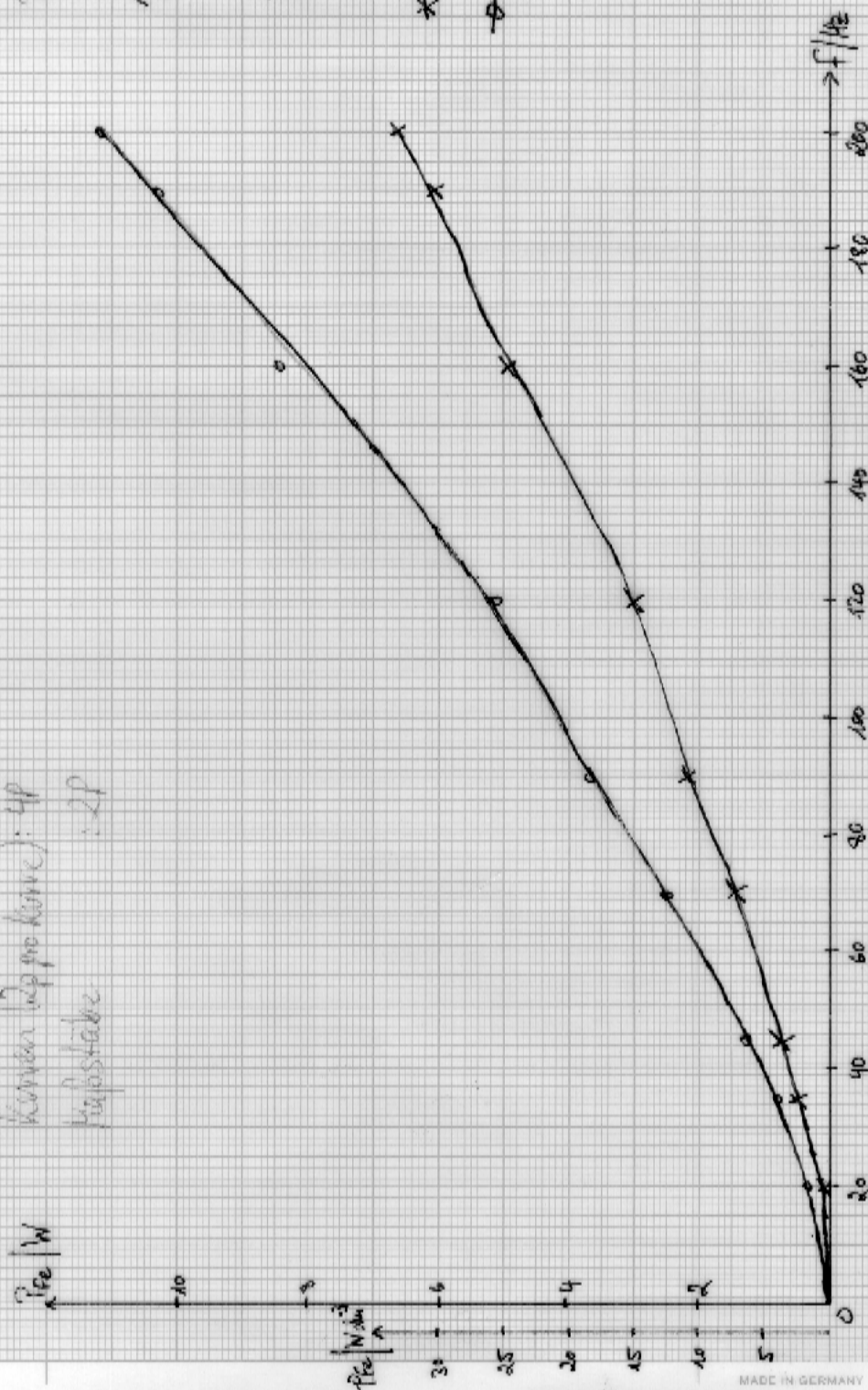
Ankerbeschäftigung: 2P
 4-Nuten (2P pro Nut): 4P
 Magnetische (2P pro Nut): 4P
 Kerne (2P pro Nut): 4P
 Kupferstäbe: 2P

$$\lambda_f = 10 \frac{\text{Hz}}{\text{cm}}$$

$$\lambda_{pFe} = 5 \frac{\text{W} \cdot \text{dm}^{-3}}{\text{cm}}$$

$$\lambda_{pFe} = 1 \frac{\text{W}}{\text{cm}}$$

* * : p_{Fe}
 o o : p_{Fe}



4.12 Variable Gegeninduktivitäten, Kopplung, Streuziffer, Ruhinduktion

Verwendete Spulen:

- Zylinderspule 1 : $l_1 = 300 \text{ mm}$, $d_1 = 43,5 \text{ mm}$, $N_1 = 1800$
- Zylinderspule 2 : $l_2 = 200 \text{ mm}$, $d_2 = 27,8 \text{ mm}$, $N_2 = 1200$, $d_{\text{Draht}} = 0,5 \text{ mm}$

1P

4.12.1 Messung der Leerlaufspannung $U_{i,34}$ bei variablem Abstand x

Verwendete Geräte:

- Funktionsgenerator FG 200
- Verstärker
- AC-Volt- und Amperemeter
- Frequenzzähler
- zwei Zylinderspulen

1P

Aufbau:

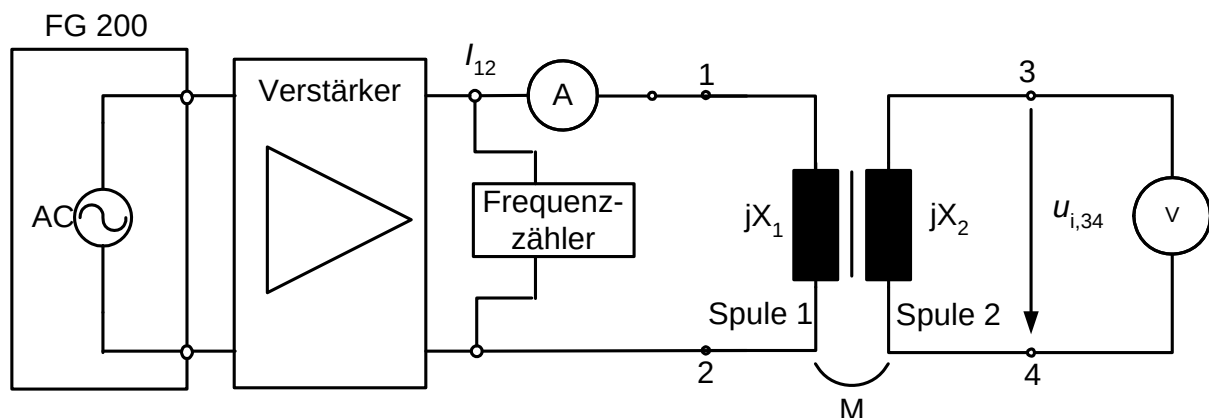


Bild 4.12-1: Schaltung zur Bestimmung der Gegeninduktivität M

Versuchsdurchführung:

Wir bauen den Versuch wie im Skript beschrieben auf, stellen den FG 200 auf Sinussignal ein und erhöhen die Amplitude solange, bis sich ein Strom von $I_{12} = 300 \text{ mA}$ einstellt. Nun messen wir die induzierte Spannung $U_{i,34}$ in Abhängigkeit des Weges x .

Frequenz = 1000 Hz

x / mm	I_{12} / mA	$U_{i,34} / \text{V}$	$M_{\text{mess}} / \text{mH}$	$M_{\text{rech}} / \text{mH}$
0	300	7,9	4,19	5,492
20	298	7,48	3,99	4,943
40	300	6,75	3,58	4,394
100	300	4,38	2,32	2,746
150	300	2,41	1,28	1,373
200	300	0,59	0,31	0

1P

1P

1P

1P

Auswertung:

- 1) Berechnen Sie die aus den Messwerten die Gegeninduktivität und vergleichen Sie die mit dem theoretischen Wert unter Vernachlässigung der Streuung.

Bestimmung der Gegeninduktivitäten aus den Messwerten mit folgender Formel:

$$M_{\text{mess}} = \frac{U_i}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{i,34}}{2 \cdot \pi \cdot 1\text{kHz} \cdot 300\text{mA}}$$

1P

Bestimmung der theoretischen Werte unter Vernachlässigung der Streuung mit folgender Formel:

$$M_{\text{rech}} = \mu_0 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{A_2}{l_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{l_2}\right)$$

Der große Unterschied zwischen theoretischem und gemessenem Wert lässt sich durch die große Streuung im Luftspalt zwischen den beiden Spulen erklären.

1P

- 2) Zeichnen Sie den Verlauf von $U_{i,34} = f(x)$ in ein Diagramm.

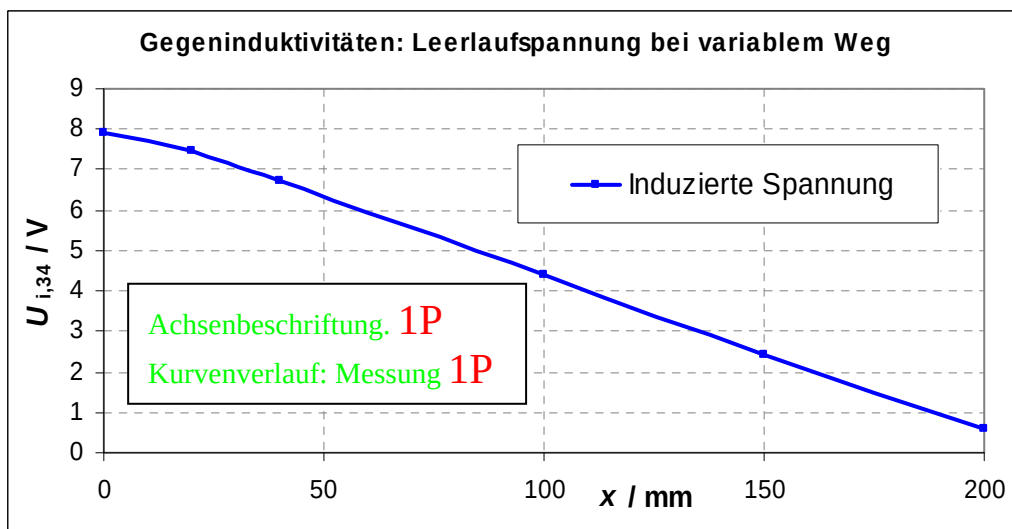


Bild 4.12-1a: Induzierte Leerlaufspannung bei variablem Abstand

4.12.2 Messung der Spuleninduktivität L_{SP1} 4.12.2.1 Bestimmung der Leerlaufinduktivität L_{SP10} (Spule 2 offen)

Verwendete Geräte:

- Funktionsgenerator FG 200
- Verstärker
- AC-Volt- und Amperemeter
- Frequenzzähler
- zwei Zylinderspulen

Aufbau:

1P

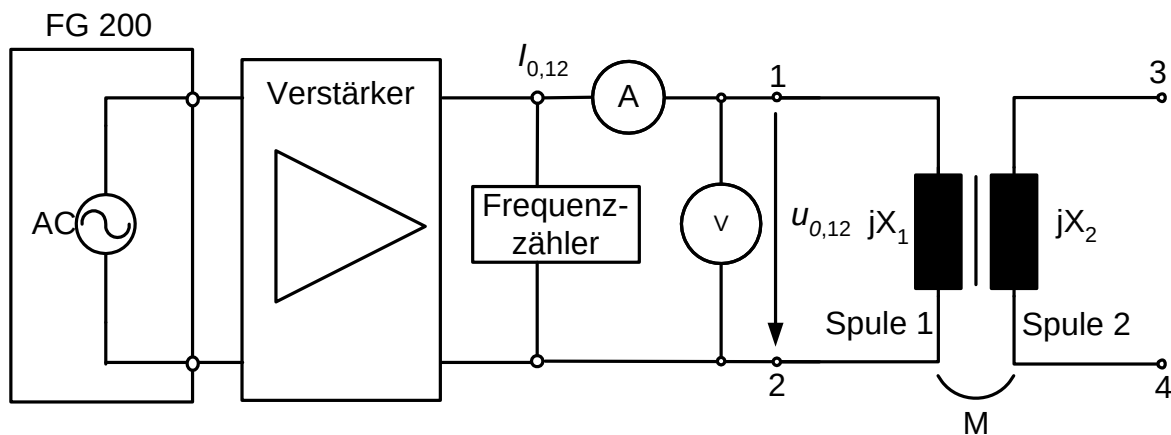


Bild 4.12-2: Schaltung zur Bestimmung der Leerlaufinduktivität L_{sp10}

Versuchsdurchführung:

Wir bauen den Versuch wie im Skript beschrieben auf, stellen den FG 200 auf Sinussignal ein, den Effektivwert der Eingangsspannung auf $U_{0,12} = 10 \text{ V}$ ein. Zu messen sind der Strom $I_{0,12}$ und die Spannung $U_{0,12}$ an der Spule 1 in Abhängigkeit der Frequenz.

$f_{\text{soll}} / \text{Hz}$	$f_{\text{ist}} / \text{Hz}$	$U_{0,12} / \text{V}$	$I_{0,12} / \text{mA}$	Z_{sp10} / Ω	L_{sp10} / mH
500	500	10,01	194	51,59	15,181
1000	1003	10,06	103	97,669	15,180
2000	2006	10,01	51	196,077	15,47
5000	5008	9,99	18	555	17,62

1P

1P

Auswertung:

1) Berechnen Sie die Impedanz Z_{sp10} aus den gemessenen Werten und die Spuleninduktivität L_{SP10} .

Berechnung der Impedanz Z_{sp10} aus den gemessenen Werten:

$$Z_{sp10} = \frac{U_{0,12}}{I_{0,12}}$$

Durch Umformung der Formel

$$Z_{sp10} = \sqrt{R_{SP1}^2 + \omega^2 \cdot L_{SP10}^2} \quad \text{mit } R_{sp1}=19,67 \Omega$$

erhält man die Formel für die Spuleninduktivität L_{sp10} :

$$L_{SP10} = \sqrt{\frac{Z_{sp10}^2 - R_{SP1}^2}{\omega^2}}$$

4.12.2.2 Bestimmung der Kurzschlussinduktivität L_{sp1ks} (Spule 2 kurzgeschlossen)

Aufbau:

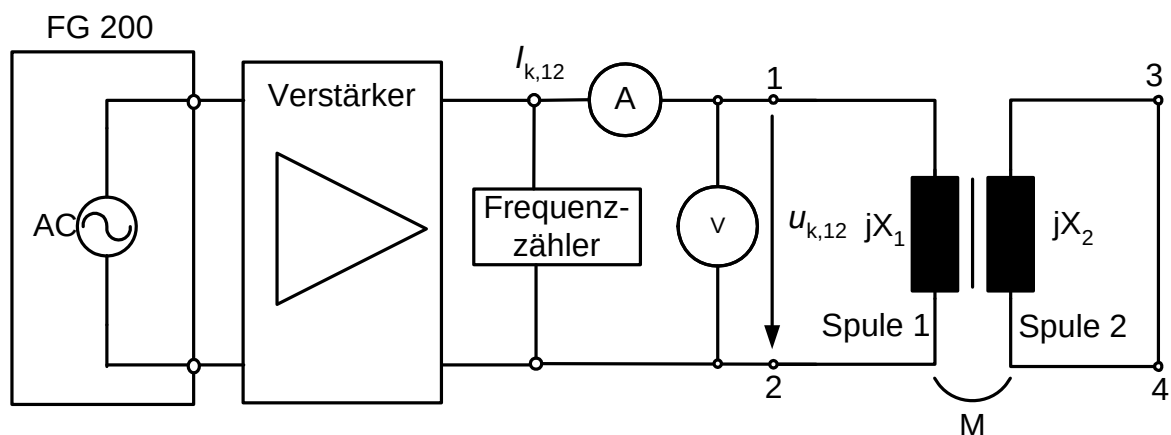


Bild 4.12-2a: Schaltung zur Bestimmung der Kurzschlußinduktivität L_{sp1ks}

Versuchsdurchführung:

Alles ist analog zu dem Versuch davor, aber die Sekundärspule befindet sich nun im Kurzschluss.

$f_{\text{soll}} / \text{Hz}$	$f_{\text{ist}} / \text{Hz}$	$U_{k,12} / \text{V}$	$I_{k,12} / \text{mA}$	Z_{sp1ks} / Ω	L_{sp1ks} / mH
500	501	10	216	46,29	13,31
1000	1006	9,99	133	75,11	11,46
2000	2000	9,99	72	138,75	10,92
5000	5000	10,03	28	358,21	11,38

1P

1P

Auswertung:

- 1) Berechnen Sie die Impedanz Z_{sp1ks} aus den gemessenen Werten und die Spuleninduktivität L_{sp1ks} .

$$Z_{Sp1ks} = \frac{U_{k,12}}{I_{k,12}} ; L_{Sp1ks} = \sqrt{\frac{Z_{Sp1k}^2 - R_{Sp1}^2}{\omega^2}} \quad \text{mit } R_{Sp1}=19,67 \Omega$$

4.12.2.3 Bestimmung des Streufaktors σ_1

Auswertung:

1) Berechnen Sie die Streuziffer σ_1

Mit der Formel

$$\sigma_1 = \frac{L_{SP1Ks}}{L_{SP10}}$$

und den Ergebnissen von den Teilaufgaben 4.12.2.1 und 4.12.2.2 wird der Streufaktor σ_1 berechnet und in die Tabelle eingetragen.

L_{SP1Ks}	L_{SP10}	σ_1
13,31	15,181	0,876
11,46	15,180	0,754
10,92	15,47	0,705
11,38	17,62	0,645

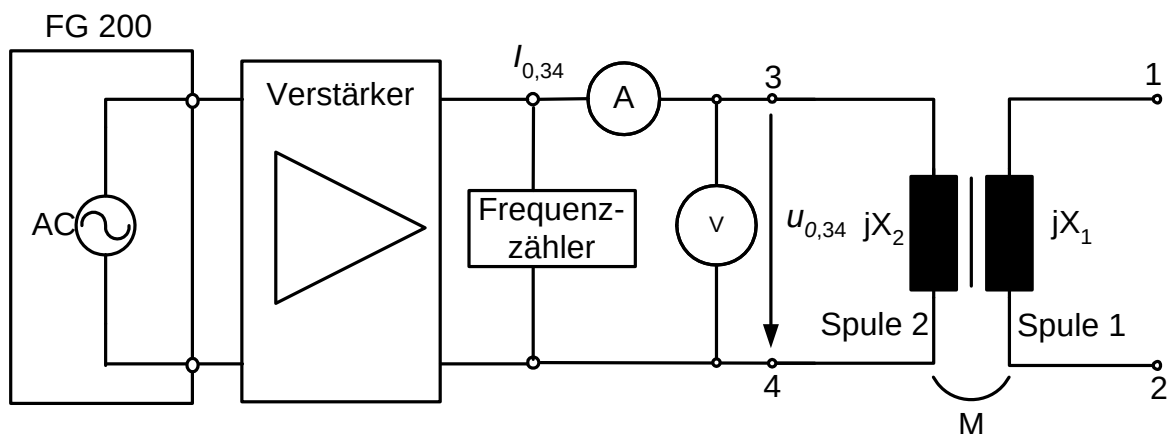
1P

4.12.3 Messung der Spuleninduktivität L_{SP20} (Spule 1 offen)

Verwendete Geräte:

- Funktionsgenerator FG 200
- Verstärker
- AC-Volt- und Amperemeter
- Frequenzzähler
- zwei Zylinderspulen

Aufbau:



1P

Bild 4.12-3: Schaltung zur Bestimmung der Leerlaufinduktivität L_{sp20}

Versuchsdurchführung:

Wir bauen den Versuch wie im Skript beschrieben auf, stellen den FG 200 auf Sinussignal und den Effektivwert der Eingangsspannung auf $U_{0,34} = 5 \text{ V}$ ein. Zu messen sind der Strom $I_{0,34}$ und die Spannung $U_{0,34}$ bei Spule 2 in Abhängigkeit der Frequenz.

$f_{\text{soll}} / \text{Hz}$	$f_{\text{ist}} / \text{Hz}$	$U_{0,34} / \text{V}$	$I_{0,34} / \text{mA}$	$Z_{\text{sp}20} / \Omega$	$L_{\text{sp}20} / \text{mH}$
500	500	5	332	15,06	3,93
1000	1004	5,01	189	26,5	3,97
2000	2000	5	98	51,02	4
5000	5006	5	38	131,57	4,17

1P

1P

Auswertung:

- 1) Berechnen Sie die Impedanz $Z_{\text{sp}10}$ aus den gemessenen Werten und die Spuleninduktivität $L_{\text{SP}20}$.

$$Z_{\text{sp}20} = \frac{U_{0,34}}{I_{0,34}} ; L_{\text{sp}20} = \sqrt{\frac{Z_{\text{sp}20}^2 - R_{\text{sp}2}^2}{\omega^2}} \text{ mit } R_{\text{sp}2} = 8,59 \Omega$$

- 2) Berechnen Sie die Streuziffer σ_2

Mit den Ergebnissen von 4.12.1, 4.12.2.1 und 4.12.3 berechnen wir die Streuziffer für 1 kHz.

$$\sigma_2 = 1 - \frac{M^2}{L_{\text{SP}10} \cdot L_{\text{SP}20}}$$

M / mH	$L_{\text{sp}10} / \text{mH}$	$L_{\text{sp}20} / \text{mH}$	σ_2
4,19	15,18	3,97	0,71

1P

4.13 Vergleichen der Ergebnisse

Vergleichen sie die Ergebnisse für den Streufaktor aus 4.12.2.3 und 4.12.3 für 1 kHz.

σ_1	σ_2
0,754	0,71

1P

Die gemessene Streuziffer σ_1 (4 Messgrößen) ist größer als gemessene Streuziffer σ_2 (6 Messgrößen). Die ca. 7 % Abweichung kommt von **Messungenungenauigkeiten**. Beide Wege der Streuziffer-Bestimmung sollen zum derselben Ergebnis führen.

1P