

Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München  
 Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2  
 Blockpraktikum vom 10. Aug. bis 07. Sept. 2020

Versuch:	MAG	Gruppe:	A1						
Vorname:	Corinna Elena	Name:	Wegner						
Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!									
		Punkte der Vorbereitung:	2,0	1,6	1,2	0,8	0,4	0,0	
						1. Abgabe		2. Abgabe	
Alle Teilversuche vollständig ausgewertet?						Ja	Nein	Ja	Nein
Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?						Ja	Nein	Ja	Nein
Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?						Ja	Nein	Ja	Nein
Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?						Ja	Nein	Ja	Nein
Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?						Ja	Nein	Ja	Nein
Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?						Ja	Nein	Ja	Nein
Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?						Ja	Nein	Ja	Nein
Auswertung erhalten am:									
Auswertung zurückgegeben am:									
Nacharbeit notwendig bis:									nicht möglich
Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!									
Punkte:		Datum, Abtestat:							

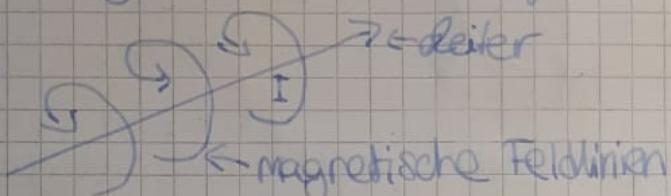
Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

# Versuch MAG - Magnetisches Feld

Corinna Elena Wagner, 14.08.2020

## a) Erzeugung und Darstellung von Magnetfeldern

Das Magnetfeld ist ein Kraftfeld, was (im Gegensatz zum Elektrischen Feld) nur auf bewegte Ladungen wirkt. So z.B. entsteht um einen Strom durch flüssigen Leiter wegen der Elektronenbewegung ein magnetisches Feld, welches durch folgende Richtung der Feldlinien ausgezeichnet ist:



Ein magnetisches Feld kann also durch Bewegung von ~~Ladungen~~ erzeugt werden. Für die Kraft die von einem magnetischen Feld ausgeht, gilt

$$\vec{F} = Q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{Lorentzkraft})$$

mit  $Q$  = Ladung  $\vec{v}$  = Geschwindigkeit der Ladung

$\vec{B}$  - magnetische Feldstärke

Für  $\vec{B}$  gilt das Amperesche Durchflutungsgesetz

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ ,  $I$  = Stromstärke,  $s$  = Linienelement einer geschlossenen Kurve),

woraus das Gesetz von Biot-Savart folgt:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \oint \frac{\vec{r}' - \vec{r}}{|\vec{r}' - \vec{r}|^3} \times d\vec{l}'$$

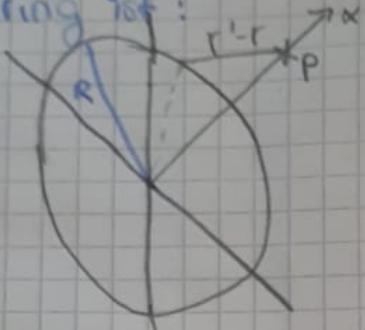
$\vec{r}$  = Ortsvektor des Punktes, an der die magnetische Feldstärke berechnet werden soll,  $\vec{r}'$  Position des Drahtelements in Höhe von dem das magn. Feld ausgeht

2

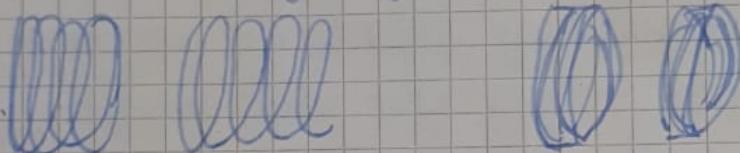
Für das Feld eines Stromdurchflossenen Kreisrings gilt nach dem Biot-Savart-Gesetz

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{R^2 I}{(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

wobei  $x$  die Entfernung vom Punkt  $P$  auf der zum Kreisring ist:



Eine Helmholtzspule besteht aus zwei Spulen mit je  $N$  Windungen, die wie folgt angeordnet sind:

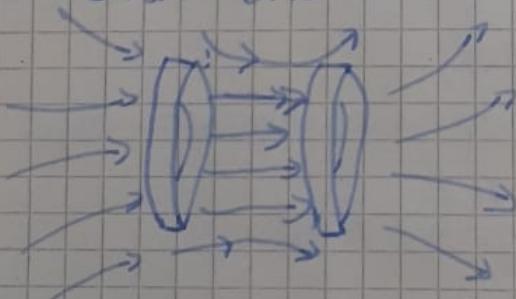


Im Zwischenraum ist das Feld nahezu homogen. Es gilt

$$\mathbf{B} = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{NI}{R}$$

mit  $R$  = Radius des Kreisrings der Spulen

Das Feldlinienbild sieht so aus:



Im Zwischenraum der Spulen ist das magnetische Feld nahezu homogen, das bedeutet die Feldlinien verlaufen parallel und sind im gleichen Abstand

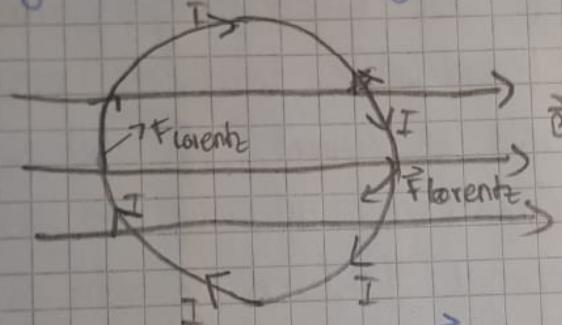
## Lorentzkraft

Auf elektrische, bewegte Ladungen wirkt die Lorentzkraft (siehe oben). Überträgt man dieses Gesetz auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld folgt

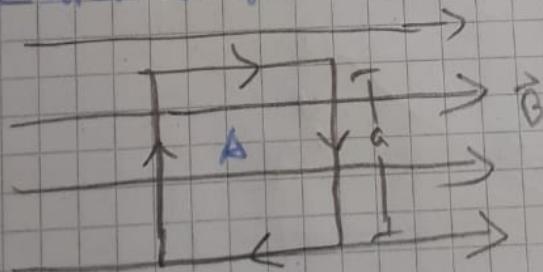
$$\vec{F} = I(\vec{s} \times \vec{B})$$

wobei  $\vec{s}$  = Länge des Leiters im Magnetfeld

Bewegen sich Elektronen in einem Kreisring, welcher sich in einem  $\vec{B}$ -Feld befindet so bewirkt die magnetische Kraft auf die Elektronen ein Drehmoment  $\vec{\tau}$  auf den gesamten Kreisring:



Um eine Gleichung für  $\vec{\tau}$  herzuleiten sei ferner betrachtet  
wir eine stromdurchflossene Quadrat im  $\vec{B}$ -Feld



nach der Lorentzkraft und den Regeln für das Kreuzprodukt gilt auf die zu  $\vec{B}$  parallelen Achsen keine Kraft auf die sich darin befindenden Elektronen. Für den anderen Fall gilt für das ablenkende Drehmoment  $\tau = IAB \sin \alpha$

$$\tau = IAB \sin \alpha$$

$$\tau = IIA B \sin \alpha$$

mit  $I$  = Stromstärke,  $A$  = Querflächenfläche,  $B$  = magnetisches Feld,  $N$  = Stärke und,  $\alpha$  = Drehwinkel des Quadranten.  $N$  = Dazu bezeichnen wir Anzahl Windungen der Spule.

Dabei bezeichnen wir

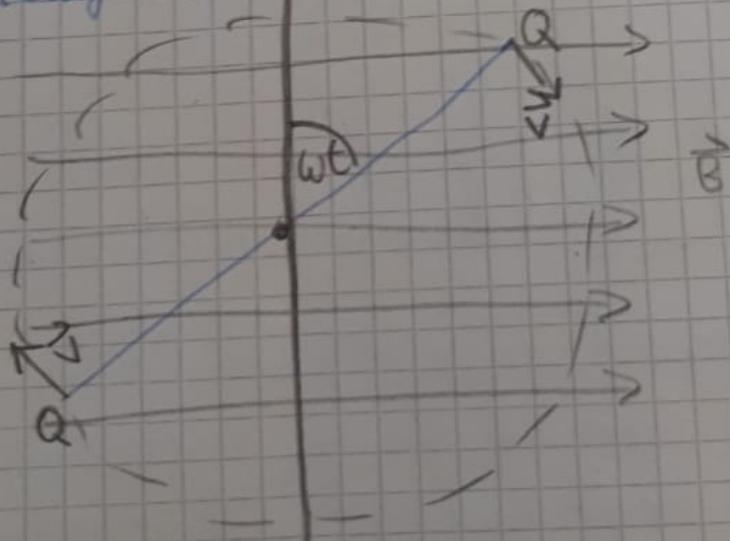
$$m = N \cdot I \cdot A$$

als das magnetische Dipolmoment. Insgesamt folgt

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

Induktion an einer bewegten Leiterschleife

Bewegt (z.B. Rotation) man einen Leiter im Magnetfeld, so wirken auf die Ladungsträger im Leiter Lorentzkraft. Dadurch verschieben sich die Ladungen und es kommt ggf. auf einer Seite ein Elektronenüberschuss und auf der anderen Seite ein Elektronenmangel. Dadurch entsteht eine Spannung, die sog. Induktionsspannung. Die folgende Abbildung verdeutlicht dies:



(Leiterschleife von oben)

Die Induktionsspannung kann berechnet werden über die Arbeit, die die Lorentzkraft an den Ladungsträgern leistet:

5

$$W = QBAw \sin(\omega t)$$

Mit  $W = Q U$  folgt

$$U_{\text{ind}} = BAw \sin(\omega t) \quad \text{abwechselnd}$$

Weil  $U$  mit der Zeit <sup>positiv</sup> und negativ wird (wegen dem Sinus), wird  $U_{\text{ind}}$  auch Wechselspannung genannt.

Mit einem solchen Aufbau kann auch das B-F Magnetfeld bestimmt werden, in dem man <sup>von</sup>  $U_i(t)$  die Amplitude  $\hat{U}_i = NBAtw$  bestimmt und dann

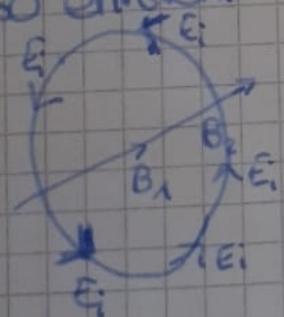
$$\hat{B} = \frac{\hat{U}_i}{NAw}$$

anwendet.

Induktion durch Änderung des Magnetfelds

Wir wissen nun, dass ein Strom ein Magnetfeld erzeugt. Ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld kann aber genauso einen Strom hervorrufen, weil durch die Änderung vom Magnetfeld sozusagen eine Relativbewegung der Ladungsträger zum Magnetfeld besteht. Dadurch werden die Ladungsträger gemäß <sup>Lorentzkraft</sup> ~~Induktionsgesetz~~ abgelenkt.

Ändert man das B-Feld innerhalb einer Leiterschleife so entsteht folgendes induziertes elektr. Feld:



5.5

Für die Induktionsspannung gilt in diesem Fall

$$U_i = -\vec{A} \frac{d\vec{\Phi}}{dt}$$

wobei  $\vec{A}$  die vom  $\vec{B}$ -Feld durchströmte Fläche ist, die durch die Leiterschleife eingeschlossen ist.

Dies ist das Induktionsgesetz für ein zeitlich veränderliches Magnetfeld und einen unbewegten Leiter. Dieses liegt einem fundamentalen allgemeinen Induktionsgesetz zugrunde:

$$U_i = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

mit  $\Phi = \int \vec{B} d\vec{A}$  (magnetischer Fluss)

# MAG - Magnetisches Feld

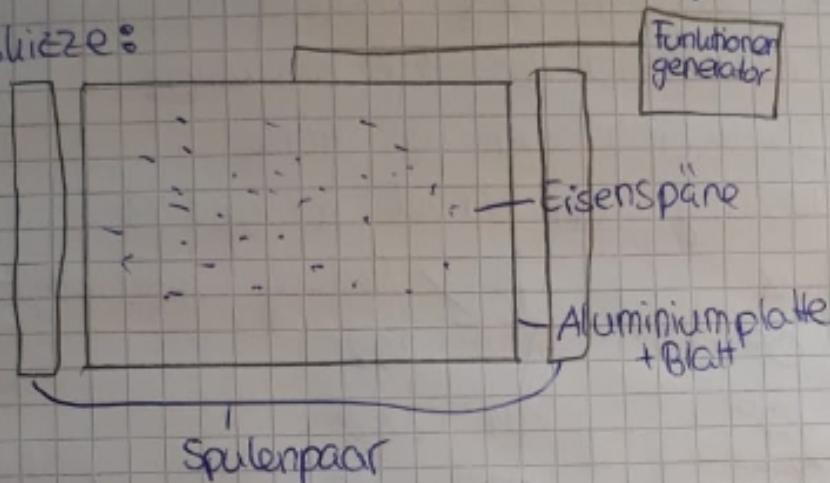
6

## Versuchsdurchführung

Teilversuch 1: Sichtbarmachung der Magnetfeldlinien mit Hilfe von Eisenspänen

Versuchsziel: Sichtbarmachung von ~~die~~ Magnetfeldlinien

Versuchssklizze:



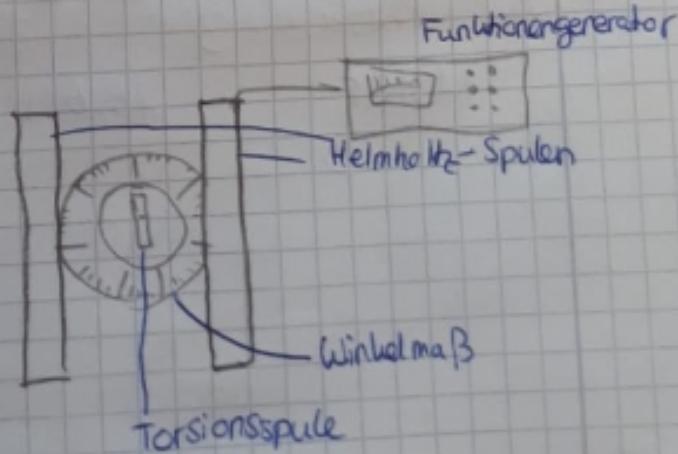
## Versuchsdurchführung

- Aufbau des Versuches
- Einschalten des Funktionengenerators ohne Feldspulenstrom
- Kontinuierliche Erhöhung des Feldspulenstromes
- Skizzierung des Feldlinienbildes mit Feldrichtung

Teilversuch 2: Drehmoment des Feldes auf eine strangstromdurchflossene Spule

Versuchsziel: Bestimmung des Drehmoments, das ein Magnetfeld auf eine strangstromdurchflossene Spule ausübt

Versuchssklizze:



7

## Versuchsdurchführung

- Aufbau des Versuchs nach Skizze
- Einschalten des Funktionsgenerators
- Einstellung von Feld- und Torsionsspulenstrom auf den Maximalwert
- Ausschalten des Torsionsspulenstroms und
- Ausrichten des Flächenvektors
- Wiedereinschalten der Ströme
- Messung von Winkel  $\alpha$  und  $\beta$

$\alpha$	$\beta$	Messung wiederholt, Ha Torsions- spule ausgetauscht
0°	102°	292°
10°	114°	282°
20°	123°	275°
30°	133°	265°
40°	253°	
50°	242°	
60°	231°	
70°	223°	
80°	217°	
90°	202°	

Fehler für  $\alpha$ :  $\Delta\alpha = \pm 2^\circ$

Fehler für  $\beta$ :  $\Delta\beta = \pm 1^\circ$

Zu Teilversuch 3

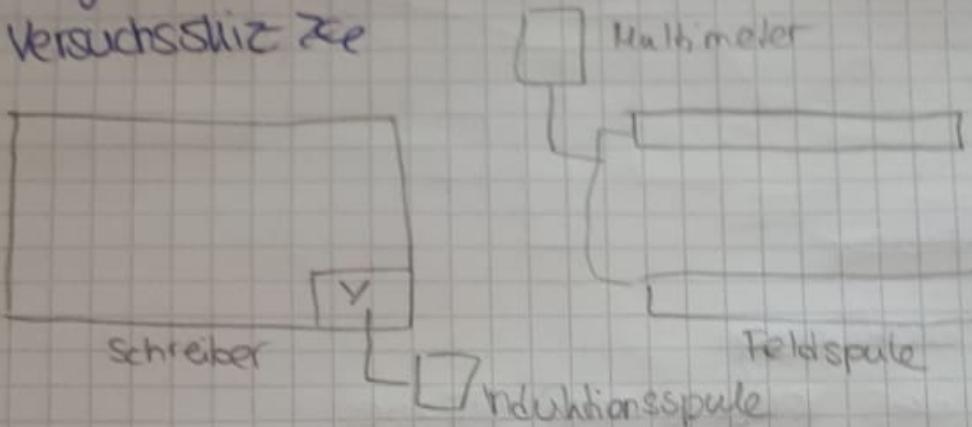
Motor: 16,6 Umdrehungen/min bei 60 Hz



### Teilversuch 3 Induktion durch Drehen einer Spule in einem Magnetfeld

Versuchsziel: Erzeugung einer Induktionsspannung in einer ~~AC~~ Spule in einem zeitlich konstanten Magnetfeld

Versuchsskizze



### Versuchsdurchführung

- Vorbereitung der Apparatur nach Skizze

- Einschalten der Induktionsspule und des Funktionengenerators

- Einstell-Einsstellen eines Feldstromes so dass die Y-Ablenkempfindlichkeit möglichst klein ist

$I_{\text{F}} = 1,205 \text{ A}$

- Zeichnung der Nulllinie für die induzierte Spannung

- Zeichnung der Induktionsspannung für den Ablenkfaktor

$1 \frac{\text{s}}{\text{cm}}$  für  $x$ -Achse

- Schreiberstellung:  $0,1 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$  für  $y$ -Achse

- Induktionsspule

$$A = 23,5 \text{ cm}^2$$

$$N_{\text{ind.}} = 82800$$

- Helmholtzspulen

$$N_{\text{Helmholz}} = 528$$

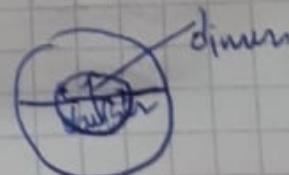
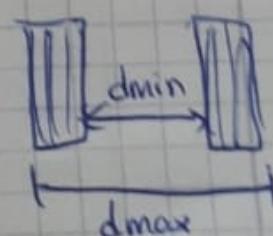
$$\text{Außerer Abstand } d_{\text{max}} = (7,8 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$\text{Innerer Abstand } d_{\text{min}} = (10,7 \pm 0,2) \text{ cm}$$

Durchmesser der Spulen

$$\text{daußen} = (30,2 \pm 0,2) \text{ cm}$$

$$\text{drinnen} = (27,7 \pm 0,2) \text{ cm}$$

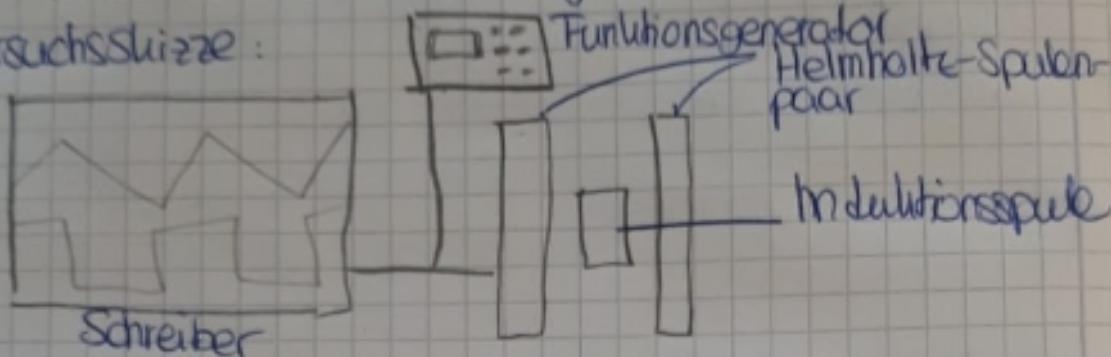


9

Teilversuch 4: Induktion durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld

Versuchsziel: Erzeugung einer Induktionsspannung durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld

Versuchsskizze:



Versuchsdurchführung

- Aufbau des Versuchs nach Skizze
- Einstellung des Funktionsgenerators auf Dreieck
- Einstellung einer Periodendauer von  
 $T = (18,5 \pm 0,3)\text{s}$
- Verbinden des Schreibers mit der Feldspule  
Verwendeter Widerstand  $R = (9100 \pm 0,001) \Omega$
- Ablenkfaktor  $20\text{mV/cm}$  für Y-Achse
- Einstellung der Amplitude der Dreiecksfunktion
- Einschalten des Feldstromes
- Mess Zeichnung von 5 verschiedenen Stromverläufen mit den dazugehörigen Induktionsspannungsverläufen mit dem Schreiber
- Ablenk sensitivität:  $1\text{s/cm}$  für t-Achse

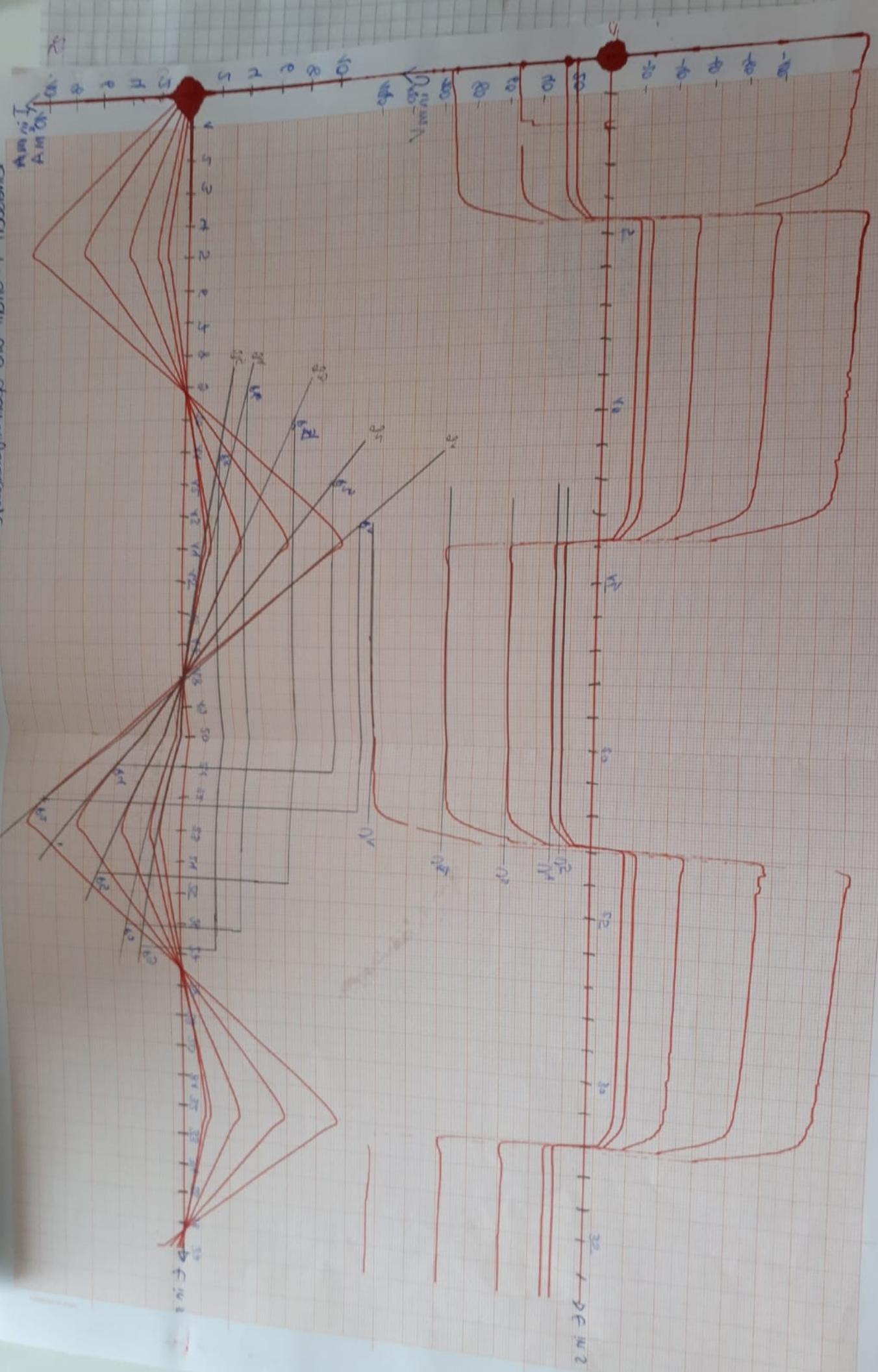
LMU München  
Physikalische Praktika

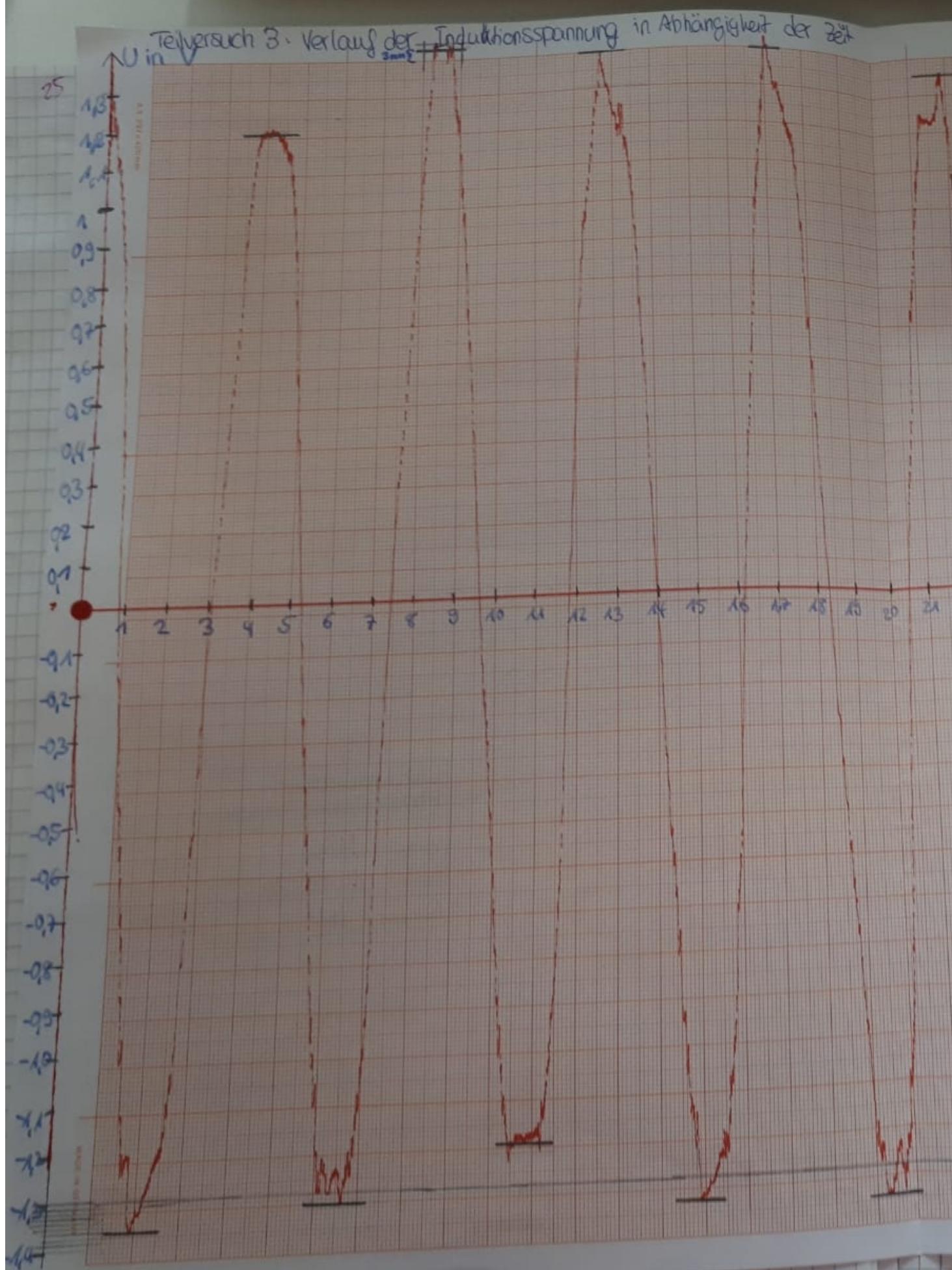
Versuch: MAG

Datum: 14.08.20

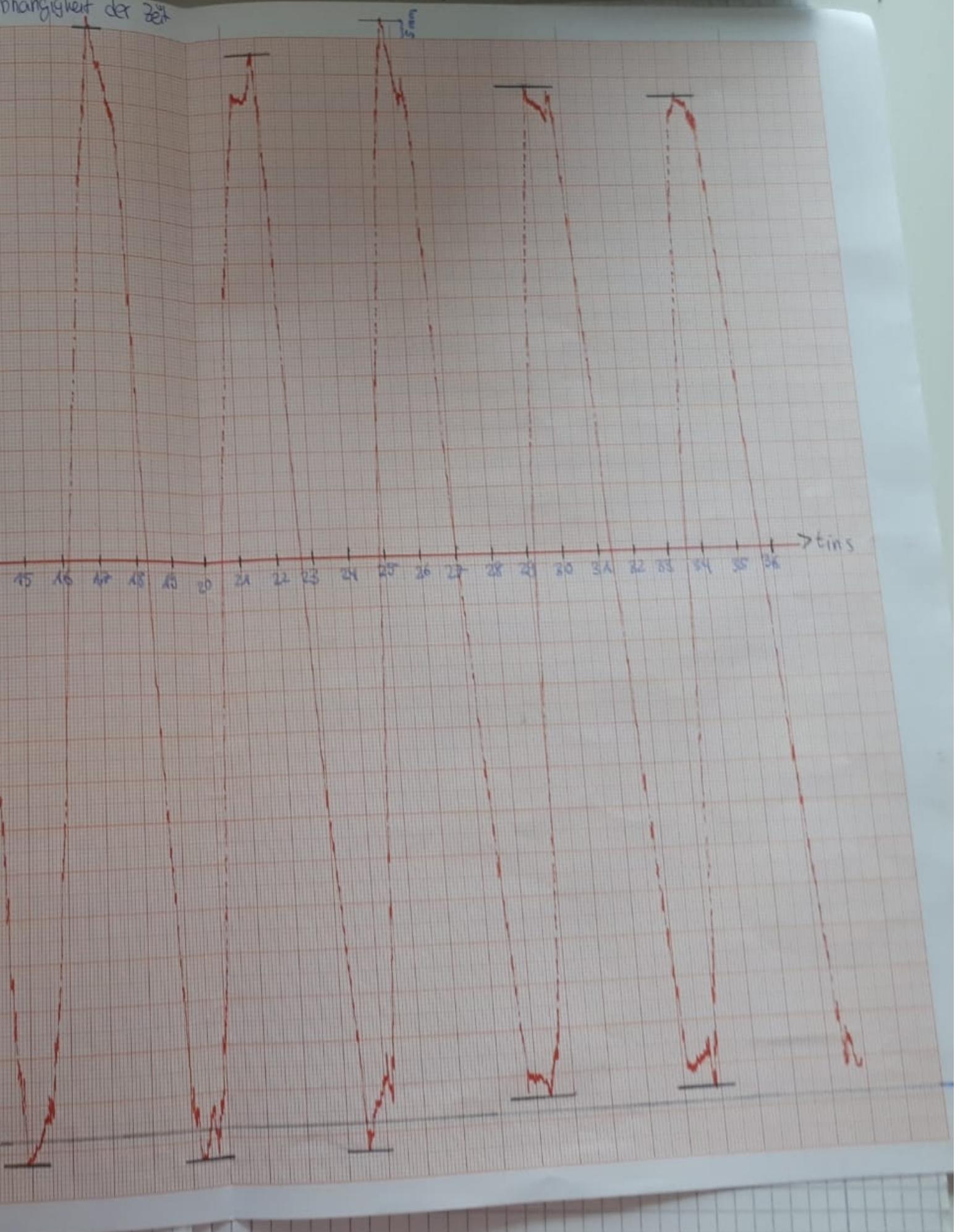
Betreuer: Hof

Diagramm für: Größe und Stützmauerdruck





abhängigkeit der Zeit



# Auswertung MAG - Magnetische Felder

Teilversuch 2: Drehmoment eines Feldes auf eine stromdurchflossene Spule

Laut Skript gilt für den Torsionswinkel  $\varphi$ :

$$\varphi = \alpha - \beta$$

Für  $\alpha = 0^\circ$  wurde  $\beta = 292^\circ$  gemessen. Daher subtrahieren wir von allen Messwerten von  $\beta$  noch  $292^\circ$  und nehmen jeweils den Betrag des Winkels, um den Torsionswinkel bestimmen zu können:

$\alpha$	$\beta$	$ \beta - 292^\circ $	$\alpha$	$\beta$	$ \beta - 292^\circ $
$0^\circ$	$292^\circ$	$0^\circ$	$60^\circ$	$231^\circ$	$61^\circ$
$10^\circ$	$282^\circ$	$10^\circ$	$70^\circ$	$223^\circ$	$69^\circ$
$20^\circ$	$275^\circ$	$17^\circ$	$80^\circ$	$217^\circ$	$75^\circ$
$30^\circ$	$265^\circ$	$27^\circ$	$90^\circ$	$202^\circ$	$90^\circ$
$40^\circ$	$253^\circ$	$39^\circ$			
$50^\circ$	$242^\circ$	$50^\circ$			

Tabelle wurde mit Excel erstellt (Berechnungen).  
wir berechnen nun mit  $\varphi = \alpha - \beta$  die Torsionswinkel  $\varphi$ .  
 Offenbar ~~gilt~~ wurde hier falsch gemessen (z.B. kein Torsionsspulanstrom eingeschaltet), weshalb fast immer  $\alpha \approx \beta$  ist. Die Messwerte sind daher für die Auswertung unbrauchbar und es werden andere verwendet. Grund hierfür ist, dass  $\varphi$  in allen Fällen wegen  $\varphi = \alpha - \beta$  etwa  $0^\circ$  ist. Damit ergibt sich keine Proportionalität zwischen  $\varphi$  und  $\sin \alpha$ .

11

Weiter auswerten mit den Messwerten:

$\alpha$	$\beta$	$\beta' = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} - 343,5^\circ$	$\varphi = \alpha - \beta'$
$0^\circ$	$343,5^\circ$	0	$-343,5^\circ$
$10^\circ$	$7^\circ$	0,174	$3^\circ$
$20^\circ$	$22,5^\circ$	0,342	$-2,5^\circ$
$30^\circ$	$45,5^\circ$	0,5	$-15,5^\circ$
$40^\circ$	$64,5^\circ$	0,643	$-24,5^\circ$
$50^\circ$	$83^\circ$	0,766	$-33^\circ$
$60^\circ$	$98,5^\circ$	0,866	$-38,5^\circ$
$70^\circ$	$111^\circ$	<del>0,938</del> 0,940	$-41^\circ$
$80^\circ$	$123^\circ$	0,985	$-43^\circ$
$90^\circ$	$133,5^\circ$	1	$-43,5^\circ$

Fehler

$$\Delta \alpha = 2^\circ$$

$$\Delta \varphi = 0$$

$$\Delta \beta = 0,25^\circ$$

(Fehler von  $\alpha$  soll unberücksichtigt bleiben)

Auftragen der  $\varphi$  von  $\varphi$  gegen  $\sin \alpha$

Weil  $\varphi \in (-360^\circ, 0^\circ]$ , kann man wegen  $360^\circ - 343,5^\circ = 16,5^\circ$

auch sagen, dass zu  $\alpha = 0^\circ$   $\beta = 16,5^\circ$  ist. Dadurch

kann man beim Auftragen von  $\varphi$  gegen  $\sin \alpha$  einen

größeren Platz sparen und den Graphen

die Ausgleichswerte auf das ganze

Blatt gleich aufteilen. Dann ist

$$\begin{aligned} \text{zu } \alpha = 0^\circ \quad \varphi = 0^\circ - (-16,5^\circ) &= 16,5^\circ \quad \varphi = 0^\circ - (-16,5^\circ \pm 0,25^\circ) \\ &= 16,5^\circ \pm 0,25^\circ \end{aligned}$$

- Zeichnen einer optimalen Gerade

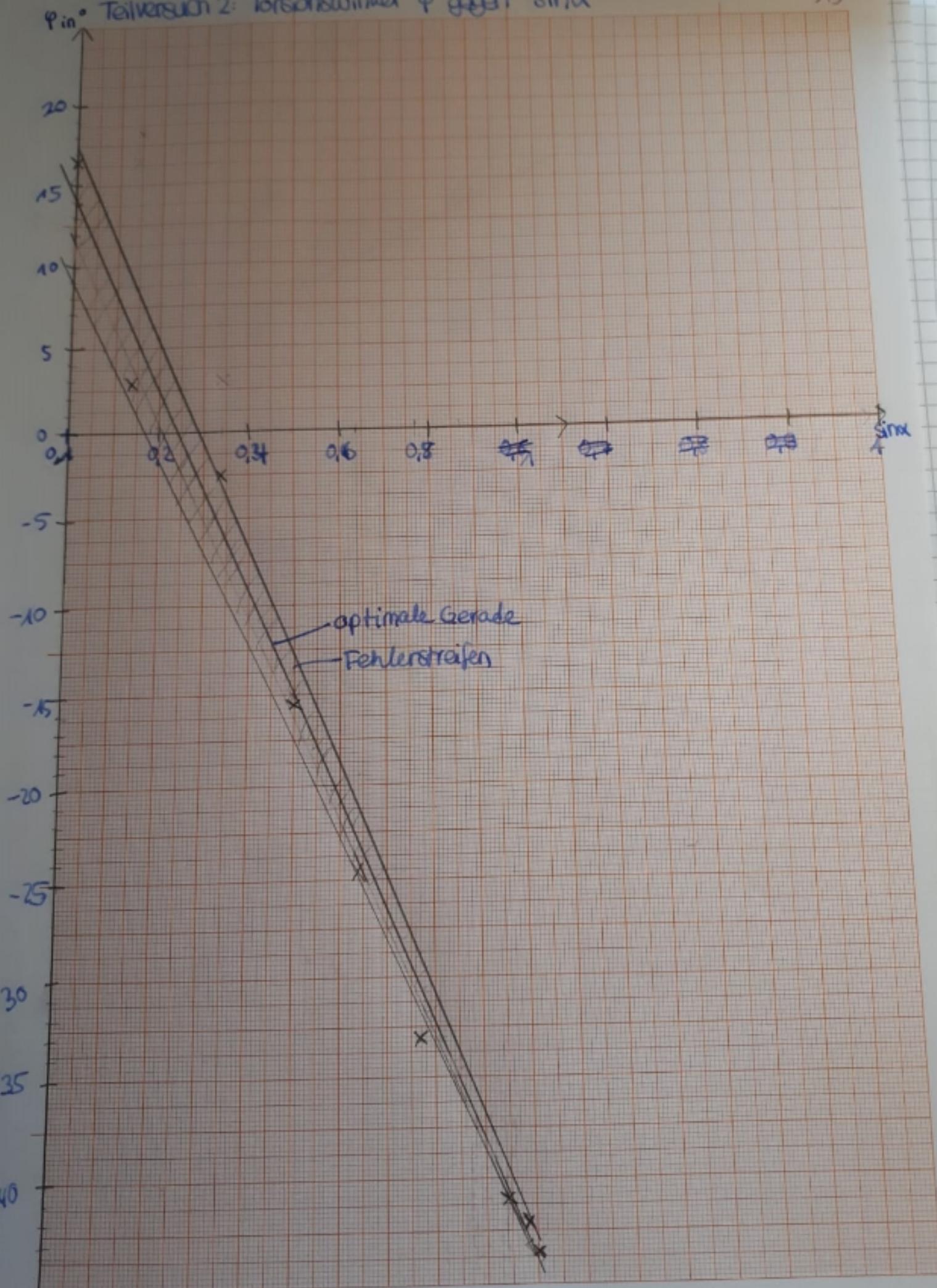
- Zeichnen eines Fehlerstreifens

Bei Die Messpunkte liegen näherungsweise auf einer  
geraden. Diese geht jedoch nicht durch den  
Koordinatenursprung, da für  $\alpha=0^\circ$  nicht  $\beta=0^\circ$   
festgelegt wurde. Die Gerade steht. Der Fehler-  
streifen schließt allerdings den Punkt  
 $(\alpha=0^\circ, \beta=16,5^\circ)$  ein. Würde man also die  
Messpunkte entsprechend verschieben, indem man  
von jedem Messwert  $\beta_0 = 16,5^\circ$  subtrahieren  
würde, dann würde die Gerade <sup>im Rahmen des</sup> durch den  
Ursprung verlaufen.

\* im Rahmen des  
Fehlerstreifens

Dan

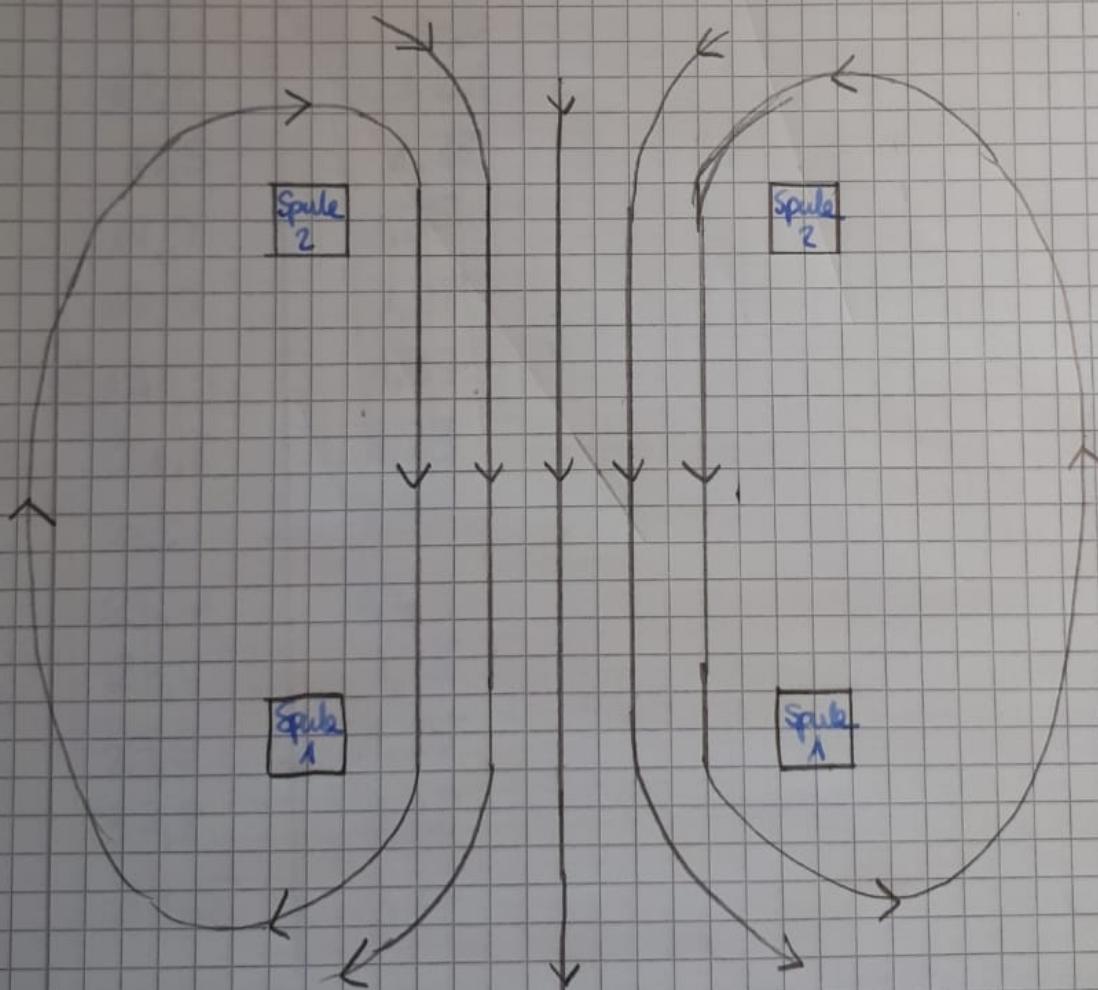
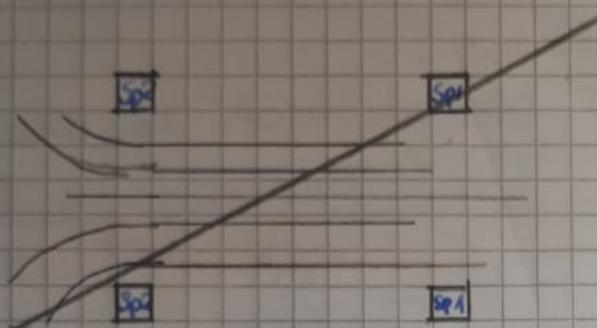
13

Teilversuch 2: Torsionswinkel  $\varphi$  gegen  $\sin\alpha$ 

Fern

Teilversuch 1: Sichtbarmachung der Magnetfeldlinien mit  
Hilfe von Eisenspänen 14

Feldlinienbild



## Den

Teilversuch 3: Induktion durch Drehen einer Spule  
in einem Magnetfeld

15

- Skalierung des Diagrammes mit den gegebenen Schreibereinstellungen:  $1\frac{5}{cm}$  für die t-Achse  
 $0,1\frac{V}{cm}$  für die U-Achse
- Ablesen der Amplitudenwerte

t in s	Amplitude  $\emptyset$ in V
1,9	1,36
4,1	1,28 1,21
6,5	1,32
8,5	1,40
10,8	1,21
12,5	1,38
14,9	1,35
17,0	1,38
19,3	1,37
21,8	1,33
23,5	1,36
25,7	1,42
28,4	1,28
29,9	1,25
32,8	1,28
34,5	1,22

Die Amplituden bei  $t=0s$  und  $t=36,5s$  wurden nicht abgelesen, da dort die Zeitmessung begann bzw. endete und daher nicht sichergestellt ist, dass die Spannung davor bzw. danach noch größer geworden wäre.

## Bestimmung der mittleren Amplitude

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = \frac{1}{16} (1,36V + 1,21V + 1,32V + \\ + 1,40V + 1,21V + 1,38V + 1,35V + 1,38V + 1,37V \\ + 1,38V + 1,36V + 1,42V + 1,28V + 1,25V + 1,28V \\ + 1,22V) \\ = 1,32V$$

Bestimmung des Fehlers von  $\bar{U}$

Hierzu bestimmen wir die Standardabweichung von  $\bar{U}$ , weil wir Diese Methode ist in diesem Fall die geeignete, weil wir eine Menge einzelner Werte von  $U$  haben, die um den Mittelwert streuen. Da wir  $\bar{U}$  nicht aus einer Gleichung bestimmen, können wir nicht z.B. die Gaußsche Fehlerfortpflanzung verwenden.

Da einzelne Werte besonders stark vom Mittelwert abweichen, und dies mög ist die Min-Max-Methode hier auch ungeeignet, da diese wenigen Einzelwerte den Fehler maßgeblich beeinflussen würden, während die anderen Werte, die größtenteils nicht so stark abweichen, nie unberücksichtigt bleiben.

Für die Standardabweichung gilt nach AMW, Gleichung (8):

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{1}{16-1} ((1,36V - 1,32V)^2 + \\ + (1,21V - 1,32V)^2 + (1,32V - 1,32V)^2 + (1,40V - 1,32V)^2 + \\ + (1,21V - 1,32V)^2 + (1,38V - 1,32V)^2 + (1,35V - 1,32V)^2 + (1,38V - 1,32V)^2 + \\ + (1,37V - 1,32V)^2 + (1,35V - 1,32V)^2 + (1,36V - 1,32V)^2 + (1,42V - 1,32V)^2 +}$$

$$+ (1,28V - 1,32V)^2 + (1,25V - 1,32V)^2 + (1,28V - 1,32V)^2$$

17

$$+ (1,22V - 1,32V)^2 = 0,27 \text{ V}$$

Damit gilt für U

$$U = 0 \pm \Delta U = (1,32V \pm 0,27)V$$

• Bestimmung der magnetischen Flussdichte ( $\bar{B}$ ) nach

### A 1.2

Wir entnehmen dem Protokoll die Werte

$$N_{\text{ind}} = 82800 \text{ (Anzahl Windungen der Induktionsspule)}$$

$$A = 23,5 \text{ cm}^2 = 23,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (Querschnittsfläche der Induktionsspule)}$$

$$\omega_{50} = 16,6 \frac{\text{rad}}{\text{min}} \text{ bei } f = 60 \text{ Hz (Drehzahl des Motors)}$$

Da wir allerdings eine Netzfrequenz von  $f = 50 \text{ Hz}$

haben, benötigen wir die Drehzahl  $\omega_{50}$ . Motorfrequenz

Es gilt  $\omega = 2\pi f$  und  $f \approx f$  mit einer gesuchten unbekannten Übersetzung des Motors. Also gilt  $\omega \approx f$  und

daraus folgt

$$\frac{\omega_{50}}{\omega_{60}} = \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}}$$

$$\Rightarrow \omega_{50} = \omega_{60} \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 16,6 \frac{\text{rad}}{\text{min}} \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} \approx 13,8 \frac{\text{rad}}{\text{min}}$$

$$= \frac{13,8}{60} \frac{1}{\text{s}} = 23 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{s}}$$

Laut Skript gilt für  $B$

$$B = \frac{\vec{U}_i}{N \cdot \omega}$$

Aus den mit den Werten aus dem Protokoll erhaltenen Werten

$$18 \quad B = \frac{\hat{U}_i}{NAw} = \frac{1,32V}{82800 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-1} \frac{1}{s}} \\ = 2,9 \cdot 10^{-2} T$$

Weil wir nur eine fehlerbehaftete Größe haben, nämlich  $U_i = (1,32 \pm 0,27)V$ , verwenden wir für die Fehlerbestimmung die Min-Max-Methode:

$$B_{\min} = \frac{U_{i,\min}}{NAw} = \frac{(1,32 - 0,27)V}{82800 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-1} \frac{1}{s}} = 2,3 \cdot 10^{-2} T$$

$$B_{\max} = \frac{U_{i,\max}}{NAw} = \frac{(1,32 + 0,27)V}{82800 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-1} \frac{1}{s}} = 4,36 \cdot 10^{-2} T$$

Damit ist  $B = (2,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-2} T$

- Bestimmung der magnetischen Flussdichte nach Abschnitt 4.3 1.1

Aus dem Protokoll bzw. Skript entnehmen wir die Werte

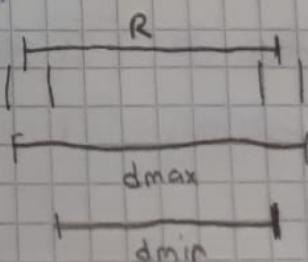
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

$$N_{\text{Windungen}} = 528$$

Den Abstand  $R$  von den beiden Spulenmitteln bestimmen wir mit den gemessenen äußeren und inneren Abständen  $d_{\max} = (17,8 \pm 0,2) \text{ cm}$   $d_{\min} = (10,7 \pm 0,2) \text{ cm}$  (der Fehler 0,2 cm wurde deshalb gewählt, weil für jedes beide Male, an d bei denen zur Messung des Abstandes vom Lineal abgelesen wurde, ein Fehler von 0,1 cm geschätzt wurde)

Es gilt dann

$$R = d_{\min} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2}$$



~~Daten~~

$$R = d_{\min} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} = 10,7 + \frac{17,8 - 10,2}{2} \text{ cm} \approx 14,35 \text{ cm}$$

Fehler von R mit Min-Max-Methode:

$$R_{\min} = d_{\min, \min} + \frac{d_{\max, \min} - d_{\min, \min}}{2} = (10,7 - 0,2) \text{ cm} =$$

$$R_{\max} = d = (10,7 + 0,2) \text{ cm} + \frac{(17,8 - 0,2) \text{ cm} - (10,7 + 0,2) \text{ cm}}{2} \approx 14,1 \text{ cm}$$

$$R_{\max} = d_{\min, \max} + \frac{d_{\max, \max} - d_{\min, \max}}{2}$$

$$= (10,7 + 0,2) \text{ cm} + \frac{(17,8 + 0,2) \text{ cm} - (10,7 + 0,2) \text{ cm}}{2}$$

$$\approx 14,5 \text{ cm}$$

$$\text{Damit ist } R = (14,3 \pm 0,2) \text{ cm} = (14,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$I = 1,205 \text{ A} \pm 1,0\% + 3 \text{ digit}$$

$$\text{eff } 1,0\% \cdot 1,205 \text{ A} = 0,01 \cdot 1,205 = 0,012$$

$$\text{Damit ist } I = (1,205 \pm 0,012 + 0,003) \text{ A} = (1,205 \pm 0,015) \text{ A}$$

$$\text{Nach Abschnitt 1.1 gilt } B_{1,1} = \mu_0 \left(\frac{\pi}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{N \cdot I}{R}$$

Mit den Werten aus dem Protokoll erhalten wir

$$B_{1,1} = \mu_0 \left(\frac{\pi}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{N \cdot I}{R} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{14,3^2 \cdot 528 \cdot 1,205 \text{ A}}{14,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \cdot \cancel{4\pi \cdot 10^{-7}}$$

$$\approx 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

Fehler von  $B_{1,1}$  mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\begin{aligned}
 20 \quad \Delta B_{1,1} &= \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial R} \Delta R\right)^2} \\
 &= \sqrt{N_0 \left(\frac{\mu}{2}\right)^2 \frac{N}{R} \Delta I^2 + \left[-\frac{N_0 \left(\frac{\mu}{2}\right)^2 N I}{R^2} \Delta R\right]^2} \\
 &= N_0 \frac{N}{R} \left(\frac{\mu}{2}\right)^2 \sqrt{\Delta I^2 + \left[-\frac{\Delta R I}{R}\right]^2} \\
 &= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{V_s}{A m} \cdot \frac{528}{14,3 \cdot 10^{-2} m} \cdot \sqrt{(0,015 A)^2 + \left[-\frac{0,2 \cdot 10^{-2} m \cdot 1205 A}{14,3 \cdot 10^{-2} m}\right]^2} \\
 &\approx 1 \cdot 10^{-4} T = 0,1 \cdot 10^{-3} T
 \end{aligned}$$

Damit ist  $B_{M1} = (4,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} T$

Vergleich von  $B_{1,1}$  mit  $B_{1,2}$

Es gilt

$$\begin{aligned}
 B_{1,1} + 3 \Delta B_{1,1} &= (4,0 + 3 \cdot 0,1) \cdot 10^{-3} T = 4,3 \cdot 10^{-3} T \\
 < 1,1 \cdot 10^{-2} T = (4,9 - 3 \cdot 0,6) \cdot 10^{-2} T &- 3 \Delta B_{1,2} = B_{1,2}
 \end{aligned}$$

Also liegt überschneiden sich die Dreifachen Fehlerintervalle von  $B_{1,1}$  und  $B_{1,2}$  nicht. Die Der experimentelle Wert und der theoretische Wert von  $B$  sind somit nicht verträglich. Mögliche Ursachen für Fehler sind ~~die Kabel zu dünnen~~  
~~für U~~ eine zu groß abgelesene Amplitude, denn bei einem Peak in der Amplitude wurde der Wert an der Spitze des Peaks ~~zu~~ für  $U$  abgelesen. Des Weiteren weist der  $t$ -Graph vom  $U-t$ -Diagramm, der mit dem Schreiber erstellt wurde, selbst große Schwankungen auf, was das Ergebnis für  $U$  zusätzlich verzerrt haben könnte. Für die gemessene Stromstärke könnte ein Innenwiderstand / Reibung in den Kabeln dafür gesorgt haben, dass im in der Spule nicht der vom Multimeter gemessene Strom ankommt.

Zudem könnte eine Messung der Abstände mit dem vorhandenen Lineal nicht optimal durchgeführt werden,  
da die Helmholtzspule dafür ungünstig vorbaut war.

2.1

## Teilversuch 4: Induktion durch zeitlich veränderliches Magnetfeld 72

- Skalierung des Koordinatensystems der Abbildung mit den angegebenen Schreibereinstellungen

$20 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}$  für I-Achse

$1 \frac{\text{s}}{\text{cm}}$  für t-Achse

Hierzu bestimmen wir die Skalierung der Stromachse mit dem Ohmschen Gesetz  $U = RI \Leftrightarrow I = \frac{U}{R}$ .

Für den Widerstand entnehmen wir aus dem Protokoll  $R = (0,100 \pm 0,001) \Omega$

und erhalten

$$I = \frac{U}{R} = \frac{20 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}}{0,100 \Omega} = 200 \frac{\text{mV}}{\Omega} = \text{mA} \quad 200 \text{ mA}$$

$I_{\text{max}} = \frac{U}{R_{\text{min}}} = \frac{20 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}}{0,099 \Omega} = 200,2 \text{ mA} \rightarrow$  nicht mit abgelesen werden da 1. Nachkommastelle und damit gilt für die I-Achse die Skalierung relevant für Zeitmaßstab

$$200 \frac{\text{mA}}{\text{s}} \quad \text{Fehler}$$

- Zeichnen einer Ausgleichsgeraden für eine ausgewählte Halbperiode

- Bestimmung der Steigungen der Geraden  $g_1$  bis  $g_5$  mit dem Steigungsdreieck

$g_1$ : Wähle die Punkte

$$P_1 = (13,35; -5,8 \text{ mA}) \quad P_2 = (22,25; 9,8 \text{ A}) \\ -11,6 \text{ A}$$

Dann gilt für die Steigung

$$a_1 = \frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1} = \frac{9,8 \cdot 10^2 \text{ mA} - (-11,6 \cdot 10^2 \text{ mA})}{22,25 \text{ s} - 13,35 \text{ s}} = 2,4 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

$g_2$ : Wähle  $P_3 = (12,05; -1,0 \text{ A}) \quad P_4 = (21,05; 0,48 \text{ A})$

$$\Rightarrow a_2 = \frac{I_4 - I_3}{t_4 - t_3} = \frac{48 \cdot 10^{-2} \text{ mA} - (-1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mA})}{21,05 \text{ s} - 12,05 \text{ s}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

23

g3:  
Wähle  $\tilde{P}_4 = (10,0 \text{ s}; -7,4 \cdot 10^2 \text{ mA})$   $P_5 = (24,55; 5,8 \cdot 10^2 \text{ mA})$

$$\Rightarrow a_3 = \frac{I_5 - I_4}{t_5 - t_4} = \frac{5,8 \cdot 10^2 \text{ mA} - (-7,4 \cdot 10^2 \text{ mA})}{24,55 - 10,05}$$

$$= 0,9 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

g4 Wählt  $\tilde{P}_6 = (9,15; -4,2 \cdot 10^2 \text{ mA})$   $P_7 = (26,15; 3,8 \cdot 10^2 \text{ mA})$

$$\Rightarrow a_4 = \frac{I_7 - I_6}{t_7 - t_6} = \frac{3,8 \cdot 10^2 \text{ mA} - (-4,2 \cdot 10^2 \text{ mA})}{26,15 - 9,15}$$

$$= 0,47 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

g5: Wähle  $P_8 = (11,15; +2,4 \cdot 10^2 \text{ mA})$

$$P_9 = (26,85; 2,8 \cdot 10^2 \text{ mA})$$

$$\Rightarrow a_5 = \frac{I_9 - I_8}{t_9 - t_8} = \frac{2,8 \cdot 10^2 \text{ mA} - (+2,4 \cdot 10^2 \text{ mA})}{26,85 - 11,15}$$

$$= 0,3 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}} \quad \text{±} 0,2 \cdot 10^2 \text{ mA}$$

Fehler der Steigungen ergibt sich aus Ablesefehler und Skalenfehler  
durch den Widerstand

- Für ausgewählte Halbperioden legen wir waagerechte Geraden in die Spannungsverläufe und bestimmen die Spannungen durch Ablesen:

$$U_1 = 13(142 \text{ mV} \pm 2) \text{ mV}$$

$$U_2 = 92 \text{ mV} \pm 2 \text{ mV}$$

$$U_3 = 52 \text{ mV} \pm 2 \text{ mV}$$

$$U_4 = 26 \text{ mV} \pm 2 \text{ mV}$$

$$U_5 = 20 \text{ mV} \pm 2 \text{ mV}$$

Der Ablesefehler von  $\Delta U = 2 \text{ mV}$  wurde geschätzt,  
weil die waagerechten Spannungsverläufe im Diagramm  
bei der Verwendeten Halbperiode in etwa auf  
1 mm des Millimeterpapiers geschätzt wurden

Das allgemeine Induktionsgesetz lautet

$$U_{\text{ind}} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

24

wobei  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$ , also  $U_{\text{ind}} = -N_i \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{A})}{dt}$  (\*)

Also folgt ( $N_i$  = Anzahl Windungen der Induktionsspule)

Zudem gilt für das B-Feld nach Gleichung (4)

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{N_H}{R} \quad (N_H = \text{Anzahl der Windungen der Helmholz-Spule})$$

und damit  $\frac{dB}{dt} = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{N_H}{R} \frac{dI}{dt}$ . (\*\*)

In Teilversuch 4 wurde die Induktionsspule nicht (zeitlich periodisch) bewegt, daher ist  $\frac{dA}{dt} = 0$ .

Wir erhalten somit aus (\*) :

$$U_{\text{ind}} = -N_i A \frac{dB}{dt} \stackrel{(*)}{=} -N_i N_H A \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{dI}{dt} \quad (***)$$

Aus dem Protokoll entnehmen wir

$$N_i = 82800 \quad N_H = 528 \quad A = 23,5 \text{ cm}^2 = 23,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R = (0,100 \pm 0,001) \Omega \quad R = (14,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \text{ m} \text{ (aus TVB)}$$

und  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$  (aus dem Skript)

die Werte für  $\frac{dI}{dt}$  entsprechen den Steigungen der Geraden

Dann bestimmen wir die § Induktionsspannungen

mit Gleichung (\*\*\*) :

$$\cancel{U_{\text{ind}} = N_i N_H A \frac{dI}{dt} = \frac{82800 \cdot 528 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4}}{14,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}} =}$$

$$\begin{aligned} U_1' &= -\frac{N_i N_H A}{R} \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{dI_1}{dt} = -\frac{N_i N_H A}{R} \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot a_1 \\ &= -\frac{82800 \cdot 528 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{14,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot 24 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}} \\ &= 155 \text{ mV} \end{aligned}$$

25

Es gilt  $U_1 + 3\Delta U_1 = (42 + 3 \cdot 0,2) \text{ mV} \approx -150 \text{ mV} \approx -155 \text{ mV} = -U_1'$ , also kann man sagen, dass die Werte  $U_1$  und  $U_1'$  verträglich sind (Fehlerbegründung später)

$$U_2' = - \frac{N_i N_H A}{R} \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} a_2^-$$

$$= - \frac{82800 \cdot 528 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{14,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot 0,9 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

$$\approx -103 \text{ mV} \approx -98 \text{ mV} = -(U_2 + 3\Delta U_2)$$

$$\Rightarrow |U_2'| \approx U_2$$

$$U_3' = - \frac{N_i N_H A}{R} \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} a_3^-$$

$$= - \frac{82800 \cdot 528 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{14,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot 0,9 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

$$\approx -58 \text{ mV} \cancel{=} = -(52 + 3 \cdot 2) \text{ mV} = -(U_3 + 3\Delta U_3)$$

D.h.  $U_3'$  liegt im dreifachen Fehlerintervall von  $U_3$ .  
Daher sind die Messwerte verträglich

$$U_4' = - \frac{N_i N_H A}{R} \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} a_4^-$$

$$= - \frac{82800 \cdot 528 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{14,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot 0,5 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

$$\approx -32 \frac{\text{mV}}{\text{mA}} = -(26 + 3 \cdot 2) \text{ mV} = -(U_4 + 3\Delta U_4)$$

D.h.  $U_4'$  liegt im dreifachen Fehlerintervall von  $U_4$ .  
Daher sind die Messwerte verträglich.

$$U_5' = - \frac{N_i N_H A}{R} \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot a_5^-$$

$$= - \frac{82800 \cdot 528 \cdot 23,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{14,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot 0,3 \cdot 10^2 \frac{\text{mA}}{\text{s}}$$

$$\approx -19 \text{ mV} \approx -20 \text{ mV} = U_5$$

Also stimmen  $U_5$  und  $U_5'$  überein

Bei den etwas größeren Spannungen war der theoretische Wert  $U_1'$  oftmals größer als der von  $U_1$ , also dem gemessenen Wert. Ursachen hierfür eins konkret sein, dass die durch den Innenwiderstand des Kabels die ein Teil der Spannung in den Kabeln abfällt und dadurch geringere Spannungen beim Schreiber direkt gemessen werden. Aber auch der Fehler des Widerstands, wodurch ein Schwabenfehler beim I-t Diagramm entsteht oder der Ablesefehler im Diagramm könnte das Ergebnis von  $U_1$  und  $U_1'$  beeinflussen. Zudem wurde der Messfehler des Abstandes  $R$  nicht weiter berücksichtigt und es wurde kein Fehler von  $a_1$  bestimmt.

26

Insgesamt konnte, unter Berücksichtigung der genannten Messungenauigkeiten, die Gültigkeit des Induktionsgesetzes gezeigt werden.