

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

<b>Versuch:</b>	MAG	<b>Gruppe:</b>	F2-2
<b>Vorname:</b>	YUDONG	<b>Name:</b>	SUN

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.

**28**  
32 Blatt

**BRUNNEN** 

**Schulheft A4**  
Zellstoff chlorfrei gebleicht  
80 g/m<sup>2</sup>

**28**  
32 Blatt

## MAG Stichwörter

Erzeugung und Darstellung von Magnetfeldern:

- Definition des Magnetfeldes / Erzeugung ~~der~~ von Magnetfeldern / Ampèresches Durchflutungsgesetz.

→ Die Kraft zwischen elektrisch geladenen Teilen setzt sich aus 2 Komponenten zusammen

- Elektrische Kraft → wirkt auf ruhenden und bewegten Teilchen
- Magnetische Kraft → wirkt nur auf bewegte Teilchen.

Diese magnetische Kraft heißt Lorentz-Kraft, weil es gilt:

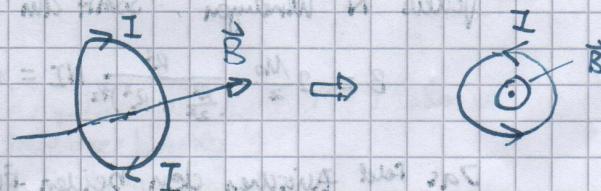
$$F = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

↓      ↑      R  
 Lorentzkraft      Ladung      Magnetfeldstärke  
 Ladig Geschwindigkeit

$$= Q v B \sin \alpha$$

↳ Winkel zwischen  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$ .

→ Magnetische Wechselwirkung zwischen relativ zueinander bewegen den elektrisch geladenen Teilchen auftritt ⇒ Magnetfelder auch von elektrischen Strömen erzeugt.



(Durch Rechtsschraffurregel)

→ Ampèresches Durchflutungsgesetz:

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

mit  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs A}^{-1} \text{ m}^{-1}$   
magnetische Feldkonstante.

Integration entlang einer geschlossenen → umgeschlossene Stromkurve

- Gesetze von Biot und Savart / Berechnung von Magnetfeldern / Regel eines Kreisrings

→ Gesetz von Biot und Savart (Hergestellt aus Ampèresche Gesetz)

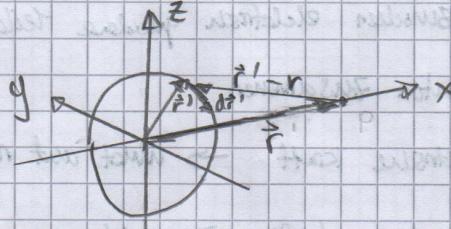
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{\vec{r}' - \vec{r}}{|\vec{r}' - \vec{r}|^3} \times d\vec{l}'$$

$\vec{r}'$  = Ortsvektor des Punktes P, für den das Feld berechnet werden soll  
 $\vec{l}'$  = Ortsvektor eines stromdurchflossenen Drahtelements.

## → Berechnung von Magnetfeldern

Man kann durch Integration mittels Biot - Savartsches Gesetze oder Umstellung nach Integration mittels Ampe'sches Gesetze die Magnetfelder  $\vec{B}$  berechnen.

## → Feld eines Kreisrings.



$$\Rightarrow |\vec{r}' - \vec{r}| = \sqrt{x^2 + R^2} \quad \text{nach Satz von Pythagoras.}$$

$$\Rightarrow \vec{r}' \times d\vec{r} = (R d\theta) \vec{d\theta}$$

$$\text{Somit: } B(x) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{R d\theta'}{(\sqrt{x^2 + R^2})^{3/2}} = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I}{(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

## → Feldliniennetz eines Helmholtz Spulenpaars.

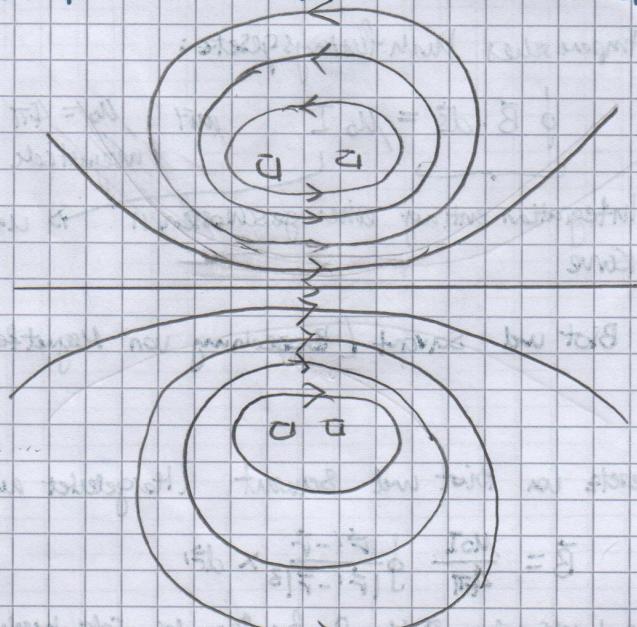
Feld eines Drahtrings mit  $N$  Windungen hat die folgende Form:

$$B(x) = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2}{(x^2 + R^2)^{3/2}} NI$$

Eine Helmholtzspule besteht aus 2 parallelen Drahtringen mit jeweils  $N$  Windungen. Somit am Mittelpunkt:  $x = \frac{R}{2}$

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

Das Feld zwischen den beiden Einzelspulen wird nahezu homogen. Aus Symmetriegründen gilt diese Formel auch außerhalb der Spulenachse für den Mittleren Teil der Spuleabordnung:



→ Bezeichnungen des Magnetfeldes eines Helmholtzspulenpaars,  
Homogenitätsbedingung:

→ Mittlerer Teil zwischen 2 Einzelringen nahezu homogen

→ Mittlerer Teil ist ein gedachtes zylindrisches Volumen in  
der Mitte des Helmholtzspulenpaars mit einer Länge  
von etwa ein Drittel des Spulenabstandes und einem  
Durchmesser von etwa der Hälfte des Spulendurchmessers.

→ Experimentell einfach zu realisieren

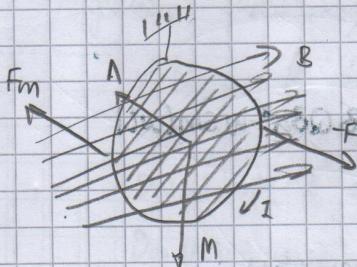
### Lorentzkraft

• Kraft, die auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld wirkt

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

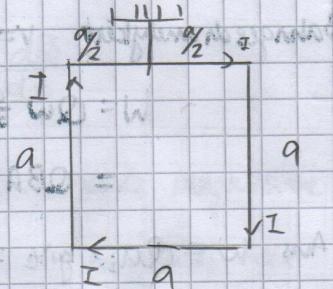
↖ Richtung des Stromes

• Drehmoment eines Ringsstroms Ringstroms



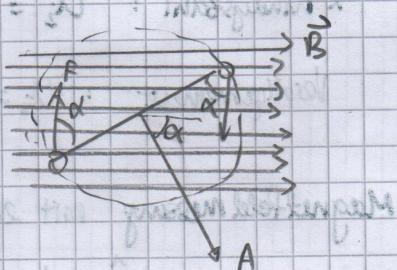
Vereinfachung:

$$F_m =$$



$$M = IAB\sin\alpha$$

Man kann dann jede beliebig geformte Schleife dieses Drehmoments berechnen, da jede geschlossene Kurve durch ein Netz von infinitesimal kleinen Querströmen ersetzt werden kann.



• Magnetisches Dipolmoment.

Für eine Spule mit N Windungen gilt:

$$M = NIAB\sin\alpha$$

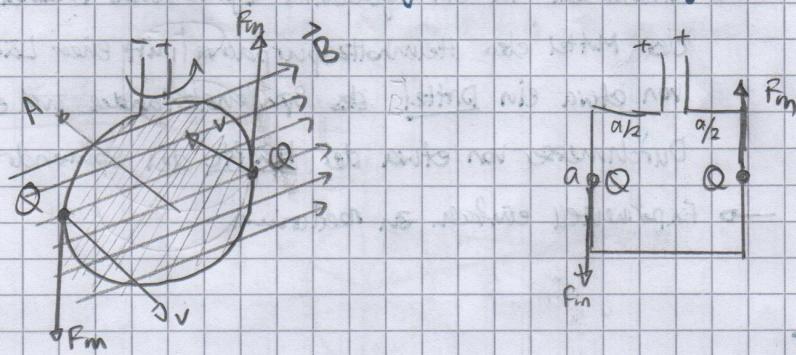
Der Ausdruck  $m = NI/A$  heißt das magnetische Dipolmoment der Spule

Ursprung: Begrenzt der Spule die gleiche Form besitzt, wie das eines Stabmagneten mit 2 Polen.

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

## Induktion an einer bewegten Leiterschleife

- Rotierende Leiterschleife im homogenen Magnetfeld / Bild einer Leiterschleife mit allen relevanten Größen / Erklärung der Induktionsspannung mit Lorentzkraft.



$$\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B}) = QE_i \Rightarrow \text{Induktionsspannung.}$$

- Beweisung der Induktionsspannung durch die Arbeit, welche die Lorentzkraft zur Verschiebung der Ladung leistet.

Drahtende zum anderen Drahtende:  $W = F_m 2a = QvB \sin(wt) 2a$

Bahngeschwindigkeit  $v = wa/2$ , somit

$$W = Qw \frac{a}{2} B \sin(wt) 2a = \frac{1}{2} QBA^2 w \sin(wt)$$

$$= QBA w \sin(wt)$$

Aus  $W = QU_i$  gilt:  $U_i = BAw \sin(wt)$

- Entstehung einer sinusförmigen Wechselspannung.

× Windungszahl:  $U_i = NBAw \sin(wt)$  ↪ Spezialfall

Verallgemeinert:  $U_i = -NB \cdot \frac{dA}{dt}$  ( $\sin(wt) = -\frac{d}{dt} \cos wt$ )

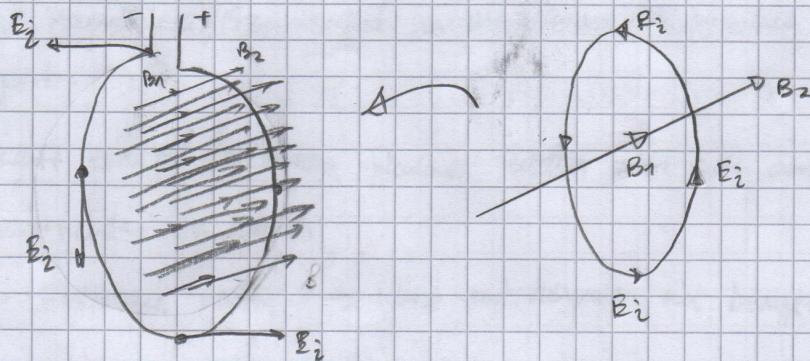
- Magnetfeldmessung mit einer Leiterschleife

Amplitude  $\hat{U}_i$  der Spannung bestimmt. Aus  $\hat{U}_i = NBAw$  folgt:

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

## Induktion durch Änderung des Magnetfeldes:

- Feldlinien der elektrischen Feldstärke einer sich dem Betrag nach zeitlich verändernden mag. Flussdichtevektors.



- Induktionsgesetz für zeitlich veränderliches Magnetfeld und unbewegter Leiter

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

- Allgemeines Induktionsgesetz

$$U_i = - N \frac{d}{dt} (\vec{B} \cdot \vec{A}) = - N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Dabei ist  $\Phi$  der die Spule durchsetzende magnetische Fluss.

Das Induktionsgesetz gilt auch für ein inhomogenes Feld  $\vec{B}$ , wobei die Definition von  $\Phi$  zu  $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$  erweitert werden muss.

# Versuch Nr. 1 - Magnetfeld des Relais

Name: Yvonne Sun

Datum: 17. Aug 2020

Teilversuch 1: Sich barmerden der Magnetfeldlinien mit Hilfe von Eisenteilen.

Versuchsziel: Magnetfeldlinien von einem Feldspule sichtbar machen.

Magnetzelle: Eisenteile.

## Versuchsdurchführung:

- Schiebe bei Bedarf ein ungeklemmtes DIN A3 Blatt nach der am Arbeitsplatz liegenden Aluminiumplatte zu.
- Klebe A3 Blatt mit Klebestreifen auf Aluminiumplatte.
- Schiebe Alu-platte mit Blatt in die Halterung am Spulenpaar.
- ~~Die~~ Streue Eisenteilechen dünn und gleichmäßig über die gesamte Fläche verteile (auch außerhalb der Helmholzspulen)
- Feldspulen Strom auf Ruhingenerator auf Null setzen.
- Entlastungs generator einschalten.
- Feldspulen Strom langsam auf Maximalen Wert erhöhen.
- Auf die Unterseite der Trägerplatte vorsichtig klopfen, bis sich die Eisenteilechen ausgehobelt haben.
- Beobachtete Feldlinienbild skizzieren. Fehlenden Teil ergänzen.
- <sup>einzeichnen</sup> Feldrichtung, die sich aus dem an den Spulen angegebenen "Umlaufsinn" des Feldstromes ergibt.

Zielvorschrift: Drehmoment des Feldes auf eine Stromdurchflossene Spule.

Versuchsvorrichtung: Drehmoment, das ein Magnetfeld auf eine Stromdurchflossene Spule ausübt, in Abhängigkeit vom Winkel zw. Spulenachse und Feldrichtung messen.

Messmethoden: Torsionsspule

Versuchsdurchführung:

- Funktionsgenerator ausschalten.
  - Winkelstab in das Helmholtz-Spulenpaar einschieben.
  - Torsionsspule einbauen
  - Torsionsspule mit den Stromzuführungsrächen verbinden.  
(Vorsicht! mit Leitungen umgehen)
  - Winkelstab so positionieren, dass die Torsionsspule ~~im~~ ihr nach Angenommen zentriert ist. Klemmschrauben fest ziehen.
  - Torsionsspulenachse senkrecht zur Achse des Helmholtz-Spulenpaars ausrichten.
  - Funktionsgenerator einschalten. Feld- und Torsionsspulenstrom auf Nominalwerte hochführen. Drehkräfte festhalten.
  - Torsionspulenstrom ausschalten.
  - Flussdichtenvektor der Torsionsspule so drehen, dass er möglichst genau in Feldrichtung des Helmholtz-Spulenpaars zeigt. (Beim Wiedereinschalten soll kein Drehmoment auf die Torsionsspule wirken)
  - Ggf. muss die Alu-platte mit Winkelstab nachjustiert werden.
  - Feld und Torsionsspulen einschalten.
  - Winkel  $\alpha$  (zws. Torsionspulenachse und Helmholtzachse) in Schritten von  $10^\circ$  auf  $90^\circ$  durch Drehen des Drehknopfes, am Torsionsdrall.
- $(\alpha = 0^\circ \text{ bis } \alpha = 90^\circ)$

- Mithilfe der Drehknopfstellung den Drehwinkel des Drehknopfs messen.
- Fehler abschätzen.

Teilaufgabe ③: Induktion durch Drehen einer Spule in einem Magnetfeld.

- Zielvorsatz:
- Der zeitliche Verlauf der induzierten Spannung durch die Umdrehung einer Spule in einem zeitlich konstanten Magnetfeld registrieren.
  - Phasendreiecke aus den Messwerten und aus der Feldspannungsgeometrie bestimmen.

Meßwerte: XY/t - Schreiber

Vorberichtsfähigung:

- XY/t - Schreiber Anflugsdistanz:

X-Achse: 1x1, Verner: (a), Zero: Oper, Thetha: Reset,  
Merk: sec/cm

Y-Achse: 1X1, Verner: cal, Zero: Oper

Motors: stby, Ren: Up.

- Funktionsschalter ausschalten
- Multimeter in die Feldspannenzuleitung schließen
- die notgetriebene Motortransspule montieren.
- die Induktionsspule mit flexiblen dünnen Kabeln an die Y-Achse des Schreibers anschließen.
- Motor einschalten
- Funktionsschalter einschalten und Reisstrom auf einen Wert hochschrauben bei dem die Amplitude der Schreibbewegung für die Y-Achse asymptotisch  $100 \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-1}$  ohne Übersteuerung möglichst groß ist.

- Mit dem Schreiber die Nulllinie für die Induktionsspannung zeichnen
- Induktionsspannung bei laufendem Motor mit dem Ablenkfaktor  $18 \text{ cm}^{-1}$  aufzeichnen
- Schenkelinstellung notieren
- Radius an <sup>Windungen</sup> der Helmholzspulen messen.

Teilversuch (4): Induktion durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld.

- Versuchsziel:
- Der zeitliche Verlauf der Feldstärke und der induzierten Spannung in einer unbewegten Spule durch ein zeitlich verändertes Feld registrieren
  - Überprüfung des Induktionsgesetzes

Messanordnung:  $\propto \sqrt{t}$ -Schreiber

Vorbereitung:

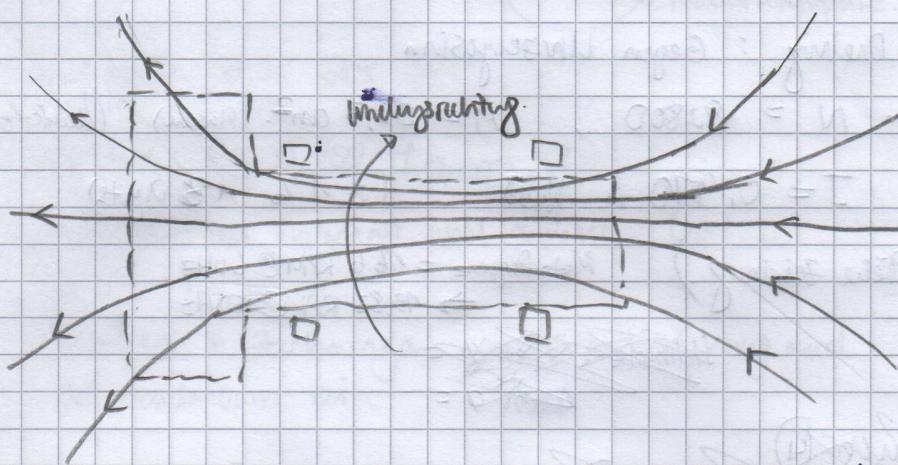
- Punktionsgenerator ausschalten. Multimeter entfernen. Schreiber in Standby-Modus schalten.
- Plastikverstärker der Induktionsspule durch verstetigtes Drehen der Motornette mit der Hand in Übereinstimmung mit der Feldrichtung.
- Falls alte Modell, die Stabauslede für den Schreiber am ~~Punktionsgen~~ Punktionsgenerator mit den entsprechenden Banana-Steckern bauen und an der Rückseite des Schreibers verbinden.
- Punktionsgenerator auf Dreieck ~~spann~~ schalten.
- Punktionsgenerator einschalten und die Dreiecksfunktion starten.
- Frequenz ~~regel~~ der Dreiecksfrequenz mit Hilfe der Stoppuhr einstellen, dass die ~~pendend~~ Periodendauer etwa 20 s beträgt.

- Y-Eingang des Schreivers so mit der Feldspur verbinden, dass Sie später aus dem Plot den Reluktanz bestimmen können  
 $\rightarrow$  (Multiplikator in 8erem)  $\times \Rightarrow$  Spannungsabfall im Widerstand.
- Ablenkfaktor für den Y-Eingang als  $20 \text{ mV cm}^{-1}$  (Galten  $25 \text{ mV cm}^{-1}$ ) wählen.
- Die Amplitude der Dreieckschritte so einstellen, dass der Schreiber etwas weniger als die ~~die~~ halbe Blattfläche ausmalt
- Zeitabstimmung des Schreibers verwenden.  
 $\hookrightarrow$  Einstellung: Taster XY/NT auf YT  
 $\frac{1}{\text{Geschwindigkeit}} = 1 \text{ cm}^{-1}$   
 $\rightarrow$  Start mit Taster START.
- ~~Feldstärke~~ Reluktanz starten. In der oberen Blatthälfte aufzuzählen. Nach Beendigung des Schwingungszyklus die zuletzt gezählten ~~zu~~-stoppen. des Reluktanzes stoppen.
- Mit dem Schreiber, die
  - Nulllinie für den Reluktanz
  - Maximalspannung (untere Hälfte)
  - Nulllinie für die Induktionsspannung
 Zählen.
- 4 weitere Verläufe auf selbigem Blatt papier zeichnen, indem die Amplitude in äquidistanten Schritten ~~reduziert~~ reduzieren.  
 $\rightarrow$  Um systematische Fehler zu minimieren, erst Stromfeld messen, dann Induktionsspannung
  - Schreibereinstellung notieren

## Messungen im Labor.

Helmholz Wirkungszeit  $N = 528$

### Teilversuch ①



\* Es gibt viel mehr  
Reihen als hier  
gezeichnet.

### Teilversuch ②

Drehkopf: Äußere Markierung.

$$\Delta \alpha = \pm 2^\circ, \Delta \beta = \pm 1,0^\circ$$

$\alpha / {}^\circ$	$\beta / {}^\circ$
0	295,0
10	315,0
20	337,0
30	358,5
40	17,0
50	35,0
60	53,0
70	65,5
80	77,5
90	89,0

)  $\rightarrow 360^\circ$

### Teilversuch (3)

Modell: LY14100 - II

Drehung: Gegen Uhrzeigersinn

Windungen  $N = 82800$ ,  $A = 23,5 \text{ cm}^2$  (Plättchen) (Induktionsspule)

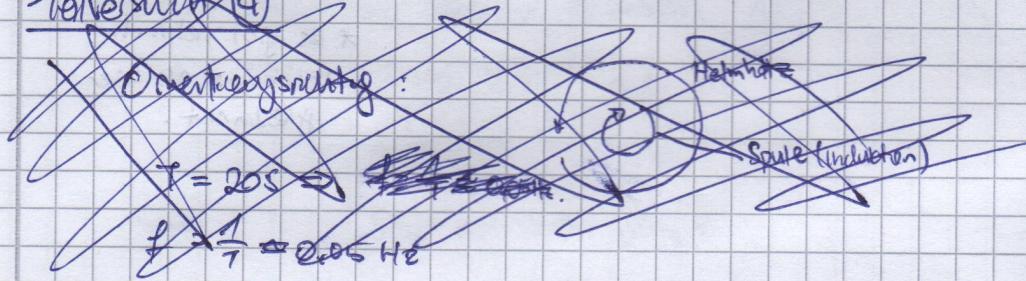
$$I = 0,970 \text{ A} \quad (\pm 1\% + 3 \text{ Rgts})$$

(siehe Zeichnung)

$$\begin{aligned} \text{Motordrehzahl} &= 166 \text{ RPM} @ 60 \text{ Hz}, \\ &\Rightarrow 13,83 \text{ RPM} @ 50 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Innen } \varnothing &= \\ \text{Außen } \varnothing &= \end{aligned}$$

### Teilversuch (4)



Hauptpolzähne:

Windungen  $N = 528$

$$\text{Innen } \varnothing = 25,1 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$25,2 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$25,2 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

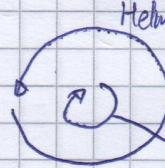
$$\text{Außen } \varnothing = 30,0 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$29,9 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$30,0 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

## Beobachten (4)

Orientierungsrichtung:



Helmholtz  
Induktionsströme.

Periodendauer etwa 20s

Widerstand  $R = 0,180 \pm 0,002 \Omega$

Spannabfall von Widerstand muss gemessen,  $U_R$

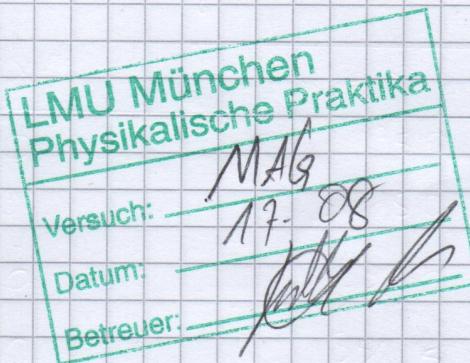
Vorzeichen in Zeichnungen von induzierte Spannung und  $U_R$   
soll andersrum sein

Die Der Strom wird durch Azyklusmaß in 5 ~~stern~~ quadratischen  
Schnitte geteilt.

Schreibe einstellungen:

$V$ : mV, 20mV/cm

$T$ : 1s  $\text{cm}^{-1}$



# MAG – Magnetisches Feld Auswertung

Yudong Sun  
Gruppe F2-2

19. August 2020

## Teilversuch 1: Sichtbarmachen der Magnetfeldlinien mit Hilfe von Eisenspänen

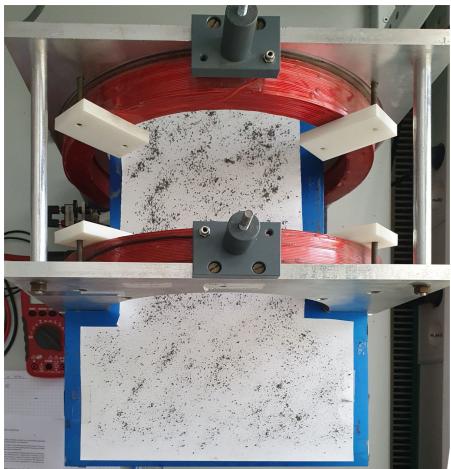


Abbildung 1.1: Ohne Magnetfeld

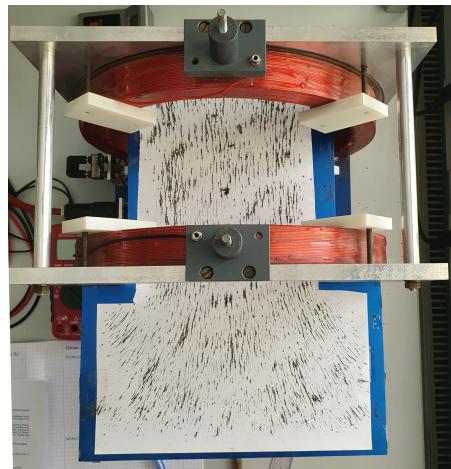


Abbildung 1.2: Mit Magnetfeld

## Teilversuch 2: Drehmoment des Feldes auf eine stromdurchflossene Spule

Fehler bei der Winkelmessung  $\Delta\alpha = 2^\circ$

Fehler bei der Winkelmessung  $\Delta\beta = 1,0^\circ$

$\alpha/^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\beta/^\circ$	295,0	315,0	337,0	358,5	377,0	395,0	413,0	425,5	437,5	449,0
$(\beta - \beta_0)/^\circ$	0,0	20,0	42,0	63,5	82,0	100,0	118,0	130,5	142,5	154,0
$\varphi/^\circ$	0,0	-10,0	-22,0	-33,5	-42,0	-50,0	-58,0	-60,5	-62,5	-64,0

wobei  $\varphi = \alpha - (\beta - \beta_0)$ .

Die entsprechende Fehler zur  $\sin(\alpha/^\circ)$  und  $\varphi$  sind wie folgt gegeben:

$$\Delta \sin(\alpha/^\circ) = \left| \cos(\alpha/^\circ) \right| \cdot \frac{\Delta \alpha}{180^\circ} \cdot \pi \quad (2.1)$$

$$\Delta \varphi = \sqrt{(\Delta \alpha)^2 + (\Delta \beta)^2 + (\Delta \beta_0)^2} = \sqrt{(2^\circ)^2 + (1,0^\circ)^2 + (1,0^\circ)^2} = 2,5^\circ \quad (2.2)$$

$\varphi$  wurde dann gegen  $\sin(\alpha/^\circ)$  im gnuplot geplottet und eine Kurveanpassung zur  $\varphi = m \sin \alpha + c$  durchgeführt. Die entsprechende Fehler sind direkt im gnuplot berechnet. Siehe Appendix A für die genauer Rechnung.

Im Experiment war die Markierung für Winkel  $\alpha$  wegen des Aufbaus schwer abzulesen. Somit ist der Fehler eher groß und sind hier bei der Kurvenanpassung nicht vernachlässigt.

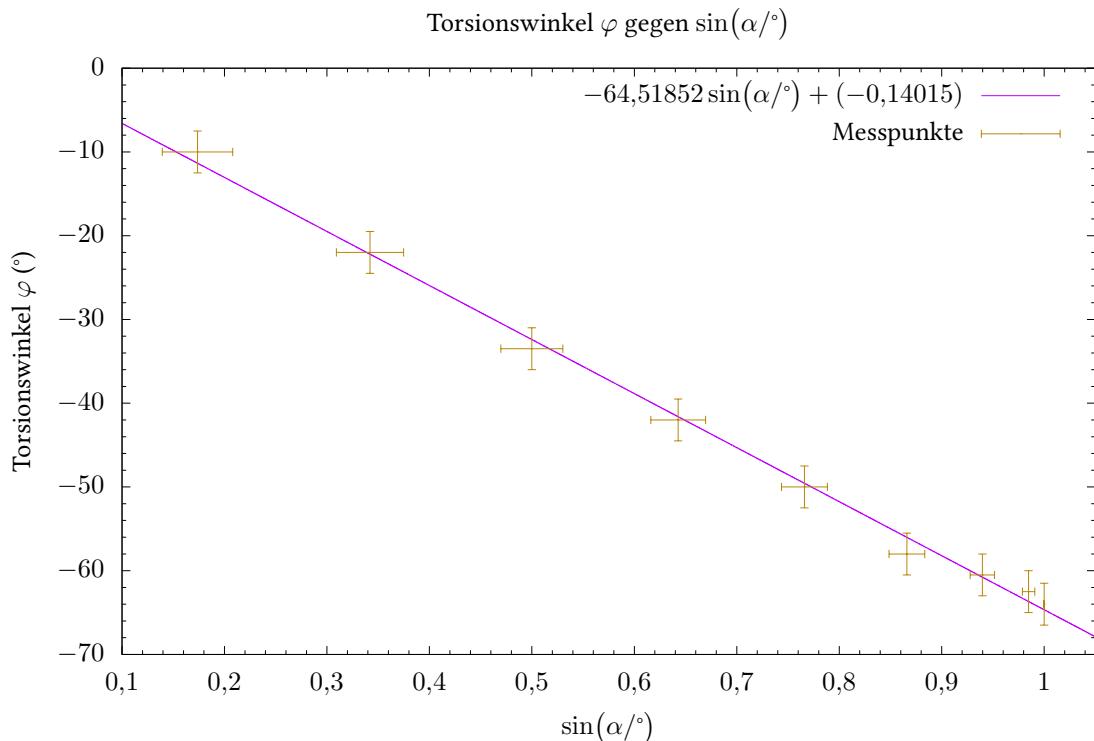


Abbildung 2.1: Drehmoment auf stromdurchflossene Spule  
 $\chi^2_{\text{red}} = 0,163\,741 \implies$  Gute Anpassung

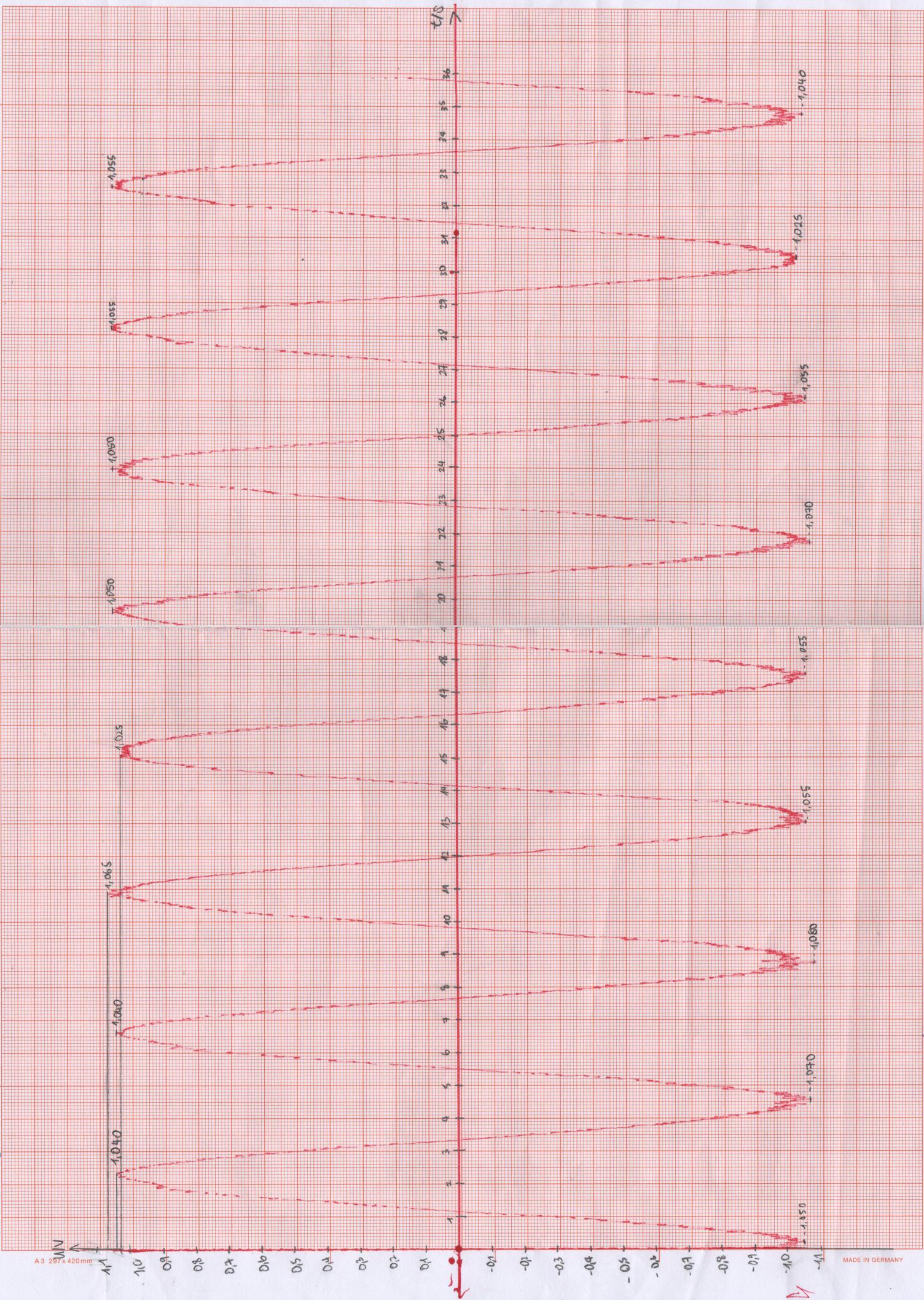
Als Endergebnis erhalten wir:

Variable	Wert	Gerundet
$m$	$(-64,519 \pm 1,445)^\circ$	$(-64,5 \pm 1,5)^\circ$
$c$	$(-0,140 \pm 1,145)^\circ$	$(-0,1 \pm 1,2)^\circ$

$c$  ist der Ordinateabschnitt und 0 liegt tatsächlich im Fehlerintervall von  $c$ , also liegen die Messpunkte im Rahmen der Fehlergrenzen auf einer durch den Nullpunkt gehenden Geraden.

Aus der gute Kurvenanpassung folgt also, dass die Messergebnisse mit der Theorie übereinstimmt.

Galvaneum (3) 17. Aug. 2020 Yuxiang Sun



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

Die Amplitude  $U_0$  sind von der Graph gelesen und wir erhalten als Messwerten:

$U_0/V$	1,040	1,040	1,065	1,025	1,050	1,050	1,055	1,055	1,050
$U_0/V$	1,070	1,080	1,055	1,055	1,070	1,055	1,025	1,040	

Der Mittelwert und Standardabweichung werden dann mittels Python berechnet (Siehe Appendix B). Da es viele Messwerten gibt, ist der Fehler durch die Standardabweichung gegeben und die einzelne Ablesefehler sind nicht berücksichtigt. Wir erhalten:

$$\overline{U_0} \quad (1,052 \pm 0,015) \text{ V}$$

Aus Abschnitt 1.2 der Anleitung gilt:

$$B = \frac{\overline{U_0}}{NA\omega} \quad \Delta B = B \sqrt{\left( \frac{\Delta \overline{U_0}}{\overline{U_0}} \right)^2} = B \left( \frac{\Delta \overline{U_0}}{\overline{U_0}} \right) \quad (3.1)$$

da  $N$ ,  $A$  und  $\omega$  als Fehlerfrei betrachtet werden.

Wir berechnen zunächst  $\omega$ :

$$\omega = 2\pi f = (2\pi \text{ rad}) \left( \frac{16.6 \text{ RPM}}{60 \text{ Hz}} \cdot 50 \text{ Hz} \right) \cdot \frac{1}{60} \frac{\text{Hz}}{\text{RPM}} = 1,4486 \text{ rad s}^{-1} \quad (5 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.2)$$

Mit der Messwerten:

Variable	Wert	Bedeutung
$\overline{U_0}$	$(1,052 \pm 0,015) \text{ V}$	Durchschnittliche Amplitude
$N$	82 800	Windungszahl der Induktionsspule
$A$	$23,5 \text{ cm}^2$	Querschnittsfläche der Induktionsspule
$\omega$	$1,4486 \text{ s}^{-1}$	Rotationsgeschwindigkeit der Induktionsspule

erhalten wir:

$$B = \frac{1,052 \text{ V}}{(82800)(2,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2)(1,4486 \text{ s}^{-1})} = 3,73224 \cdot 10^{-3} \text{ T} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.3)$$

$$\Delta B = 3,73224 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \frac{0,015 \text{ V}}{1,052 \text{ V}} = 5,32163 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.4)$$

Somit ist die Flussdichte  $|\vec{B}| = (3,73 \pm 0,06) \cdot 10^{-3} \text{ T}$ .

Nun berechnen wir den theoretischen Wert von der Flussdichte  $B$ . Nach Abschnitt 1.1 gilt:

$$B = \mu_0 \left( \frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{NI}{r} = 2\mu_0 \left( \frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{NI}{R} \quad (3.5)$$

$$\Delta B = B \sqrt{\left( \frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left( \frac{\Delta R}{R} \right)^2} \quad (3.6)$$

wobei  $R = 2r$  der Durchmesser der Helmholtzspule ist.

Zu  $R$  benutzen wir den Mittelwert zwischen den äußereren ( $R_a$ ) und inneren ( $R_i$ ) Durchmesser der Helmholtzspule. Dazu gibt es für jeden Durchmesser 3 Messungen, also ist  $R$  gegeben durch:

$$R = \frac{\frac{1}{3}(R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}) + \frac{1}{3}(R_{i1} + R_{i2} + R_{i3})}{2} = \frac{R_{a1} + R_{a2} + R_{a3} + R_{i1} + R_{i2} + R_{i3}}{6} \quad (3.7)$$

$$\Delta R = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta R_a)^2 + (\Delta R_i)^2} \quad (3.8)$$

Dabei sind  $\Delta R_a$  und  $\Delta R_i$  wegen der mehrmaligen Messungen gegeben durch die Standardabweichung  $s = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{j=1}^3 (x_j - \bar{x})^2}$ . Die Ablesefehler ( $\pm 0,2$  cm) wurden nicht berücksichtigt.

$j$	1	2	3	$\bar{x}$	$s$
$R_a/\text{cm}$	30,0	29,9	30,0	29,9667	0,0577
$R_i/\text{cm}$	25,1	25,2	25,2	25,1667	0,0577

Es gilt somit:

$$R = \frac{30,0 + 29,9 + 30,0 + 25,1 + 25,2 + 25,2}{6} \text{ cm} = 27,5667 \text{ cm} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.9)$$

$$\Delta R = \frac{1}{2} \sqrt{(R_a)^2 + (R_i)^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} (0,06 \text{ cm}) = 0,0424 \text{ cm} \quad (3 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.10)$$

Also erhalten wir  $R = (27,57 \pm 0,05) \text{ cm}$ .

Mit der Werten:

Variable	Wert	Bedeutung
$I$	$(0,970 \pm 0,013) \text{ A}$	Feldstromstärke
$R$	$(27,57 \pm 0,05) \text{ cm}$	Durchmesser der Helmholtzspule
$N$	528	Windungszahl der Helmholtzspule
$\mu_0$	$1,257 \cdot 10^{-6} \text{ N A}^{-2}$	Magnetische Feldkonstante

erhalten wir:

$$B = 2 \cdot (1,257 \cdot 10^{-6} \text{ N A}^{-2}) \left( \frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{(528)(0,970 \text{ A})}{0,2757 \text{ m}} = 3,34171 \cdot 10^{-3} \text{ T} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.11)$$

$$\Delta B = 1,67086 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \sqrt{\left( \frac{0,013 \text{ A}}{0,970 \text{ A}} \right)^2 + \left( \frac{0,05 \text{ cm}}{27,57 \text{ cm}} \right)^2} = 4,51941 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.12)$$

Somit soll die Flussdichte theoretisch  $|\vec{B}| = (3,34 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ T}$  sein.

Zusammengefasst haben wir:

Experimental	$(3,73 \pm 0,06) \cdot 10^{-3} \text{ T}$
Theoretisch	$(3,34 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ T}$

Also unterscheiden sich die Werten signifikant voneinander.

Ein Grund dafür könnte sein, dass die Durchmesser während des Experiments falsch bestimmt waren. Der Aufbau der Helmholtzspule hat es schwer gemacht, eine genaue Messung des Durchmessers zu machen. Es könnte auch sein, dass die beiden Helmholtzspulen nicht die gleiche Dimensionen hatten. Wenn der Durchmesser etwas kleiner geworden wäre, dann würde die berechnete Flussdichte auch größer sein, was näher an dem Experimentalwert ist.

Aus Konstruktion könnte man auch den Abstand zwischen der beiden Helmholtzspulen statt des tatsächlichen Durchmessers bzw. Radius von den Spulen gemessen haben, was während der Experiment nicht gemacht wurde. Hätte diese Messung stattgefunden, dann könnte man eventuell einen besseren Wert von  $R$  erhalten.

Außerdem ist die Messung von den Amplituden wegen der großen Schwankungen am maximalen bzw. minimalen Punkten eher ungenau. Auf dem Millimeter-Papier sieht man auch dazu die deutliche Geräusche bei der Wendepunkten. Ist die tatsächliche Amplitude kleiner, dann wird die berechnete Stromfluss  $B$  auch kleiner sein, was näher an dem theoretischen Wert ist.

Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  hat aber keinen Einfluss auf dem Ergebnis, wenn man seine eigene Messung macht. Aus der Zeichnung auf dem Millimeter-Papier gab es 3 Perioden zwischen  $t = 12 \text{ s}$  und  $t = 25 \text{ s}$ , also ist die Winkelgeschwindigkeit als  $\omega = 2\pi/T = 1,44997 \text{ rad s}^{-1}$  gemessen. Ist diesen Wert verwendet, dann erhält man wieder  $B = (3,73 \pm 0,06) \text{ T}$ , was keinen Unterschied macht.

Gäbe es keinen Rechenfehler, dann ist dieses Ergebnis sonst ohne Zusatzexperiment schwer zu erklären.

## Teilversuch 4: Induktion durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld

Aus dem Ohmschen Gesetz gilt:

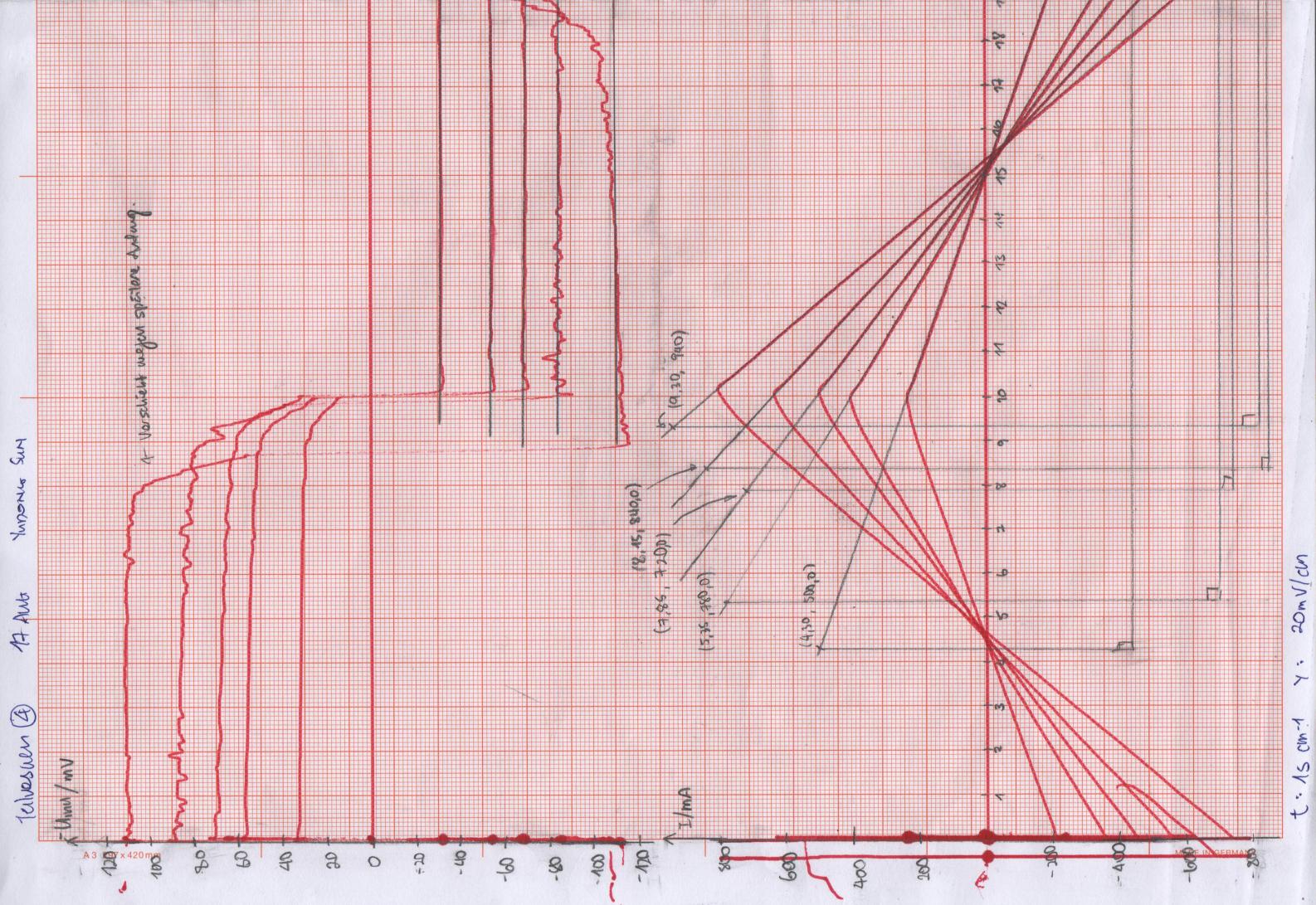
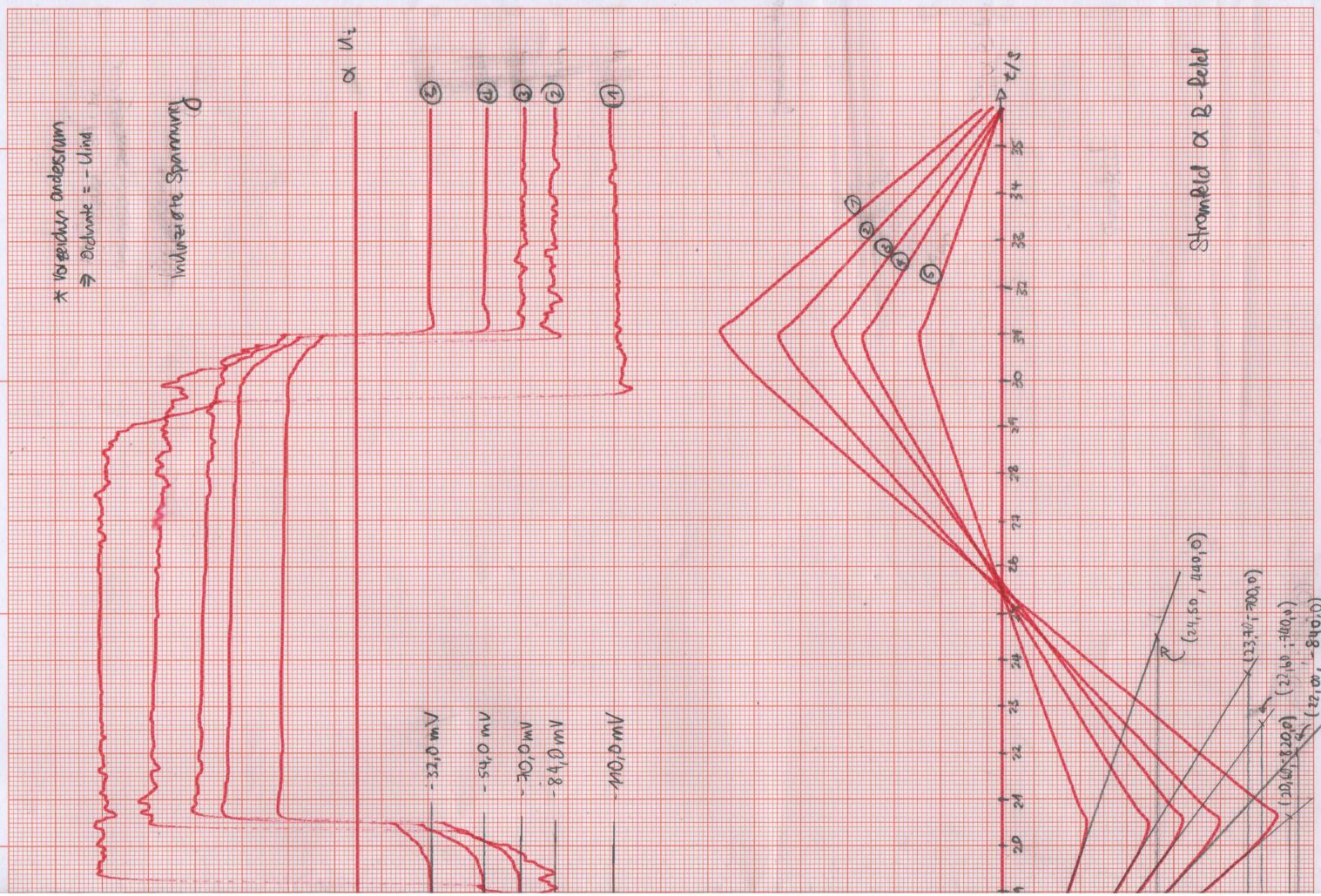
$$U = IR \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{U}{R} \quad (4.1)$$

Im Experiment haben wir als Widerstand  $(0,150 \pm 0,002) \Omega$ , somit skalieren wir die Abszisse mit  $1/0,150 \Omega$ :

$$y - \text{Skala} = \frac{20 \text{ mV cm}^{-1}}{0,150 \Omega} = 133 \frac{1}{3} \text{ mA cm}^{-1} = \frac{400 \text{ mA}}{3 \text{ cm}} \quad (4.2)$$

Aus dem Schreiberdiagramme

Kurve	Punkt 1	Punkt 2	Steigung/mA s <sup>-1</sup>	$U_{\text{ind}}$
①	(9,30, 940,0)	(20,60, -820,0)	-155,8	110,0
②	(8,15, 840,0)	(22,00, -840,0)	-121,3	84,0
③	(7,85, 720,0)	(22,60, -740,0)	-98,98	70,0
④	(5,35, 780,0)	(23,70, -700,0)	-80,65	54,0
⑤	(4,30, 500,0)	(24,50, -440,0)	-46,53	32,0



Aus dem Induktionsgesetz gilt:

$$\begin{aligned} U_{\text{ind}} &= -N_{\text{ind}} \frac{d}{dt} (\vec{B} \cdot \vec{A}) = -N_{\text{ind}} A \frac{dB}{dt} = -N_{\text{ind}} A \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{N}{r} \cdot \frac{dI}{dt} \\ \Rightarrow U_{\text{ind}} &= \left[ -\left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{2\mu_0 N_{\text{ind}} N A}{R} \right] \cdot \frac{dI}{dt} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Also ist  $U_{\text{ind}}$  proportional zu  $\frac{dI}{dt}$ , mit  $R$  = Durchmesser wie im Teilversuch 3.

Die induzierte Spannung  $U_{\text{ind}}$  wurde dann gegen die Steigung  $\frac{dI}{dt}$  im gnuplot geplottet und eine Kurveanpassung zur  $U_{\text{ind}} = m \frac{dI}{dt} + c$  durchgeführt. Der Fehler der jeweiligen Punkten sind hier nicht berücksichtigt:

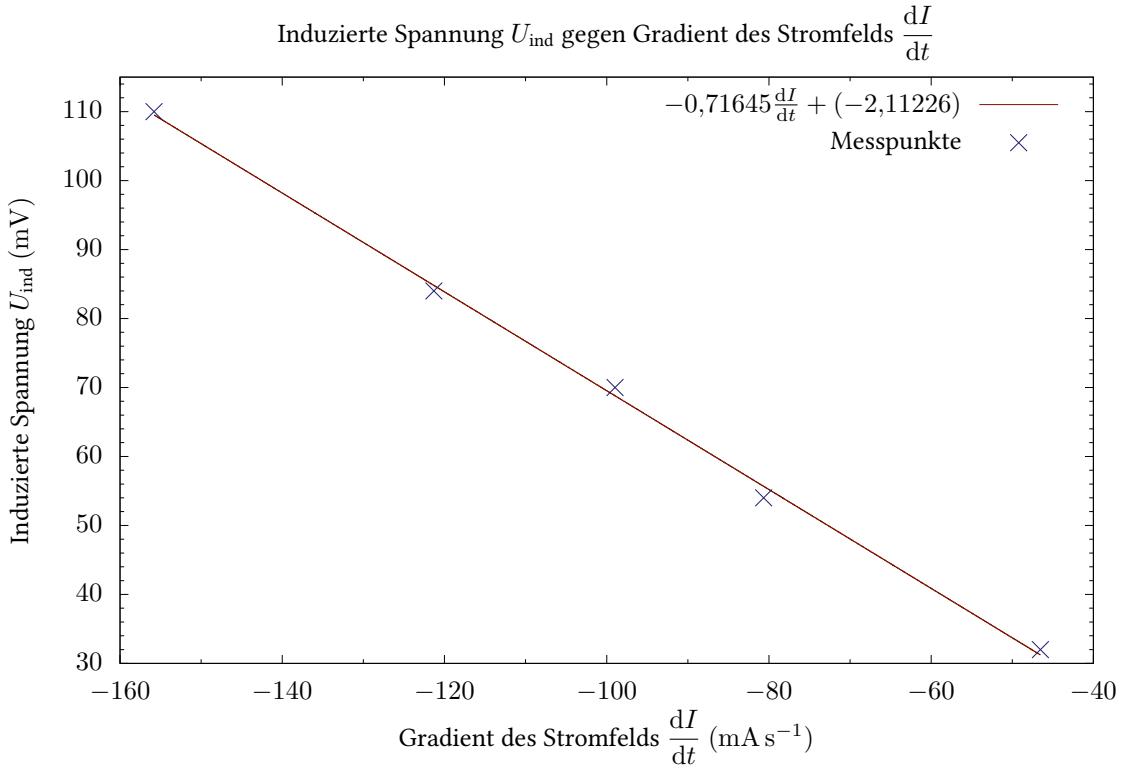


Abbildung 4.1: Überprüfung des Induktionsgesetzes  
 $\chi^2_{\text{red}} = 1,89758 \implies$  Verträgliche Anpassung

Als Endergebnis erhalten wir:

Variable	Wert	Gerundet
$m$	$(-0,71645 \pm 0,01671) \text{ mV s mA}^{-1}$	$(-0,716 \pm 0,017) \text{ mV s mA}^{-1}$
$c$	$(-2,112 \pm 1,791) \text{ mV}$	$(-2,1 \pm 1,8) \text{ mV}$

Die Gerade soll durch den Nullpunkt liegen, was verträglich mit unserem Ergebnis ist, da Null im Dreifachen des Fehlerintervalls von  $c$  liegt.

Der theoretische Wert von  $m$  ist gegeben durch:

$$m = -\left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{2\mu_0 N_{\text{ind}} NA}{R} \quad (4.4)$$

$$\Delta m = m \frac{\Delta R}{R} \quad (4.5)$$

Mit der Werten:

Variable	Wert	Bedeutung
$R$	$(27,57 \pm 0,05) \text{ cm}$	Durchmesser der Helmholtzspule
$A$	$23,5 \text{ cm}^2$	Fläche der Induktionsspule
$N_{\text{ind}}$	82 800	Windungszahl der Induktionsspule
$N$	528	Windungszahl der Helmholtzspule
$\mu_0$	$1,257 \cdot 10^{-6} \text{ N A}^{-2}$	Magnetische Feldkonstante

erhalten wir:

$$m = -\left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{2(1,257 \cdot 10^{-6} \text{ N A}^{-2})(82800)(528)(2,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2)}{(0,2757 \text{ m})} \\ = -0,670341 \text{ Vs A}^{-1} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (4.6)$$

$$\Delta m = (0,670341 \text{ Vs A}^{-1}) \frac{0,05 \text{ cm}}{27,57 \text{ cm}} = 1,21571 \cdot 10^{-3} \text{ Vs A}^{-1} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (4.7)$$

$$\Rightarrow m = (-0,6703 \pm 0,0013) \text{ Vs A}^{-1} = (-0,6703 \pm 0,0013) \text{ mVs mA}^{-1} \quad (4.8)$$

Zusammengefasst haben wir:

Experimental	$(-0,716 \pm 0,017) \text{ H}$
Theoretisch	$(-0,6703 \pm 0,0013) \text{ H}$

Der theoretische Wert liegt also im Dreifachen des Fehlerintervalls von dem experimental bestimmten Wert. Die zwei Werten sind damit verträglich miteinander und es gilt das Induktionsgesetz.

## A gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 2

```

1  #!/usr/bin/env gnuplot
2
3  set term epslatex color size 6in, 4in
4  set output "tv2-plot.tex"
5  set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'
6
7  set title "Torsionswinkel $\\varphi$ gegen $\\sin(\\alpha/\\si{\\degree})$"
8  set ylabel "Torsionswinkel $\\varphi$ ($\\si{\\degree}$)"
9  set xlabel "$\\sin(\\alpha/\\si{\\degree})$"
10
11 set mxtics
12 set mytics
13 set samples 10000
14
15 set xrange[0.1:1.05]
16
17 f(x) = m*x + c
18
19 # (x, y, xdelta, ydelta)
20 fit f(x) "tv2.dat" u
21   ↪ (sin(((\$1)/180)*pi)):2:(cos(((\$1)/180)*pi)*2*(pi/180)):(2.5) xyerrors via
22   ↪ m,c
23
24 set key top right spacing 1.3
25
26 titel = "$".gprintf("%.5f", m)." \\sin(\\alpha/\\si{\\degree})" +
27   ↪ (".".gprintf("%.5f", c).")$"
plot f(x) title titel lc rgb 'dark-magenta', \
28   "tv2.dat" u (sin(((\$1)/180)*pi)):2:(cos(((\$1)/180)*pi)*2*(pi/180)):(2.5)
29   ↪ with xyerrorbars title "Messpunkte" pointtype 0 lc rgb
30   ↪ 'dark-goldenrod'
```

mit tv2.dat:

#alpha	phi			
# 0	0,0	7	50	-50,0
10	-10,0	8	60	-58,0
20	-22,0	9	70	-60,5
30	-33,5	10	80	-62,5
40	-42,0	11	90	-64,0

Rohausgabe:

```

1 final sum of squares of residuals : 1.14619
2 rel. change during last iteration : -5.81173e-16
3
4 degrees of freedom      (FIT_NDF)          : 7
5 rms of residuals        (FIT_STDFIT)    = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.404649
6 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf    : 0.163741
```

```

7   p-value of the Chisq distribution (FIT_P) : 0.992114
8
9   Final set of parameters      Asymptotic Standard Error
10  =====            =====
11  m      = -64.5185      +/- 1.445      (2.24%)
12  c      = -0.140149      +/- 1.145      (816.9%)
13
14   correlation matrix of the fit parameters:
15     m       c
16   m      1.000
17   c      -0.942  1.000

```

## B Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 3

Python Code zur Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung

```

1  #!/usr/bin/env python3
2
3  import mpmath as mp
4
5  arr = ["1.04", "1.04", "1.065", "1.025", "1.05", "1.05", "1.055", "1.055",
6      ↪ "1.05", "1.07", "1.08", "1.055", "1.055", "1.07", "1.055", "1.025",
7      ↪ "1.04"]
8  mparr = [mp.mpf(x) for x in arr]
9
10 s = mp.fsum(mparr)
11 mittelwert = mp.fdiv(s, len(mparr))
12
13 difference = [mp.fsub(x, mittelwert) for x in mparr]
14 stdev = mp.sqrt(mp.fdiv(mp.fsum(difference, squared=True),
15      ↪ mp.fsub(len(mparr), 1)))
16
17 print("Mittelwert:\t\t", mittelwert)
18 print("Standardabweichung:\t", stdev)

```

Rohausgabe:

```

1  Mittelwert:      1.05176470588235
2  Standardabweichung: 0.0148892973800173

```

## C gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 4

```

1  #!/usr/bin/env gnuplot
2
3  set term epslatex color size 6in, 4in
4  set output "tv4-plot.tex"
5  set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'
6
7  set title "Induzierte Spannung $U_{\text{ind}}$ gegen Gradient des
    ↪ Stromfelds $\displaystyle \frac{dV}{I}(t)$"

```

```

8 set ylabel "Induzierte Spannung $U_{\text{ind}}$ $(\text{milli}\text{volt})$"
9 set xlabel "Gradient des Stromfelds $\text{\\displaystyle } \frac{\text{d}V}{\text{d}x}\text{[t]}$"
10    $\text{(\text{milliampere}}\text{/per}\text{second})$"
11
12 set mxtics
13 set mytics
14 set samples 10000
15
16 set yrangle [30:115]
17
18 f(x) = m*x + c
19
20 # (x, y, xdelta, ydelta)
21 fit f(x) "tv4.dat" u 1:2 via m,c
22
23 set key top right spacing 1.3
24
25 titel = "$".gprintf("%.5f", m)." \dv{I}{t} + (" .gprintf("%.5f", c)." )$"
26 plot f(x) title titel lc rgb 'orangered4', \
27     "tv4.dat" u 1:2 title "Messpunkte" pointtype 2 pointsize 2 lc rgb
28     'midnight-blue'

```

mit tv4.dat:

```

1 # dI/dt U_ind
2 -155,8 110,0
3 -121,3 84,0
4 -98,98 70,0
5 -80,65 54,0
6 -46,53 32,0

```

Rohausgabe:

```

1 final sum of squares of residuals : 5.69274
2 rel. change during last iteration : -2.16867e-13
3
4 degrees of freedom (FIT_NDF) : 3
5 rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 1.37753
6 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 1.89758
7
8 Final set of parameters Asymptotic Standard Error
9 ===== =====
10 m = -0.716451 +/- 0.01671 (2.332%)
11 c = -2.11226 +/- 1.791 (84.78%)
12
13 correlation matrix of the fit parameters:
14      m   c
15 m  1.000
16 c  0.939  1.000

```