

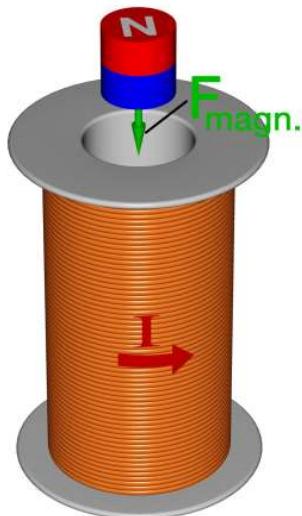
Laborversuch

E4.3

Elektromagnetische Kräfte

27.03.2019

Windisch



Versuchsleiter: Burkhardt Simon

Assistent: Rosenmund Jonas

Dozent: Prof. Dr. Minamisawa Renato

Grundlagenlabor 4 – EIT – FS2019

Inhalt

1.	Arbeitsgrundlagen	3
1.1	Theoretische Grundlagen zur magnetischen Kraft.....	3
2.	Durchführung	5
2.1	Versuchsanordnung.....	5
2.2	Messvorgang	6
2.3	Proben Versuchsobjekt	6
2.4	Messungen	7
3.	Auswertung	8
3.1	Kalibrationskennlinie	8
3.2	Überprüfen des B-Feldes	9
3.3	Kraftmessung $F(z)$ verschiedener Permanentmagneten.....	10
3.4	Kraftmessung $F(z)$ Weicheisen	13
4.	Fehlerrechnung	14
4.1	Fehlerquellen.....	14
4.2	Berechnung des Fehlers	14
4.2.1	Statistische Fehler	14
4.2.2	Systematische Fehler.....	14
4.2.3	Berechnung des gesamten Fehlers	15
5.	Resultate und Diskussion	16
6.	Quellen	17
7.	Anhang.....	17

1. Arbeitsgrundlagen

1.1 Theoretische Grundlagen zur magnetischen Kraft

Das Magnetfeld B entlang der Mittelachse einer einlagigen Zylinderspule wird durch die folgende Formel beschrieben. Dabei ist der Nullpunkt in der Mitte der Zylinderspule.

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 NI}{l} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{l/2 + z}{\sqrt{(l/2 + z)^2 + R^2}} + \frac{l/2 - z}{\sqrt{(l/2 - z)^2 + R^2}} \right] \quad (1.1)$$

Beschreibung	Symbol	Einheit
magnetische Flussdichte	B	T
magnetische Feldkonstante	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Anzahl Windungen	N	-
Strom durch die Spule	I	A
Länge der Zylinderspule	l	m
Position innerhalb der Spule	z	m
Radius der Spule	R	m

Nun wird durch das Einführen eines Permanentmagneten in die Zylinderspule ein weiteres B-Feld eingeführt. Der Permanentmagnet reagiert auf das in der Spule vorherrschende B-Feld und wird von diesem entweder angezogen oder abgestossen. Auf den Permanentmagneten wirkt eine Kraft. Die Kraft wird durch folgende Gleichung beschrieben.

$$\vec{F} = \int_{A_N} (+M) \cdot \vec{B}_{Sp,N} \, dA + \int_{A_S} (-M) \cdot \vec{B}_{Sp,S} \, dA = M \cdot \left(\int_{A_N} \vec{B}_{Sp,N} \, dA - \int_{A_S} \vec{B}_{Sp,S} \, dA \right) \quad (1.2)$$

Beschreibung	Symbol	Einheit
Integral über die Fläche am Nordpol des Permanentmagneten	A_N	-
Integral über die Fläche am Südpol des Permanentmagneten	A_S	-
Polstärke des Permanentmagneten	M	
externes Magnetfeld (Vektor)	B_{Sp}	T
Integrationsvariable (Flächenintegral)	dA	m^2
Kraftvektor	F	N

Bei einem genügend grossen Verhältnis zwischen den Radien des Permanentmagneten und der Zylinderspule kann man folgende Annahmen treffen.

- Das externe Magnetfeld B_{Sp} trifft senkrecht auf die Polflächen des Magneten auf.
- Die Oberflächenladungsdichte M ist auf den Polen des Magneten konstant
- Das externe B-Feld ist an beiden Polen konstant

Durch diese Annahmen lässt sich die Formel (1.2) vereinfacht darstellen:

$$F = M \cdot A \cdot (B_{Sp,N} - B_{Sp,S}) = \frac{B_r}{\mu_0} \cdot A \cdot (B_{Sp,N} - B_{Sp,S}) \quad (1.3)$$

Beschreibung	Symbol	Einheit
Kraft auf den Permanentmagneten wirkend	F	N
Oberflächenladungsdichte / Polstärke	M	
externes Magnetfeld an der Position des Nordpols	$B_{Sp,N}(z)$	T
externes Magnetfeld an der Position des Südpols	$B_{Sp,S}(z)$	T
Remanenzfeldstärke des Permanentmagneten	B_r	T
magnetische Feldkonstante	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Position relativ zur Zylinderspulenmitte (Formel 1.1)	z	m

2. Durchführung

2.1 Versuchsanordnung

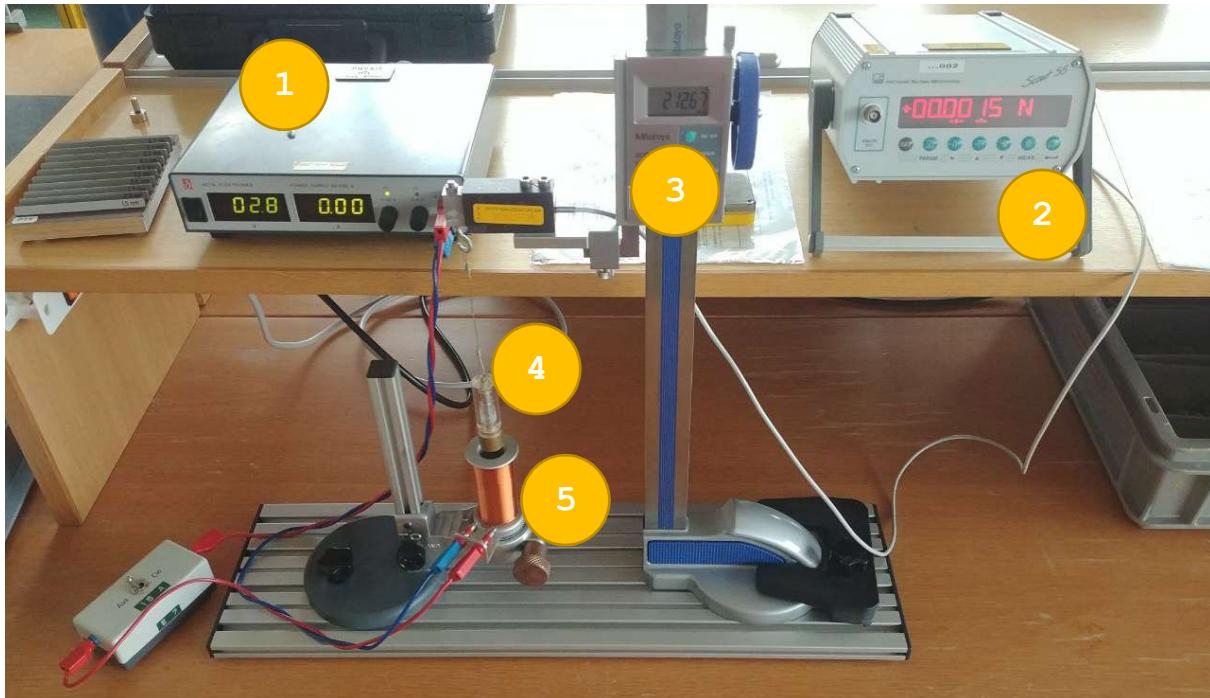


Abbildung 1: Der gesamte Versuchsaufbau, mit

Die Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau während dem ersten Versuch zur Messung der Beleuchtungsstärke.

Nr	Beschreibung
1	Delta Elektronika Power Supply ES 030-5
2	Kraftmessgerät HBM Scout55 – (Inventar-Nr. P-P8-001)
3	Distanzmessgerät
4	Probe (Permanentmagnet)
5	ALU-Spulenkörper 6x79 Wdg. / l = 68.0 ± 0.5 mm

2.2 Messvorgang

Gemäss Versuchsanleitung muss zuerst die Kalibration des Messverstärkers vorgenommen werden.

(Folgende Anweisungen gelten sinngemäss, wenn z.B. die derzeitige Wägezelle ersetzt werden musste).

1. Machen Sie den Messverstärker der Wägezelle betriebsbereit:

- Der Messverstärker soll so eingestellt werden, dass er Laständerungen von 1g anzeigt. Testen Sie, welche Ziffern überhaupt aktiv sind und erhöhen Sie ev. den Nennwert (stellen Sie diesen auf einen runden Wert und nicht auf eine "krumme" Zahl wie 2354).
- Wenn der Dezimalpunkt falsch eingestellt ist oder eine falsche Einheit angezeigt wird und Sie dies stört, korrigieren Sie die entsprechenden Einstellungen.

Zusammengefasst: Sofern die Anzeige des Messverstärkers eine ausreichende Auflösung zeigt, kann man im Prinzip auch mit "falschen" Einstellungen leben, da wir so oder so eine Kalibrationskennlinie aufnehmen. Ordentlichere Leute bevorzugen es aber, das Gerät so einzustellen, dass Last und angezeigter Wert übereinstimmen.

2. Erstellen Sie mit mindestens zehn Gewichten eine Kalibrationskennlinie, welche den Bereich Ihres Experimentes gerade abdeckt. Der Fit einer Geraden an die Messwerte erlaubt es dann, Linearität und Rauschen der Messanordnung zu beurteilen. Ferner erlaubt diese Kennlinie bei Bedarf die Umrechnung Ihrer Messresultate in "kalibrierte" Messergebnisse.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

1. Kontrolle des Magnetfeldes auf der Spulenachse bei konstantem Strom
2. Messung der Kraft auf einen Zylindermagneten in der Spule entlang der Spulenachse bei konstantem Strom
3. Kraftmessung wie in 2. bei einer fixen Position und variierendem Strom
4. (wie 2.) 2 weitere Messungen der Kraft auf zwei Zylindermagneten mit anderer Form als in 2. verwendet
5. (wie 2.) Kraftmessung auf einen weichmagnetischen Zylinder anstelle eines Magneten

2.3 Proben Versuchsobjekt

Beschreibung	d [mm]	l [mm]
Permanentmagnet 1	6	13
Permanentmagnet 2	15	8
Permanentmagnet 3 (3x 6mm/13mm)	6	39
Weicheisenmagnet	18.4	25

2.4 Messungen

Die Messdaten sind im Anhang zu finden

Mit der nachfolgenden Funktion werden die Messwerte gefittet. Der Offset z0 wird in der Kalibrationskennlinie des B-Feldes (3.2) erläutert.

$$\begin{aligned}
 & Br/\mu_0 * \pi * (dm/2)^2 * \\
 & ((\mu_0 * N * I)/len * 1/2 * ((len/2 + (x-z0))/\sqrt{(len/2+(x-z0))^2} \\
 & + R^2)) + ((len/2 - (x-z0))/\sqrt{(len/2-(x-z0))^2 + R^2})) \\
 & - (\mu_0 * N * I)/len * 1/2 * ((len/2 + (x+lm-z0))/\sqrt{(len/2+(x+lm-z0))^2 + \\
 & R^2})) \\
 & + ((len/2 - (x+lm-z0))/\sqrt{(len/2-(x+lm-z0))^2 + R^2})))
 \end{aligned}$$

Beschreibung	Variable	Wert	Konstant/Fit
Remanenzfeldstärke	Br	-	Fit
magnetische Feldkonstante	mu0	$4*\pi*10^{-7}$	Konstant
Durchmesser des Permanentmagneten	dm	gemäss Objekt	Konstant
Anzahl Windungen der Spule	N	474	Konstant
Strom durch die Spule	I	0.6	Konstant
Länge der Spule	len	0.068	Konstant
z-Position des Magneten	x	Messwert	Konstant
z-Offset der Magnetposition	z0	-	Fit
Radius der Spule	R	0.014	Konstant
Länge des Permanentmagneten	lm	gemäss Objekt	Konstant

3. Auswertung

Nachfolgend werden die Messwerte und deren angenäherte Funktionen grafisch dargestellt.

3.1 Kalibrationskennlinie

Für die Kalibrationskennlinie wurden 10 Gewichte verwendet und die Kraft gemessen. Erwartet wird eine lineare Kennlinie mit Starpunkt $(0, 0)$ kg. Die Kennlinie wird mit einer Geraden mit Offset $y = m*x+q$ gefittet.

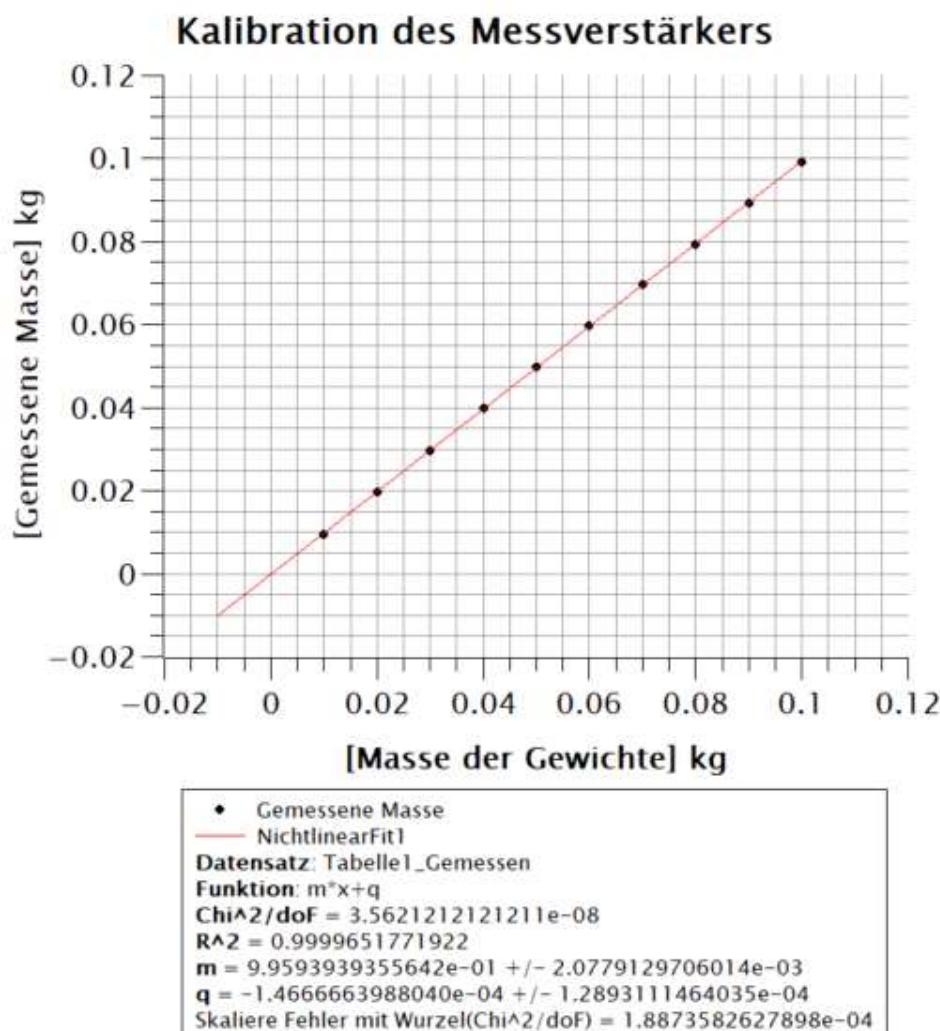
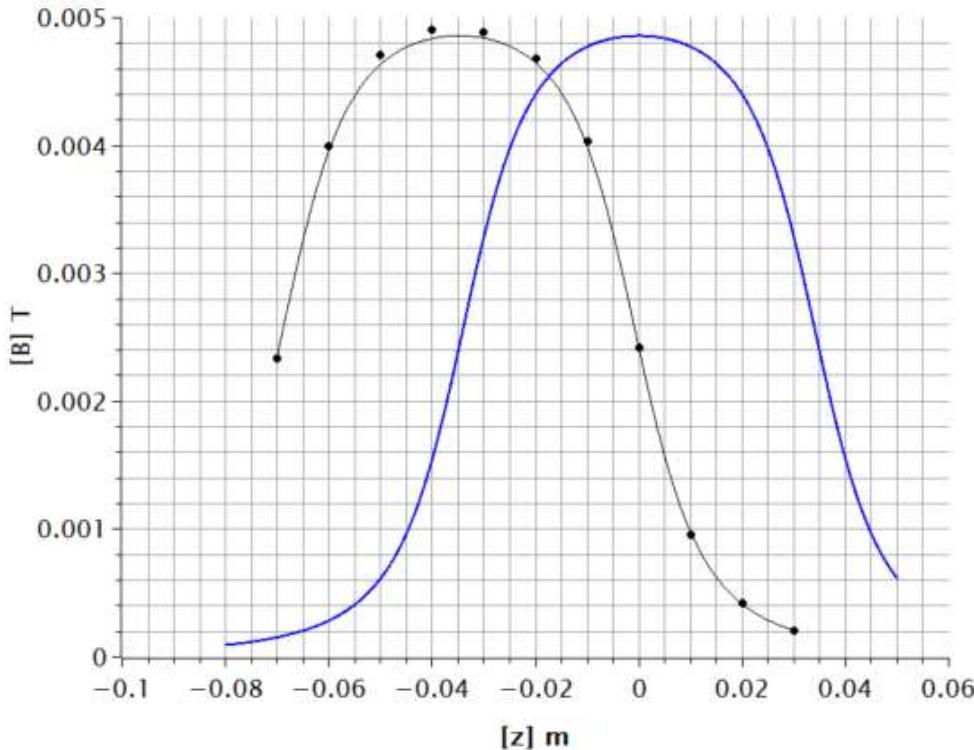


Abbildung 2: Kalibrationskennlinie für die Kraftmessung mit 10 Gewichten von 10 – 100g

3.2 Überprüfen des B-Feldes

Die Kurve wurde mit dem Teslameter und einer Hallsonde aufgenommen. Erwartet wird eine glockenförmige Kurve mit dem Peak in der Mitte der Spule bei $z = 0$.

Magnetisches B-Feld innerhalb einer stromdurchflossenen Zylinderspule



• B
 — F1 (theoretische Kurve)
 — NichtlinearFit1
Datensatz: Tabelle1_B
Funktion: $(\mu_0 \cdot N \cdot I) / len^{1/2} \cdot (((len/2 + (x-z0)) / \sqrt{(len/2 + (x-z0))^2 + R^2}) + ((len/2 - (x-z0)) / \sqrt{(len/2 - (x-z0))^2 + R^2}))$
 $\text{Chi}^2/\text{dof} = 1.7434802145274e-09$
 $R^2 = 0.9994927639025$
 $z0 = -3.4840886454754e-02 \pm 1.2919571173011e-04$
 Skaliere Fehler mit Wurzel(Chi^2/dof) = $4.1755002269517e-05$
 I = 0.6 (Konstante)
 N = 474 (Konstante)
 R = 0.014 (Konstante)
 len = 0.068 (Konstante)
 $\mu_0 = 1.256637061436e-06$ (Konstante)

Abbildung 3: Vergleich der gemessenen und erwarteten B-Feldkurve innerhalb der verwendeten Zylinderspule bei einem Strom von 0.6A

Die Messpunkte liegen auf der z-Achse deutlich neben der erwarteten Kurve. Aus diesem Grund werden die Messpunkte mit einem Offset z_0 gefittet. Für die nachfolgenden Messungen wird die Formel 1.1 um diesen Offset ergänzt.

3.3 Kraftmessung F(z) verschiedener Permanentmagneten

Nachfolgend sind die 3 Messungen mit 3 verschiedenen Magneten aufgeführt. Für den Fit wird die Formel 1.2 mit z-Offset verwendet.

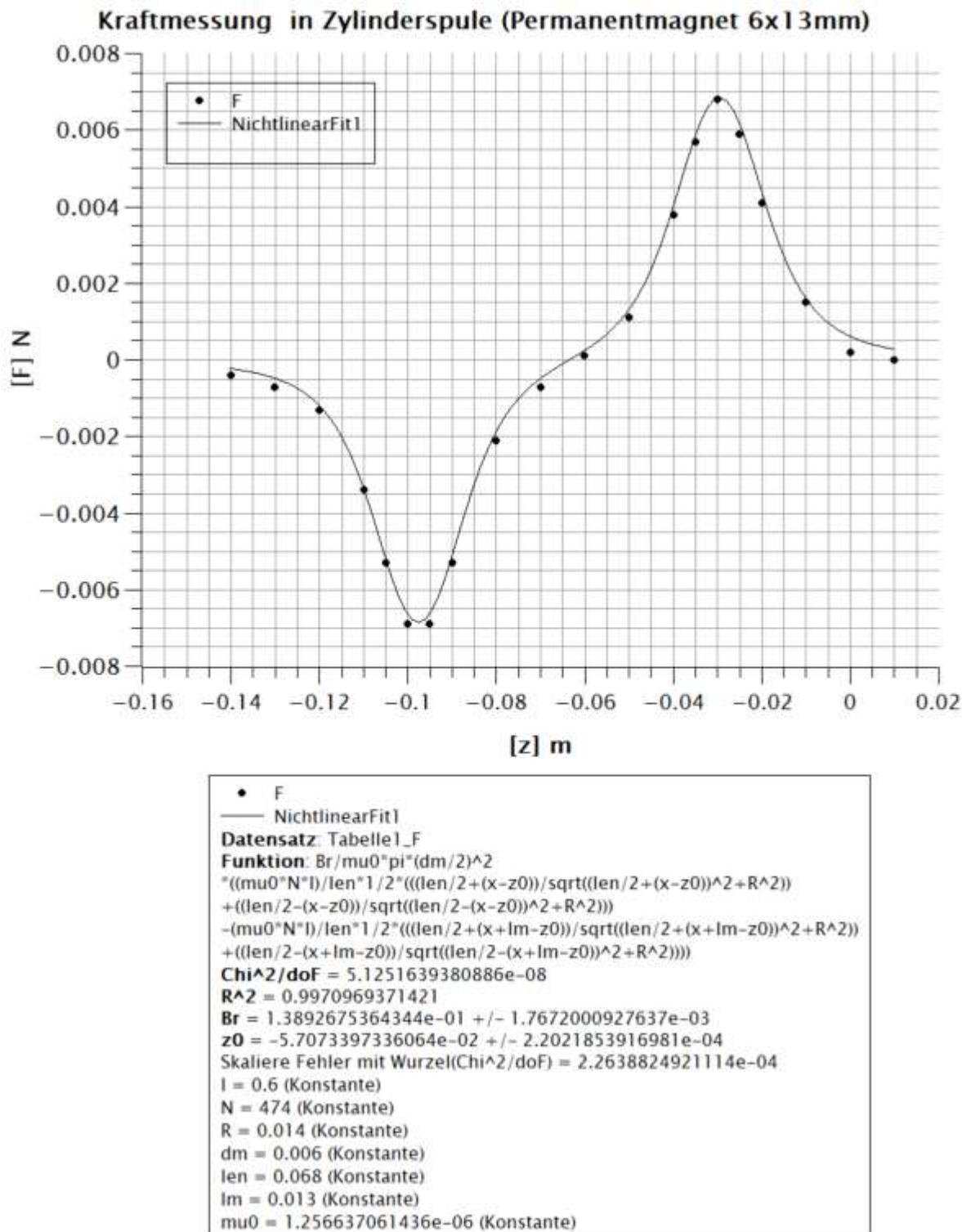
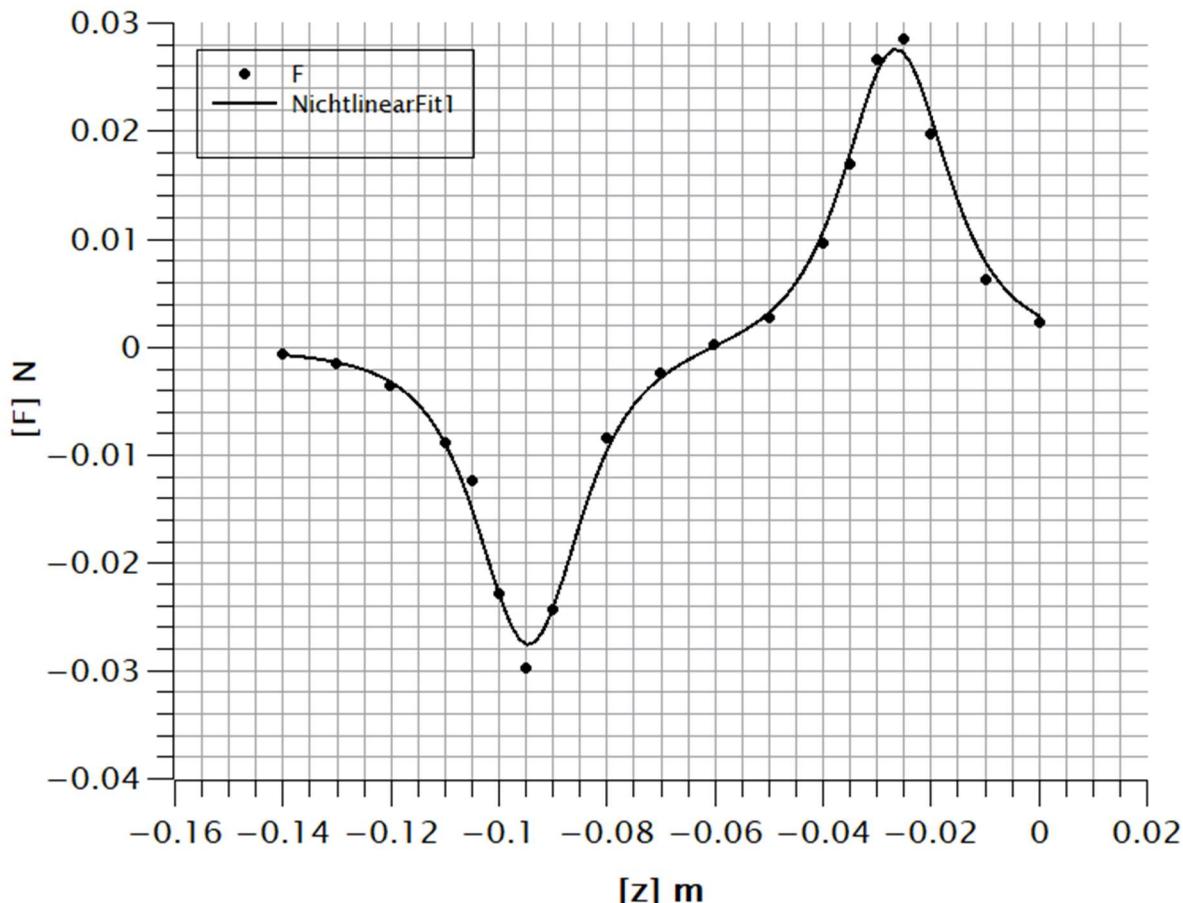


Abbildung 4: Gemessene Kraft auf einen Permanentmagneten $d=6\text{mm}$ / $l=13\text{mm}$ in einer mit $I=0.6\text{A}$ stromdurchflossenen Zylinderspule.

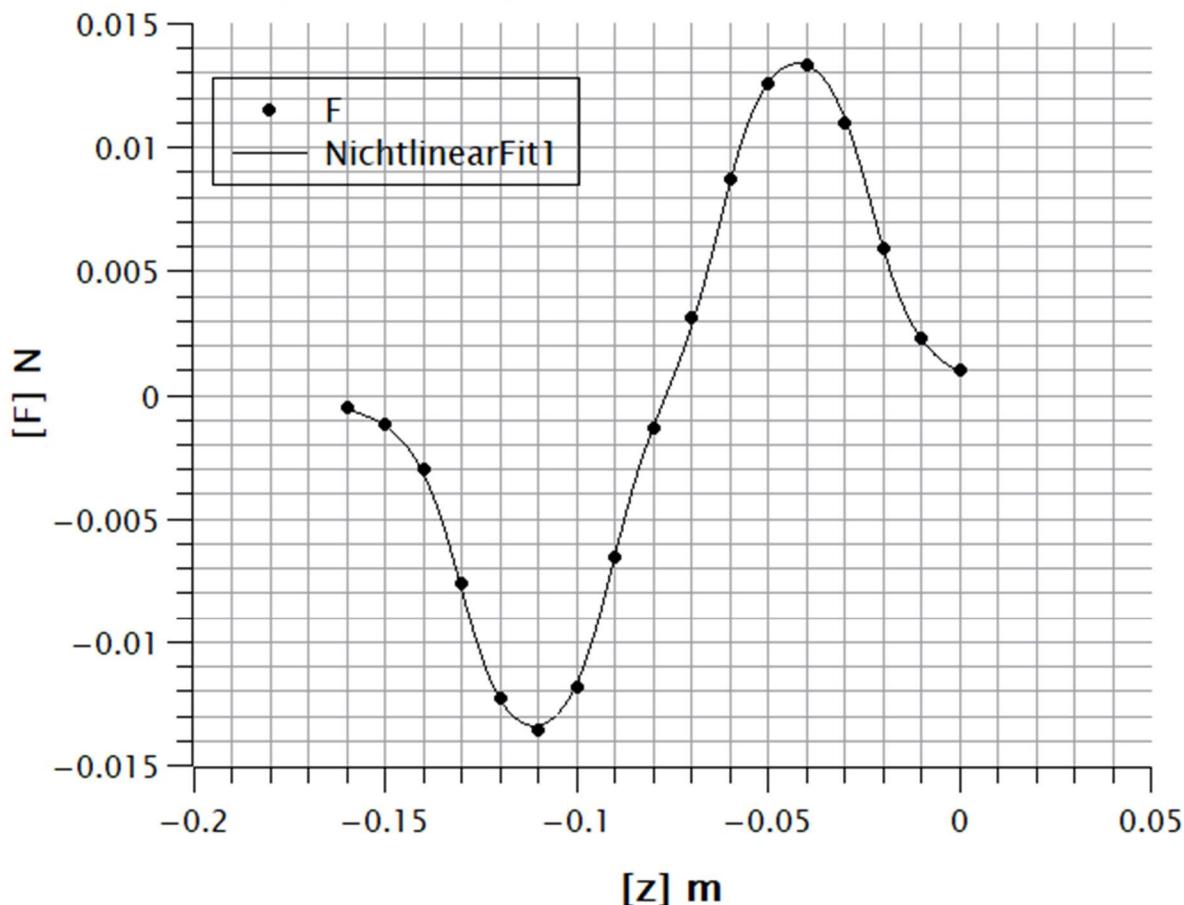
Kraftmessung in Zylinderspule (Permanentmagnet 8x15mm)



● F
 — NichtlinearFit1
Datensatz: Tabelle1_F
Funktion: $Br/\mu_0 \cdot \pi \cdot (dm/2)^2 \cdot ((\mu_0 \cdot N \cdot l)/len^2 \cdot 2^*(((len/2 + (x - z0))/sqrt((len/2 + (x - z0))^2 + R^2)) + ((len/2 - (x - z0))/sqrt((len/2 - (x - z0))^2 + R^2))) - (\mu_0 \cdot N \cdot l)/len^2 \cdot 1/2^*(((len/2 + (x + lm - z0))/sqrt((len/2 + (x + lm - z0))^2 + R^2)) + ((len/2 - (x + lm - z0))/sqrt((len/2 - (x + lm - z0))^2 + R^2))))$
 $\text{Chi}^2/\text{dof} = 1.4467288892712e-06$
 $R^2 = 0.9947240582573$
 $Br = 1.3708217966639e-01 \pm -2.4486224350262e-03$
 $z0 = -5.6510018521536e-02 \pm -2.8768622445241e-04$
 Skaliere Fehler mit Wurzel(Chi^2/dof) = $1.2028004361785e-03$
 $I = 0.6$ (Konstante)
 $N = 474$ (Konstante)
 $R = 0.014$ (Konstante)
 $dm = 0.015$ (Konstante)
 $len = 0.068$ (Konstante)
 $lm = 0.008$ (Konstante)
 $\mu_0 = 1.256637061436e-06$ (Konstante)

Abbildung 5: Gemessene Kraft auf einen Permanentmagneten $d=15\text{mm}$ / $l=8\text{mm}$ in einer mit $I=0.6\text{A}$ stromdurchflossenen Zylinderspule.

Kraftmessung in Zylinderspule (3 Permanentmagnete 6x13mm)



● F
 — NichtlinearFit1
Datensatz: Tabelle1_F
Funktion:

$$Br/\mu_0 \cdot \pi \cdot (dm/2)^2 \cdot ((\mu_0 \cdot N \cdot l)/len \cdot 1/2^2 \cdot (((len/2 + (x-z0))/sqrt((len/2 + (x-z0))^2 + R^2)) + ((len/2 - (x-z0))/sqrt((len/2 - (x-z0))^2 + R^2))) - (\mu_0 \cdot N \cdot l)/len \cdot 1/2^2 \cdot (((len/2 + (x+lm-z0))/sqrt((len/2 + (x+lm-z0))^2 + R^2)) + ((len/2 - (x+lm-z0))/sqrt((len/2 - (x+lm-z0))^2 + R^2))))$$

$$\text{Chi}^2/\text{dof} = 2.5142098811855e-08$$

$$R^2 = 0.9996779212492$$

$$Br = 1.4174858806695e-01 \pm 6.5693874488033e-04$$

$$z0 = -5.7254986483281e-02 \pm 1.0487331421601e-04$$

$$\text{Skaliere Fehler mit Wurzel}(\text{Chi}^2/\text{dof}) = 1.5856260218555e-04$$

$$l = 0.6 \text{ (Konstante)}$$

$$N = 474 \text{ (Konstante)}$$

$$R = 0.014 \text{ (Konstante)}$$

$$dm = 0.006 \text{ (Konstante)}$$

$$len = 0.068 \text{ (Konstante)}$$

$$lm = 0.039 \text{ (Konstante)}$$

$$\mu_0 = 1.256637061436e-06 \text{ (Konstante)}$$

Abbildung 6: Gemessene Kraft auf drei Permanentmagnete $d=6\text{mm}$ / $l=3 \times 13\text{mm}$ in einer mit $I=0.6\text{A}$ stromdurchflossenen Zylinderspule.

3.4 Kraftmessung F(z) Weicheisen

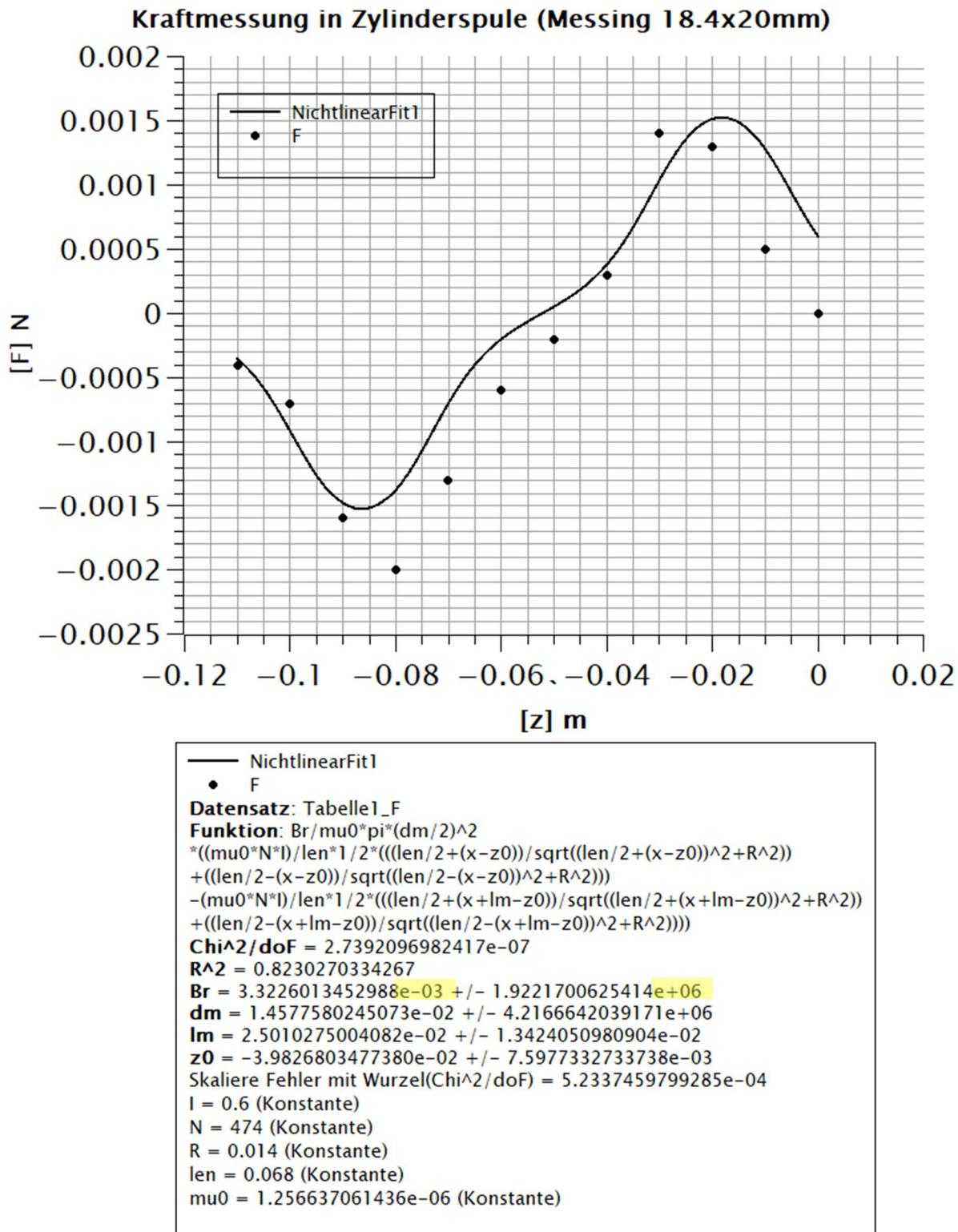


Abbildung 7: Gemessene Kraft auf einen Weicheisenzyylinder aus Messing mit $d=18.4\text{mm}$ / $l=20\text{mm}$ in einer mit $I=0.6\text{A}$ stromdurchflossenen Zylinderspule.

4. Fehlerrechnung

In diesem Abschnitt werden die Fehlerquellen bewertet und die Fehlerrechnung durchgeführt. Die Fehlerrechnung bezieht sich auf die gemessene Kraft F_z .

4.1 Fehlerquellen

Als Fehlerquellen werden sämtliche Variablen in der verwendeten Formel betrachtet. Die verwendeten Fehler sind in der untenstehenden Tabelle aufgelistet.

Grösse	Messgenauigkeit	Absolut	
Speisegerät	0.8%	$s_I = 0.08 * 0.6A$	spezifiziert
Länge der Spule	-	$s_{len} = 0.5mm$	spezifiziert
Radius der Spule	-	$s_R = 2.15mm$	äusserste zu mittlerer Windung
Kraftmessgerät	-	$s_{Fz} = 0.01N$	geschätzt
Länge der Magneten	-	$s_{lm} = 0.5mm$	geschätzt
Durchmesser der Magneten	-	$s_{dm} = 0.5mm$	geschätzt

4.2 Berechnung des Fehlers

4.2.1 Statistische Fehler

Zum statistischen Fehler gehören die beiden Variablen z_0 und B_r aus den gefitteten Kurven der jeweiligen Messung.

4.2.2 Systematische Fehler

Zu den systematischen Fehlern zählt die Abweichung des eingestellten Spulenstromes, die Länge und Durchmesser der Magnete sowie der Spule. Außerdem weist das Kraftmessgerät eine weitere Abweichung auf.

4.2.3 Berechnung des gesamten Fehlers

Mit der folgenden Formel erhält man den Messfehler.

$$s_{Fz} = \left(\left(\frac{\partial F_z}{\partial I} \Big|_{\bar{F}_z} * s_I \right)^2 + \left(\frac{\partial F_z}{\partial l_{Spule}} \Big|_{\bar{F}_z} * s_{l_{Spule}} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_z}{\partial R} \Big|_{\bar{F}_z} * s_R \right)^2 + \left(\frac{\partial F_z}{\partial l_{Magnet}} \Big|_{\bar{F}_z} * s_{l_{Magnet}} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_z}{\partial d_{Magnet}} \Big|_{\bar{F}_z} * s_{d_{Magnet}} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_z}{\partial z_0} \Big|_{\bar{F}_z} * s_{z_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_z}{\partial z_0} \Big|_{\bar{F}_z} * s_{z_0} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

statistischer Fehler aus Fit

Teilfehler	Magnet 1	Magnet 2	Magnet 3
$df I$	-10.1752 e-12	-241.9914 e-12	-128.5313 e-12
$df l_{Spule}$	4.0822 e-12	98.9426 e-12	55.5568 e-12
$df R$	-23.4615 e-12	-519.4444 e-12	-107.1597 e-12
$df l_{Magnet}$	16.1862 e-12	-87.9638 e-12	81.7933 e-12
$df d_{Magnet}$	-21.1984 e-12	-201.6595 e-12	-267.7736 e-12
$df z_0$	-19.2372 e-12	-543.8274 e-12	-53.5313 e-12
$df B_r$	-1.6179 e-12	-54.0320 e-12	-7.4460 e-12
total s_{Fz}	36.1293 e-12	802.8557 e-12	201.7455 e-12

Messung 4: Weicheisen

Wie bereits aus dem Plot und der ausgewerteten Variable B_r und deren Abweichung hervorgeht, lohnt sich eine Fehlerrechnung für diesen Fall nicht.

5. Resultate und Diskussion

Nachfolgend sind die drei Magnete im Vergleich aufgeführt.

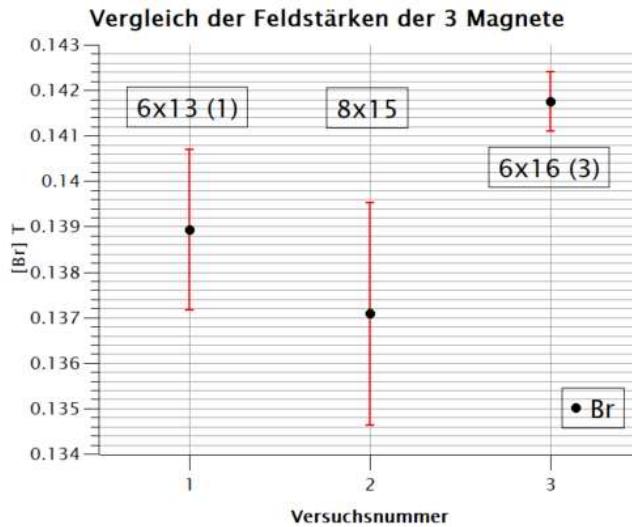


Abbildung 8: Auswertung der Remanenzfeldstärke von drei unterschiedlichen Permanentmagneten durch Kraftmessung in einer Zylinderspule.

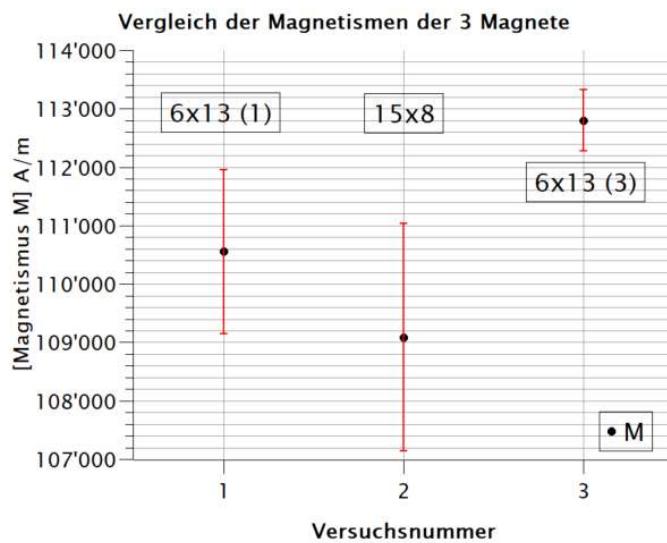


Abbildung 9: Auswertung des Magnetismusses von drei unterschiedlichen Permanentmagneten durch Kraftmessung in einer Zylinderspule.

Die Remanenzfeldstärke der Permanentmagnete konnte plausibel bestimmt werden. Erstaunlich ist einzig, dass ein Dreifachfachen des 6x13er Magneten nicht zu einer Dreifachung dessen Magnetismusses führt.

Die Auswertung des Weichmagneten hat nicht funktioniert. Die Abweichung der gefitteten Werte ist grösser als 9 Zehnerpotenzen. Die verwendete Funktion zur Analyse von Permanentmagneten eignet sich nicht für weichmagnetische Objekte.

6. Quellen

There are no sources in the current document.

7. Anhang

Veränderung des Magnetfeldes durch Änderung des Stromes durch die Spule

Messposition: z = -30mm

Magnet: Magnet 2 / D = 15mm / l = 8mm

I [A]	F [N]
0.7	0.0311
0.65	0.0289
0.6	0.027
0.55	0.0247
0.5	0.0226
0.45	0.0204
0.4	0.0178
0.35	0.0159
0.3	0.0139
0.25	0.0115
0.2	0.0094
0.15	0.007
0.1	0.0048
0.05	0.0025
0	0

Kalibrationskennlinie

Messung des B-Feldes entlang der Spulenachse

z [m]	B [T]
0.03	0.00021
0.02	0.00042
0.01	0.00096
0	0.00242
-0.01	0.00403
-0.02	0.00468
-0.03	0.00489
-0.04	0.00491
-0.05	0.00471
-0.06	0.004
-0.07	0.00234

Kraftmessung mit verschiedenen Magneten

Spulenstrom = 0.6A

Magnet 1 1 Stk. D = 6mm l = 13mm		Magnet 2 1 Stk. D = 15mm l = 8mm		Magnet 3 3 Stk. D = 6mm l = 3x13mm		Weicheisen Messing	
z [mm]	F [N]	z [mm]	F [N]	z [mm]	F [N]	z [mm]	F [N]
10	0						
0	0.0002	0.01	0.0023	0	0.001	0	0
-10.04	0.0015	-10	0.0063	-10.01	0.0023	-10.01	0.0005
-20.02	0.0041	-20.08	0.0197	-20.02	0.0059	-20.01	0.0013
-25.05	0.0059	-25.02	0.0285	-30.03	0.011	-30.02	0.0014
-30.02	0.0068	-30.02	0.0266	-40.04	0.0133	-40.01	0.0003
-35.05	0.0057	-35.05	0.0169	-50.06	0.0126	-50.02	-0.0002
-40.04	0.0038	-40.02	0.0096	-60.03	0.0087	-60.05	-0.0006
-50.04	0.0011	-50.03	0.0028	-70.04	0.0031	-70.06	-0.0013
-60.08	0.0001	-60.05	0.0003	-80.09	-0.0013	-80.03	-0.002
-70.09	-0.0007	-70.06	-0.0024	-90.01	-0.0065	-90.05	-0.0016
-80.08	-0.0021	-80.04	-0.0084	-100.01	-0.0118	-100.03	-0.0007
-90.04	-0.0053	-90.06	-0.0244	-110.03	-0.0136	-110.01	-0.0004
-95.08	-0.0069	-95.02	-0.0298	-120.02	-0.0123		
-100.02	-0.0069	-100.06	-0.0228	-130.04	-0.0076		
-105	-0.0053	-105.06	-0.0123	-140.04	-0.003		
-110.04	-0.0034	-110.06	-0.0088	-150.04	-0.0012		
-120.02	-0.0013	-120.05	-0.0035	-160.05	-0.0005		
-130.07	-0.0007	-130.01	-0.0015				
-140.05	-0.0004	-140.08	-0.0006				

```
*****
% \details      : Fehlerrechnungen für E4.3
% \autor        : Simon Burkhardt
% \file         : glal4_phys_e4_3_Fehlerrechnung.m
% \date         : 19.04.2019
% \version      : 1.0
*****
clear all; clc; format shorteng;

% Fehler
s_I = 0.08 * 0.6; % Messgenauigkeit
s_R = 2.15 * 10^(-3); % geschaetzt
s_Fz = 0.01; % geschaetzt
s_len = 0.5e-3; % ALU-Spulenkoerper
s_lm = 5e-4; % geschaetzt
s_dm = 5e-4; % geschaetzt

mag1.zm = -0.0650415; % Mittelwert
mag1.Fm = -0.00019; % Mittelwert
mag1.dm = 6e-3;
mag1.lm = 13e-3;
mag1.Br = 1.38926e-1; % aus Fit
mag1.s_Br = 0.0017672; % aus Fit
mag1.z0 = -5.7073397e-2; % aus Fit
mag1.s_z0 = 2.20218e-4; % aus Fit

mag2.zm = -0.068987368;
mag2.Fm = -7.89474E-05;
mag2.dm = 15e-3;
mag2.lm = 8e-3;
mag2.Br = 1.37082e-1;
mag2.s_Br = 0.002448622;
mag2.z0 = -5.651e-2;
mag2.s_z0 = 1.2028e-3;

mag3.zm = -0.080032941;
mag3.Fm = 5.88235E-06;
mag3.dm = 6e-3;
mag3.lm = 3*13e-3;
mag3.Br = 1.417485e-1;
mag3.s_Br = 0.000656939;
mag3.z0 = -5.7254986e-2;
mag3.s_z0 = 1.048331e-4;

% alles Symbolisch für partielle Ableitung
syms dm z0 lm Fz z I len R Br;
mu0 = pi*4e-7;
N = 474;

Fz = Br*pi*(dm/2)^2 * ...
    ( (mu0 * N * I)/len * ...
    1/2*( ( (len/2 + (z-z0))/sqrt( (len/2+(z-z0))^2 + R^2) ) ...
    + ( (len/2 - (z-z0))/sqrt( (len/2-(z-z0))^2 + R^2) ) ) ...
    - (mu0 * N * I)/len * ...
    1/2*( ( (len/2 + (z+lm-z0))/sqrt( (len/2+(z+lm-z0))^2 + R^2) ) ...
    + ( (len/2 - (z+lm-z0))/sqrt( (len/2-(z+lm-z0))^2 + R^2) ) ) );

dF_dI = diff(Fz, I, 1);
dF_dlen = diff(Fz, len, 1);
dF_dR = diff(Fz, R, 1);
dF_dlm = diff(Fz, lm, 1);
dF_ddm = diff(Fz, dm, 1);
% Statistischer Fehler
dF_dz0 = diff(Fz, z0, 1);
dF_dBr = diff(Fz, Br, 1);
```

```
% Variablen substituieren
clear I len R lm dm Br;
I = 0.6;
len = 0.068;
R = 0.014;

z0 = mag1.z0;
lm = mag1.lm;
dm = mag1.dm;
Br = mag1.Br;
mag1.df_I = eval(subs(dF_dI, z, mag1.zm)) * s_I;
mag1.df_len = eval(subs(dF_dlen, z, mag1.zm)) * s_len;
mag1.df_R = eval(subs(dF_dR, z, mag1.zm)) * s_R;
mag1.df_lm = eval(subs(dF_dlm, z, mag1.zm)) * s_lm;
mag1.df_dm = eval(subs(dF_ddm, z, mag1.zm)) * s_dm;
mag1.df_z0 = eval(subs(dF_dz0, z, mag1.zm)) * mag1.s_z0;
mag1.df_Br = eval(subs(dF_dBr, z, mag1.zm)) * mag1.s_Br;

mag1.s_Fz = sqrt( mag1.df_I^2 + mag1.df_len^2 + mag1.df_R^2 ...
+ mag1.df_lm^2 + mag1.df_z0^2 + mag1.df_Br^2)

z0 = mag2.z0;
lm = mag2.lm;
dm = mag2.dm;
Br = mag2.Br;
mag2.df_I = eval(subs(dF_dI, z, mag2.zm)) * s_I;
mag2.df_len = eval(subs(dF_dlen, z, mag2.zm)) * s_len;
mag2.df_R = eval(subs(dF_dR, z, mag2.zm)) * s_R;
mag2.df_lm = eval(subs(dF_dlm, z, mag2.zm)) * s_lm;
mag2.df_dm = eval(subs(dF_ddm, z, mag2.zm)) * s_dm;
mag2.df_z0 = eval(subs(dF_dz0, z, mag2.zm)) * mag2.s_z0;
mag2.df_Br = eval(subs(dF_dBr, z, mag2.zm)) * mag2.s_Br;

mag2.s_Fz = sqrt( mag2.df_I^2 + mag2.df_len^2 + mag2.df_R^2 ...
+ mag2.df_lm^2 + mag2.df_z0^2 + mag2.df_Br^2)

z0 = mag3.z0;
lm = mag3.lm;
dm = mag3.dm;
Br = mag3.Br;
mag3.df_I = eval(subs(dF_dI, z, mag3.zm)) * s_I;
mag3.df_len = eval(subs(dF_dlen, z, mag3.zm)) * s_len;
mag3.df_R = eval(subs(dF_dR, z, mag3.zm)) * s_R;
mag3.df_lm = eval(subs(dF_dlm, z, mag3.zm)) * s_lm;
mag3.df_dm = eval(subs(dF_ddm, z, mag3.zm)) * s_dm;
mag3.df_z0 = eval(subs(dF_dz0, z, mag3.zm)) * mag3.s_z0;
mag3.df_Br = eval(subs(dF_dBr, z, mag3.zm)) * mag3.s_Br;

mag3.s_Fz = sqrt( mag3.df_I^2 + mag3.df_len^2 + mag3.df_R^2 ...
+ mag3.df_lm^2 + mag3.df_z0^2 + mag3.df_Br^2)
```