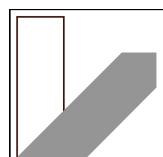


WS2020

PPA2

Magnetisches Moment

Charlotte Geiger - Manuel Lippert - Leonhard Schatt



Inhaltsverzeichnis

Nr.	Datum	Art der Arbeit
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		

Versuch MM:

Teilnehmer: Manuel Lippert, Leonhard Schatt, Charlotte Greiger

Datum: 18. November 2020

Titel des Versuchs: Magnetisches Moment

Gruppennummer: 4

Versuchsort: Tornähe

Betreuer: Bernhard Winkler

Gliederung:

1. Einführung
2. Fragen zur Vorbereitung
3. Auswertung
4. Fazit
5. Menüprotokoll
6. Nachtrag

S. 2

S. 3

S. 10

S. 26

S. 28

S. 37

1. Einleitung

Mit der Entdeckung der Röntgenstrahlung 1895 begann ein neuer Abschnitt in der Medizin: Erstmals bestand die Möglichkeit, in den blutleeren Knochenstrukturen, ohne ihn aufzuschneiden, zu untersuchen.

Daneben haben sich auch andere bildgebende Systeme in der medizinischen Diagnostik eingeführt. In der Nuklearmedizin wird die Anreicherung radioaktiver markierter Substanzen in bestimmten Organen gemessen und bildlich dargestellt. Bei Ultraschalluntersuchungen ermöglicht unterschiedliche reflektierter Schall der Aufbau eines Bildes.

Ein weiteres Verfahren ist die Kernspintomographie, die die seit 1976 technische Fortschritte nutzt, um die Dichte und die Relaxationszeiten der im menschlichen Körper enthaltenen Protonen abzubilden.

Dass magnetische Moment, dem wir in diesem Vorspiel unterstehen, berechnen und analysieren ist die Grundlage für das dieses Kernspintomographieverfahren.

Wir setzen uns mit magnetischen Dipolen aus und messen mit zwei unterschiedlichen Methoden deren magnetisches Moment.

Fragen, mit denen wir uns unterhalten werden sollen:

Welche Kräfte bzw. Drehmomente wirken auf den Dipol im Magnetfeld?

Wie ist die Schwingungsbewegung eines sphärischen Pendels?

Wie sieht die Präzessionsbewegung eines symmetrischen Kreisels aus?

2. Fragen zur Vorbereitung

1.

- Lorentz-Kraft auf Ladung q , q mit Geschwind. $v \perp$ zum B Feld:
$$F_L = q \cdot v \cdot B = q(v \times B) = I(l \times B) \quad (\text{mit } q \cdot v = I)$$

- Kraft auf Draht mit Länge l , Fläche A , Ladungsdichten n wirkt auf $n \cdot l \cdot A$ Teilchen

$$F = n \cdot l \cdot A \cdot F_L = n \cdot l \cdot A \cdot q \cdot v \cdot B$$

- Kraft auf einen Leiter \perp zu \vec{B} , von Strom I durchflossen:

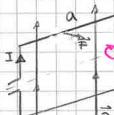
$$F = l \cdot I \cdot B$$

mit $I = n \cdot A \cdot v$ ($A \parallel v$, d.h. Fläche wird senkrecht von Ladungen durchsetzt)

- $|F_L| = |I|l|B|$ sind (mit l ist A zwischen Richtungsrichtung und Richtung der negat. Flussdichte \vec{B})

- In diesem Fall Draht \perp zum Magnetfeld $\Rightarrow \sin = 1$

$$\Rightarrow |F_L| = |I||l||B|$$

-  Drehmoment auf unteren Leiter: $M_u = \frac{a}{2} \cdot F = \frac{1}{2}ablB$
— " — oberen Leiter: $M_o = M_u = \frac{1}{2}ablB$

$$\Rightarrow \text{Gesamtes Drehmoment } M = M_o + M_u = ablB = A \cdot l \cdot B$$

\Rightarrow Verstärkung der eff. Formel $M = l \cdot A \cdot B$ $M = l \cdot B$

$$\Rightarrow M = l \cdot B = l \cdot A \cdot B \leftarrow \text{unabhängig von } l$$

- Die Form der Leiterschleife spielt keine Rolle, solange die umschlossene Fläche dass gleiche ist.

Der Grund dafür ist, dass der längste Form der Leiterschleife nicht in die Formel eintritt, da $M = l \cdot A \cdot B$

Analithisch:  $=$  $=$ 

\Rightarrow Alle schiefen Leiterschleifen erfordern dass gleiche Drehmoment.

✓

2. Berechnung des \vec{B} -Feldes für kreisförmigen Spulen mit Hilfe des Biot-Savart-Gesetzes

Leiterschleife liegt in $x-y$ -Ebene, gesucht ist \vec{B} -Feld auf z -Achse $\Rightarrow \vec{B}(z)$

$\vec{l} \rightarrow \vec{l}(p)$, da wir entlang \vec{dl} integrieren $\Rightarrow dl = dp \cdot \hat{e}(p)$

$$\vec{r}_{12} = \vec{r}_{12}(p)$$

$$\hat{e} = \begin{pmatrix} -R \sin \phi \\ R \cos \phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{r}_{12} = \begin{pmatrix} -R \sin \phi \\ R \cos \phi \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \vec{l} \times \vec{r}_{12} = \begin{pmatrix} R \cos \phi \\ R \sin \phi \\ R^2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow r_{12} = \sqrt{R^2 + z^2}$$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_{12}}{r_{12}^3} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R^2 dz}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \frac{1}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \cdot \left(\begin{pmatrix} R \sin \phi \\ -R \cos \phi \\ R^2 \end{pmatrix} \right) \Big|_0^{2\pi}$$

$$= \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi (R^2 + z^2)^{3/2}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ R^2 \cdot 2\pi \end{pmatrix} - \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi (R^2 + z^2)^{3/2}} \begin{pmatrix} R^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi (R^2 + z^2)^{3/2}} \cdot R^2 \cdot 2\pi \hat{e}_z + \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi (R^2 + z^2)^{3/2}} \cdot R^2 \hat{e}_z$$

un interessant, da nur nach z -Richtung gefragt war

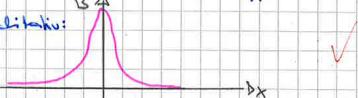
$$\Rightarrow \vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \hat{e}_z$$

✓

Flussdichte \vec{B} in Abhängigkeit vom Abstand z entlang der Achse der Leiterschleife

\rightarrow Magnetfeld ist maximal bei $z=0$ und fällt für $|z| \gg R$ versch. schnell ab als Spulenradius mit $\frac{1}{z^2}$ ab

\rightarrow Qualitativ:



✓

Damit eine Zylinderspule als kreisförmige Leiterschleife genutzt werden kann, muss die Drahtdickung klein gegenüber dem Radius und der Spule sein, oder im Extremfall eine sehr kurze Länge der Spule.

Beachtet werden muss auch die Windungsanzahl N . Bei geringer Windungsdichtheit $n = \frac{N}{L}$ kann die endliche Zylinderspule als eine Aneinanderreihung einzelner vom Strom durchflossener kreisförmiger Schleifen betrachtet werden. Das Magnetfeld der Spule folgt aus der Superposition der Magnetfelder der einzelnen kreisförmigen

• Wenn der mittlere Spulenradius $r_m = R$ ist, so ist die Näherung:

$$\vec{B}_{\text{Spule}}(z) = \frac{1}{2} \mu_0 N \cdot I \cdot \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad \checkmark$$

3. Parallel zueinander angeordnete Zylinderspulen (mit Radien r_m)

(homogen verteile Windungsanzahl N ($dN = N \cdot \frac{dz}{L} \cdot \frac{dR}{r_m} = N \cdot \frac{dz}{L} \cdot \frac{dR}{r_m}$))

$$\begin{array}{c} \uparrow \\ 1 \\ \downarrow \\ 2 \\ \downarrow \\ 3 \end{array} \quad \begin{aligned} B_1(z) &= \frac{1}{2} \mu_0 N_1 \cdot \frac{r_m^2}{(z^2 + r_m^2)^{3/2}} \\ B_2(z) &= \frac{1}{2} \mu_0 N_2 \cdot \frac{r_m^2}{((z-d)^2 + r_m^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

Ablöse 3

$$\rightarrow \text{Gesamt } \vec{B}(z) = B_1 + B_2$$

$$= \frac{1}{2} \mu_0 N r_m^2 \left(\frac{I_1}{(z^2 + r_m^2)^{3/2}} + \frac{I_2}{((z-d)^2 + r_m^2)^{3/2}} \right)$$

$$\frac{dB}{dz} = \frac{1}{2} \mu_0 N r_m^2 \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{I_1}{(z^2 + r_m^2)^{5/2}} \cdot 2z + \frac{3}{2} \frac{I_2}{((z-d)^2 + r_m^2)^{5/2}} \cdot 2(z-d) \right)$$

$$\frac{dB}{dz} = -\frac{3}{2} \mu_0 N r_m^2 \left(\frac{I_1 z}{(z^2 + r_m^2)^{5/2}} + \frac{I_2 (z-d)}{((z-d)^2 + r_m^2)^{5/2}} \right) \quad \text{an-Feldgradient}$$

für $z = \frac{d}{2}$:

$$\vec{B}(z) = \frac{1}{2} \mu_0 N r_m^2 \left(\frac{I_1}{(\frac{d}{4} + r_m^2)^{3/2}} + \frac{I_2}{(\frac{d}{4} + r_m^2)^{3/2}} \right) = \frac{\mu_0 N r_m^2}{2} \frac{I_1 + I_2}{(\frac{d}{4} + r_m^2)^{3/2}}$$

$$\frac{dB}{dz} = -\frac{3}{2} \mu_0 N r_m^2 \left[\frac{I_1 \cdot \frac{d}{2} - I_2 \cdot \frac{d}{2}}{(\frac{d}{4} + r_m^2)^{5/2}} \right]$$

Modellierung:

\vec{B} auf Z-Achse

gleichsinnig

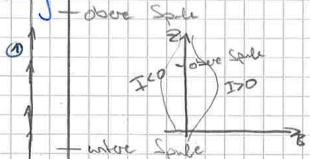


Abb. 9

mit den Werten $N = 135$, $r_m = 105,42 \text{ mm}$, $d = 149,05 \text{ mm}$ für $\frac{d}{2} = z$:

$$\text{gleichsinnig: } I_1 = I_2 = I$$

$$B\left(\frac{d}{2}\right) = \frac{\mu_0}{2} N r_m^2 \frac{2I}{\left(\frac{d}{2} + r_m\right)^3} = \frac{\mu_0 N r_m^2 I}{\left(\frac{d}{2} + r_m\right)^3} = 0,0013435 \frac{T}{A \cdot 1 \times 1,34 \frac{m^2}{A \cdot T}}$$

$$\frac{dB}{dz}\left(\frac{d}{2}\right) = 0$$

gegensinnig: $I_1 = -I_2$

$$B\left(\frac{d}{2}\right) = 0$$

$$\frac{dB}{dz}\left(\frac{d}{2}\right) = -\frac{3}{2} \mu_0 N r_m^2 \cdot \left(\frac{\frac{d}{2}(I_1 + I_2)}{\left(\frac{d}{2} + r_m\right)^5} \right) = -\frac{3}{2} \mu_0 N r_m^2 \cdot \frac{dI}{z^2 \cdot \left(\frac{d}{2} + r_m\right)^5}$$

$$= 0,0176206 \frac{T}{m \cdot A} \approx 176 \cdot 10^{-2} \frac{T}{m \cdot A}$$

Vergleich mit Erdmagnetfeld

Am Äquator hat das Magnetfeld eine Stärke von ca. $50 \mu \text{T}$.

An den Polen ist der Beitrag etwa doppelt so groß. In Mitteleuropa sind es etwas geringer.

Das heißt es sind ca. $48 \cdot 10^{-7} \text{ T}$. Also fast $3 \cdot 10^{-5}$ mal so stark/schwach wie die magnetische Flussdichte der Spulen

✓

4. Helmholtz-Spule wird Anti-Helmholtz bzw. Maxwell-Spule

• Als Helmholtz-Spule bezeichnet man eine Anordnung von zwei kurzen Spulen mit gleichem Radius R und gleicher Windungszahl, die im Abstand R auf derselben Achse parallel aufgestellt und gleichsinnig von Strom durchflossen werden. Zwischen beiden Spulen entsteht im Bereich zw. den Spulenmittelpunkten ein homogenes magnetisches Feld.

Der Beitrag der magn. Feldstärke B in der Mittelstrecke des Spulenpaars kann durch $B = \mu_0 \cdot \frac{2NI}{R}$ berechnet werden ✓

• Bei der Maxwell-Spule durchfließt der Strom die Spulen gegensinnig, sodass das Feld im Zentrum null ist. Im Bereich um das Zentrum steigt das Feld in Absehung linear an, so dass die Spulenanordnung ein Gradientenfeld erzeugt.

Ein nominaler Feldgradient im Zentrum ergibt sich, bei dem Abstand $d = R$, genau wie bei der optimalen Helmholtz-Spule ✓

• Taylorentwicklung von $B(z)$ in der Mitte zwischen den Spulen bis zur 5. Ordnung

$B_2 = B(z_1) + B(z_2)$ für gleichsinnigen Strom:

$$B\left(\frac{d}{2}\right) + \frac{dB\left(z=\frac{d}{2}\right)}{dz}\left(\frac{d}{2}\right) + \frac{1}{2} \frac{d^2B\left(z=\frac{d}{2}\right)}{dz^2}\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3B\left(z=\frac{d}{2}\right)}{dz^3}\left(\frac{d}{2}\right)^3$$

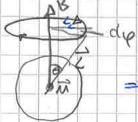
$$+ \frac{1}{24} \frac{d^4B\left(z=\frac{d}{2}\right)}{dz^4}\left(\frac{d}{2}\right)^4 + \frac{1}{120} \frac{d^5B\left(z=\frac{d}{2}\right)}{dz^5}\left(\frac{d}{2}\right)^5$$

$$= 2AB^{-\frac{3}{2}} \cdot 0 \cdot \frac{d^2}{4} 3A\left(B^{-\frac{1}{2}} - \frac{3}{4} \frac{d^2}{4} B^{-\frac{3}{2}}\right) + 0 - \frac{d^4}{30 \cdot 2} 3A\left(-5B + 35 \frac{d^2}{16} B^{-2}\right)$$

$$- 6B^{-\frac{3}{2}} \cdot 75 \frac{d^2}{16} B^{-\frac{1}{2}} - 105 \frac{d^4}{16} B^{-\frac{3}{2}} + 0$$

S. Herleitung von Gl. 4 und Gl. 7 für Präzessionsbewegung

• Gl. 4: $\tau_{\text{p}} = \frac{M}{L \sin \theta}$ (Winkelgeschw.) $L_2 = L \cdot \sin \theta$



\Rightarrow Beziehung zw. Drehmoment und Drehimpuls $\vec{L} : \vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$

$$\Rightarrow M \cdot dt = dL = L_2 \cdot d\varphi = L \cdot \sin \theta \cdot d\varphi$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{M}{L}$$

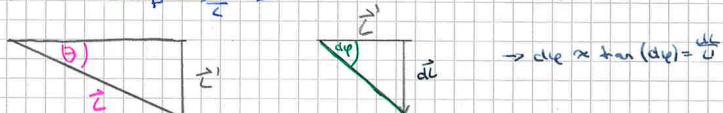
$$\Rightarrow \frac{d\varphi}{dt} = \tau_{\text{p}}$$

$$\boxed{\tau_{\text{p}} = \frac{M}{L_2} = \frac{M}{L \sin \theta}}$$

Abs. 5

• Gl. 7

$$\tau_{\text{p}} = \frac{M}{L} B$$



$$L' = L \sin \theta \Rightarrow M = \frac{dL}{dt} \rightsquigarrow M \cdot dt = dL = L' d\varphi = (\sin \theta) d\varphi \quad (1)$$

$$\Rightarrow M = \mu \times \vec{B} \rightsquigarrow M = \mu \cdot B \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$(2) \text{ in (1): } \mu \cdot B \cdot \sin \theta \cdot dt = (\sin \theta) d\varphi \Rightarrow \boxed{\frac{d\varphi}{dt} = \tau_{\text{p}} = \frac{\mu \cdot B}{L}}$$

✓

6. Trägheitsmoment Jungen = $\frac{2}{5} MR^2$

Drehimpuls: $\vec{L} = \text{Jungen} \cdot \vec{\omega} = \frac{2}{5} MR^2 \cdot \vec{\omega}$

✓

3. Auswertung

Aufgabe 6.1 → Qualitative Beobachtungen mit Hilfe des Plastikturms

Wir stellen das magnetische Moment parallel zur Feldrichtung fest $\Rightarrow M \parallel B$

Das Feld polen wir einmal um, von 'up' auf 'down'.

Das Feld schreibt unser magnetisches Moment in der Auslenkung nicht zu beeinflussen.

Auch in der Umpolung passiert nichts. Dies kommt von der Abhängigkeit von F in Bezug auf B und dann $B(E)$ in idealisierter Weise in einer Spule homogen, also konstant ist. Außerdem sollte kein Drehmoment wirken, weil $T = M \times B$

mit M als magnetisches Moment, T als Drehmoment und B als Magnetsfeldstärke.

Da $M \parallel B$ ist, ist $T=0$ in diesem Fall. Unsere Erwartung wird in diesem Punkt garantiert erfüllt.

Nun spannen wir den Magneten waagrecht, also $M \perp B$, ein. Wir beobachten beim Einstrahlen des Stroms eine Verkrüppelung des Magneten in der Röhre, jedoch keine Auf- oder Abbiegung. Die Verkrüppelung kommt daher, dass $T = M \times B \neq 0$ in diesem Fall

⇒ Es resultiert ein wirkendes Drehmoment auf dem MM.

Bei der Umpolung verdeckt sich das MM in die andere Richtung.

Auch erwartet, weil $-B$ zu $-T$ führt

Wird in dieser Position der Gradient eingeschaltet, zieht es das MM gegen die Wand, ohne dass dieser verbunkert.

Dies liegt daran, dass er kein Drehmoment erfährt ($M \parallel B$) sondern eine Kraft, die nicht konstant ist.

Die Richtung der Kraft hängt von der Polung ab, was wir auch erwarten.

Bei festgestelltem Gradient und $M \parallel B$ sieht man eine Auslenkung des MM um ca. $\pm 1\text{ cm}$. Da bei dem MM keine Richtung angegeben ist, macht es wenig Sinn auf die Polung des Feldes zu achten. Es ist nur wichtig, dass die Polungen immer gleich sind, bei denen die selben Werte auftreten. Die Auslenkung war zu erwarten, weil $\frac{\partial B}{\partial z} \neq 0$ ist (im Gradientenmodus) und somit eine Kraft nach oben bzw. unten resultiert.

Bei dem nicht festgestellten MM im homogenen Feld sieht man, dass der MM eine präferierte Richtung hat. Das Drehmoment T dreht es immer hin, so dass ein Pol des MM in eine Richtung des Feldes zeigt.

Beim Umpolen macht dies MM eine Umdrehung und pendelt sich dann wie ein geflimptter Karabiner-Öschelke ein. Auch dieser Beobachtung war aufgrund der obigen Formeln zu erwarten.
→ Abb.

Wenn der Gradient eingeschaltet wird, dreht sich

der MM immer wieder wie oben auf eine Seite und wird ausgelenkt. Dies erschafft sich

was nicht ganz, weil er im Idealfall wieder auf die Seite gezogen werden sollte. Vermutlich liegt er nicht exakt in der Mitte, was dazu führt, dass er ein Drehmoment T erfährt und in eine Richtung in dem inhomogenen Feld wandelt. Dies würde auch die Beschreibung unterstützen, dass er überwiegend gerne nach -1 geht.

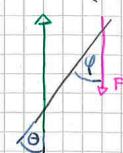
Aufgabe 6.2 \rightarrow statisches Kräftegleichgewicht

6.2.1 Herleitung Gl. 5

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B} = -\vec{e} \times \vec{F} \text{ im Gleichgewicht}$$

$$m \cdot B \sin \theta = m g \sin \theta \rightarrow \text{Spulen waagerecht} \Rightarrow b \parallel F_g \rightarrow \theta = 90^\circ$$

$\Rightarrow m \cdot B = e \cdot m \cdot g$ \rightarrow Winkel zur Vertikalen irrelevant



6.2.2 Läng gegen B

$$\text{Länge } l = \alpha \quad \alpha(B) = \mu \cdot B$$

\rightarrow Magnetfeld B wurde in Fragen zur Vorbereitung Nr. 3 berechnet

$$\Rightarrow B = 1,34 \text{ mT} \cdot \frac{1}{A}$$

Fehler von I: $s_I(1) = (0,025 \cdot 1 + 0,1A)$

$$\Rightarrow s_B = \frac{1}{0,1} s_I = 1,34 \text{ mT} \cdot s_I$$

2. Manche m ist die der Flächengewichts, welcher $m = 1,65g$ mit dem Abstandsfehler $s_m = 0,01g$ ist. Dabei wird der Restfehler gleich dem $-n$ -abgeschätzt.

$$\Rightarrow s_m = \sqrt{s_{mI}^2 + s_{mB}^2} = \sqrt{2} s_m = 0,014g$$

(Masse des Kreisels wird vernachlässigt)

\rightarrow Erdbeschleunigung wird mit $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ abgeschätzt

$\rightarrow l$ als Abstand vom Zentrum der Längel zur Unterkante des Plastikgewindesticks

$$l = \frac{d_y + d_g}{2} + l^* = l_{\text{fix}} + l^* \quad \text{mit } l^* \text{ eingestellte Länge zw. Griff und unterste Plastikkante}$$

Alle Strecken werden mit einem Menschenmaßstab gemessen.

$$\mid \text{mit } l_{\text{fix}} = 49,8 \text{ mm}$$

Fehler Menschenmaßstab: $s_m(x) = [(0,05 \text{ mm})^2 + (0,05 \cdot 9,0001 \cdot x)]^{1/2}, x \text{ in mm}$

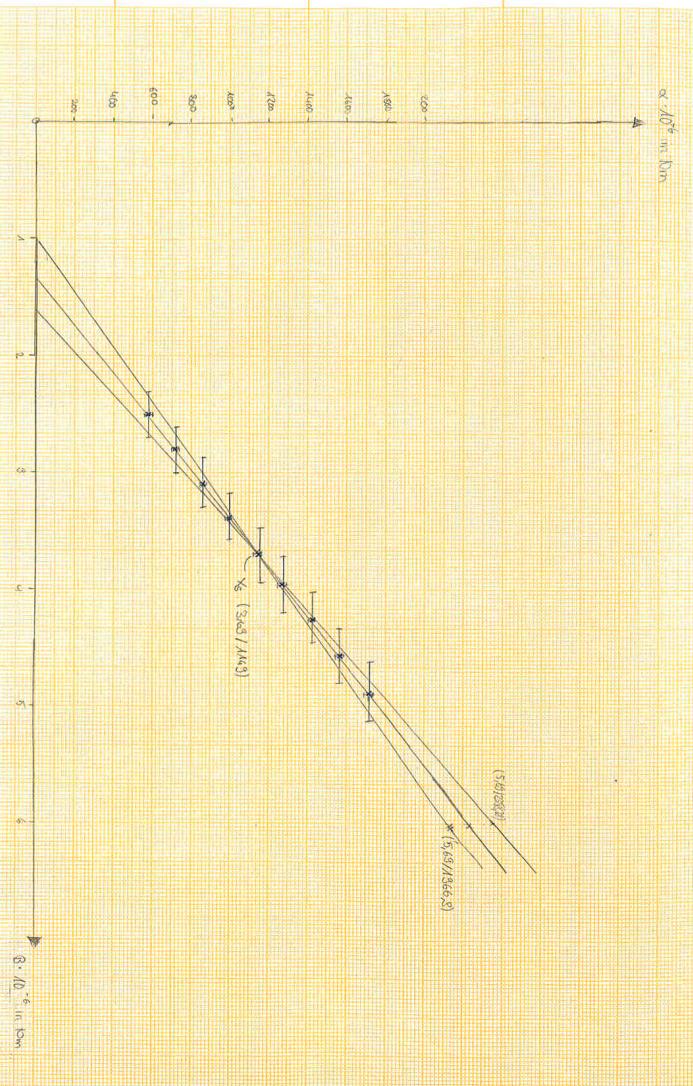
$$\Rightarrow s_x = \left[\left(\frac{\partial s}{\partial x} s_x(s_x) \right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y} s_y(s_y) \right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial z} s_z(s_z) \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{1}{4} s_x(d_x) + s_y(d_y) + s_z(d_z) \right]^{1/2}$$

Fehler von α :

$$s_\alpha = \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} s_x(s_x) \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y} s_y(s_y) \right)^2 \right]^{1/2} = g \left[(m s_x)^2 + (e s_y)^2 \right]^{1/2}$$

m in kg	s_m in mm	g in m/s ²	s_g in mm	d_k in mm	s_d_k in mm	l in mm	s_l in mm	B in mT	s_B in mmT	Alpha gegen B	
										s_alpha in 10 ⁻⁶ Nm	s_alpha in 10 ⁻⁶ Nm
1.450	0.014	9.81	53.60	0.07	14.00	0.07	0.20	580.4	5.8		
1	0.00	0.07	40.80	0.11	1.88	0.15	2.52	722.6	7.1		
2	10.00	0.07	50.80	0.11	2.10	0.15	2.81	0.20	864.8	8.5	
3	20.00	0.07	60.80	0.11	2.32	0.16	3.11	0.21	1007.1	9.8	
4	30.00	0.07	70.80	0.11	2.53	0.16	3.39	0.22	1149.3	11.2	
5	40.00	0.07	80.80	0.11	2.76	0.17	3.70	0.23	1291.6	12.6	
6	50.00	0.07	90.80	0.11	2.96	0.17	3.97	0.23	1433.8	13.9	
7	60.00	0.08	100.80	0.11	3.19	0.18	4.27	0.24	1576.1	15.3	
8	70.00	0.08	110.80	0.11	3.40	0.19	4.56	0.25	1718.3	16.7	
9	80.00	0.08	120.80	0.11	3.62	0.19	4.85	0.26			
								Min	Max		
								2.32	2.72	580.4	
								3.69	3.69	1149.3	
								5.11	4.60	1718.3	



$$\mu = \frac{\Delta \alpha}{\Delta B} = 488,77 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

Felderhebung von μ :

Die maximale Steigung (Max) und minimale Steigung (Min) wird mit Hilfe von Stützstellen im Intervall der Messpunkte festgelegt. Dabei gehen alle Linien durch den Schwerpunkt.

$$\text{Schwerpunkt: } S_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i, \quad S_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\text{Stützstellen: Max 1 = } (B_1 + S_B, x_1)$$

$$\text{Max 2 = } (B_N - S_B, x_N)$$

$$\text{Min 1 = } (B_1 - S_B, x_1)$$

$$\text{Min 2 = } (B_N + S_B, x_N)$$

$$\Rightarrow \mu_{\text{max}} = 604,66 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

$$\mu_{\text{min}} = 408,99 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}}{2} = 57,825 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{T}} \quad \Rightarrow \mu = (0,95 \pm 0,10) \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

✓

6.2.3 keine Ursprungsebene

Der Grund warst du wir keine Ursprungsebene mehr, ist vor allem auch die Horne des Balkes aus der zurückzuführen, also durch die Horne ein zusätzlicher Drehmoment initiiert. Besonders regt der griff über die Längs horne, was auch ein zusätzlicher Drehmoment verursacht. ✓

Aufgabe 6.3 → Schwingungsdauer eines spiralen Pendels

6.3.1 Herleitung (ohne 6)

$$|\vec{m}| = \mu \cdot B \cdot \sin \theta \propto \mu B \theta$$

$$\left| \frac{d\vec{m}}{dt} \right| = \frac{d(\mu B \theta)}{dt} = \mu B \cdot \dot{\theta} = J \cdot \ddot{\theta} \quad \left. \begin{array}{l} \text{m wacht die Bewegung erzeugen} \\ \hookrightarrow J \ddot{\theta} = -\mu B \theta \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \ddot{\theta} = -\frac{\mu B}{J} \theta \quad \leftarrow \text{lineare DGL 2. Ordnung: } \theta = e^{i \omega t}$$

$$\theta = \omega^2 \theta \Rightarrow \omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{\mu B}{J} \quad \Leftrightarrow \quad T^2 = \frac{4\pi^2}{\mu} \cdot \frac{1}{B} \quad \checkmark$$

6.3.2 Trägheitsmoment Längel

Nach 6 aus Fragen zur Vorbereitung: $J = \frac{2}{5} M R^2 = \frac{2}{5} m \left(\frac{dm}{2} \right)^2$

$$m = 1418 \text{ g} \quad R = \frac{dm}{2} = \frac{55.6 \text{ mm}}{2} = 26.8 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow J = 4,073857 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2 \approx 4,074 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

Die Masse des Längels ist zwar mit großer Genauigkeit, obwohl mehr noch vernachlässigbar gegenüber dem Gewicht der Längel. Zudem ist das Gerät nicht drehbar.

Fehler von J (aus 6.2.2): $s_m = s_m = 0,014 \text{ g}, \quad s_{dm} = 0,07 \text{ mm}$

$$\Rightarrow s_J = \left[\left(\frac{\partial J}{\partial m} s_m \right)^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial dm} s_{dm} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{2}{5} \frac{dm}{2} s_m \right)^2 + \left(\frac{2}{5} m dm \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 2,1285145 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

$$\Rightarrow J = (4,074 \pm 0,021) \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2 \quad v$$

6.3.3 T^2 gegen $\frac{1}{B}$

$$> \text{Magnetfeld } B \text{ mit Fehler des Stroms aus 6.2.2 } \rightsquigarrow \frac{1}{B} = \frac{1}{1,34 \text{ mT}} = \frac{1}{\frac{1}{4}} = 4$$

$$s_{\frac{1}{B}} = \left| \frac{\partial \frac{1}{B}}{\partial I} s_I \right| = \frac{1}{1,34 \text{ mT}} \cdot \frac{I^2}{A} \cdot s_I = \frac{1}{B} \cdot s_I$$

$$> \text{Schwingungsdauer } T \text{ für 10 Schwingungen } \rightsquigarrow T = \frac{T_{10}}{10} \Rightarrow T^2 = \frac{T_{10}^2}{100}$$

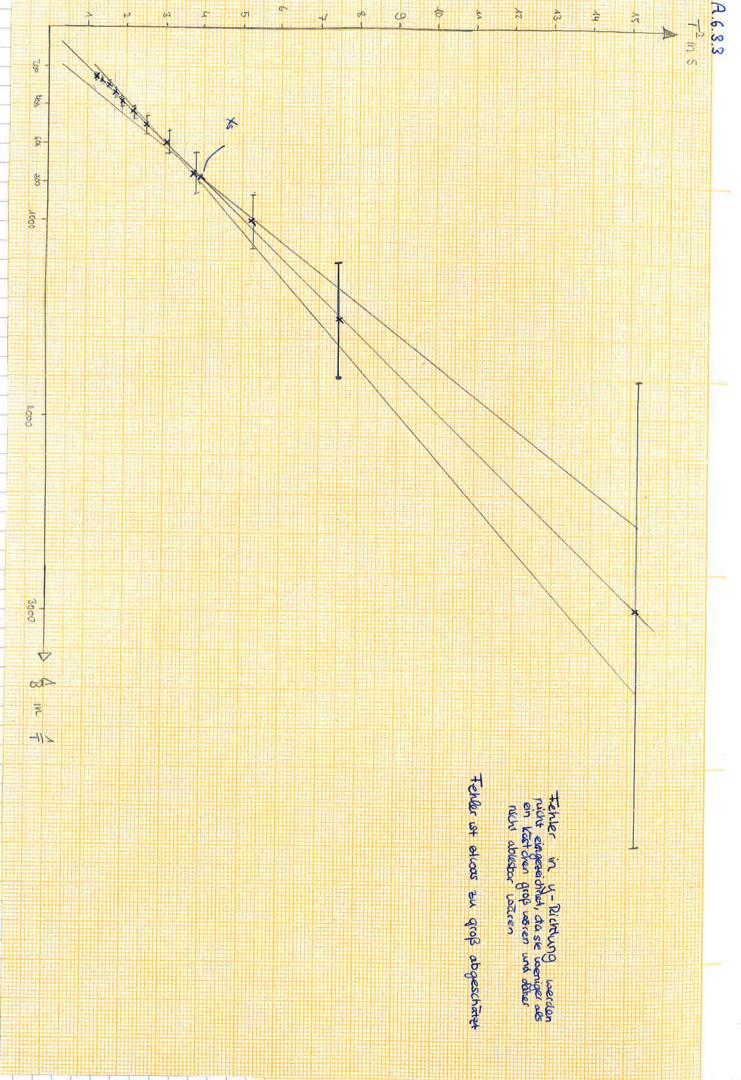
$$s_{T^2} = \left| \frac{\partial T^2}{\partial T_{10}} \right| s_{T_{10}} = \frac{T_{10}}{50} s_{T_{10}}$$

Aus Versuch Mess. Realisationszeit entnommen $T_{10} = (0,188 \pm 0,013) \text{ s}$

$$\text{wobei } s_{T_{10}} = \left[s_{T_1}^2 + s_{s_1}^2 + T_{R2}^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{s_{T_1}}{2} \right)^2 + 0,01^2 + (0,188) \right]^{1/2} = 0,18833$$

$$= (0,094)^2$$

	1/B gegen T^2					
	0.19	1.450	0.014	I in A	sI in A	1/B in 1/T
	T10 in s	T2 in s	sT2 in s			
1	38.95	15.17	0.15	0.25	0.11	2985.07
2	27.40	7.51	0.10	0.50	0.11	1492.54
3	22.96	5.27	0.09	0.75	0.12	995.02
4	19.45	3.78	0.07	1.00	0.13	746.27
5	17.45	3.05	0.07	1.25	0.13	597.01
6	15.99	2.56	0.06	1.50	0.14	497.51
7	14.84	2.20	0.06	1.75	0.14	426.44
8	13.84	1.92	0.05	2.00	0.15	373.13
9	13.07	1.71	0.05	2.25	0.16	331.67
10	12.38	1.53	0.05	2.50	0.16	298.51
11	11.77	1.39	0.04	2.75	0.17	271.37
12	11.32	1.28	0.04	3.00	0.18	248.76
						1/B in 1/T
						Min Max
						Stützstelle 1 2562.19 3407.96 15.2
						Schwerpunkte 771.94 771.94 3.9
						Stützstelle 2 263.27 234.25 1.3



$$\Rightarrow u = \frac{4\pi^2}{M} (\text{Gravitationsschwingung}) \Leftrightarrow M = \frac{4\pi^2}{u^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 4,07 \cdot 10^{-5}}{0,0051 \text{ s}^2} \text{ kgm}^2$$

$$= 0,3153628 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}$$

Steigung u_{max} und u_{min} werden wie in 6.9.2.2 bestimmt, dabei wird der Fehler durch n geteilt, bis der Graph durch den Schiebpunkt geht (hier $n=3$). Dies wird nur an den obersten Skalenebenen angewendet.

$$\Rightarrow u_{max} = 0,0061 \text{ s}^2, u_{min} = 0,0043 \text{ s}^2$$

$$\text{Abschätzung von Fehler } u: s_u = \frac{u_{max} - u_{min}}{2} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ s}^2$$

$$s_u = \left[\left(\frac{\partial M}{\partial u} s_g \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial t} s_h \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left[\left(\frac{4\pi^2}{u} s_g \right)^2 + \left(\frac{4\pi^2 \cdot 3}{u^2} s_h \right)^2 \right]^{1/2} = 0,05567601 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow M = (0,32 \pm 0,06) \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

Bem.: keine Korrektur nötig

✓ \Rightarrow Schon Ursprungsgleich

Aufgabe 6.4 Präzision sym. Kugel

6.4.1 Herleitung Gl. I \rightarrow siehe FZU Aufgabe 5

$$\Rightarrow \sigma_{\text{kp}} = \frac{M}{L \cdot B}$$

6.4.2 Drehimpuls L der Bildverdrehung

$$L = J_A \cdot \omega \rightarrow L = J_A \cdot \omega = J_A \cdot \omega_{\text{ref}}$$

Aus 6.3.2: $J_A = (4,074 \pm 0,021) \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$

Aus Protokoll: $f = 6,2 \text{ Hz}$

Der Fehler s_f wird als 1,0% abgeschätzt, da bei vorliegenden Messungen sich herausgestellt hat, dass sich die Frequenz bei einer Veränderung von fast einem Hertz entscheidet und wodurch der Ablesefehler vom Skalenkopf gegenüber der Frequenzänderung vernachlässigbar klein ist.

$$\rightarrow s_f = 0,0 \text{ Hz} \rightarrow f = (6,2 \pm 1,0) \text{ Hz}$$

$$\rightarrow L = 4,074 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 6,2 \cdot \frac{1}{3} = 1,58705 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$$

$$s_L = \left[\left(\frac{\partial L}{\partial J_A} s_J \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial f} s_f \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 2\pi \left[(f s_J)^2 + (J_A s_f)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0,2561076 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2 \text{ s}$$

$$\Rightarrow L = (1,59 \pm 0,26) \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2 \text{ s}$$

6.4.3 σ_{kp} gegen B

\rightarrow Magnetfeld B mit Fehler wie in 6.7.2

$$\rightarrow \sigma_{\text{kp}} = \frac{s_T}{T_p}, S_{T_p} = \left[(0,005 s)^2 + (0,015)^2 + (0,203)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,203$$

$$s_T = \frac{s_1}{2}, s_2 = s_A, s_m = s_B$$

Dabei wurde durch die ausgewählte Meinung von T_p noch ein Fehler von $s_{T_p} = 0,203$ mit eingeschlossen (Spannzeit - Endpunkt, Reaktionsszeit...)

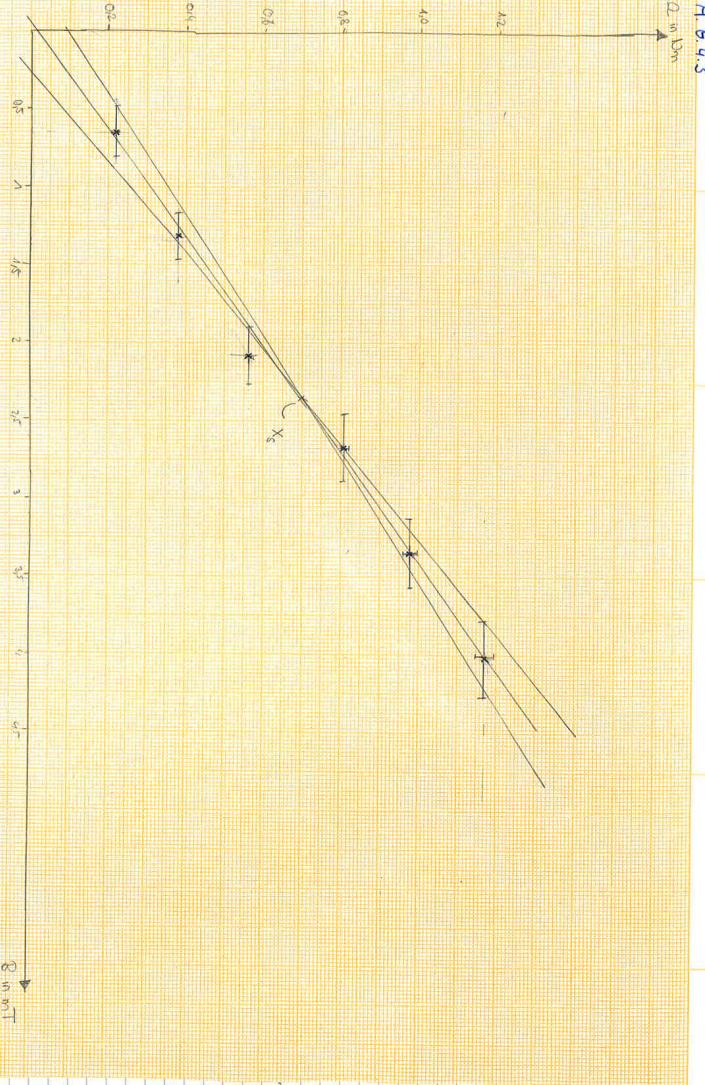
$$\rightarrow S_{\sigma_{\text{kp}}} = \left| \frac{\partial \sigma_{\text{kp}}}{\partial T_p} \right| s_{T_p} = -\tau \cdot \frac{\sigma_{\text{kp}}}{T_p}$$

T_p wurde 3 Mal für jede Stromstärke gemessen $\Rightarrow T_p = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 T_n$

$$\rightarrow S_{\sigma_{\text{kp}}} = \frac{1}{3} \sqrt{3} S_{T_p} \quad (\text{aus Fehlerfortpflanzungsregel})$$

$$= 0,115473$$

B gegen Omega							
0.115							
	T1 in s	T2 in s	T3 in s	Tp in s	I in A	sI in A	B in mT
1	27.15	29.10	29.91	28.72	0.50	0.11	0.67
2	16.74	16.52	16.29	16.52	1.00	0.13	1.34
3	10.86	11.16	11.26	11.09	1.50	0.14	2.01
4	7.53	7.70	7.81	7.68	2.00	0.15	2.68
5	5.99	6.58	6.63	6.40	2.50	0.16	3.35
6	5.41	5.33	5.27	5.34	3.00	0.18	4.02
				Min	Max		
				Stützstelle 1	0.52		
				Schwerpunkte	0.17		
				Stützstelle 2	0.35		
					0.7		
					4.25		
					3.79		
					1.2		



$$\text{Steigung, } \kappa = \frac{m}{l} \Leftrightarrow \mu = \kappa \cdot L = 0,2925 \frac{1}{\text{m}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kgm}^2}{\text{N}} \\ = 0,465075 \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

gleiche Methode wie in 6.2.2 für Fehler von μ :

$$u_{\max} = 0,3232 \frac{1}{\text{m}} \quad u_{\min} = 0,2566 \frac{1}{\text{m}}$$

$$\text{Abschätzung } s_u = u_{\max} - u_{\min} = 0,0333 \frac{1}{\text{m}}$$

$$s_u = \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial l} s_l \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial m} s_m \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

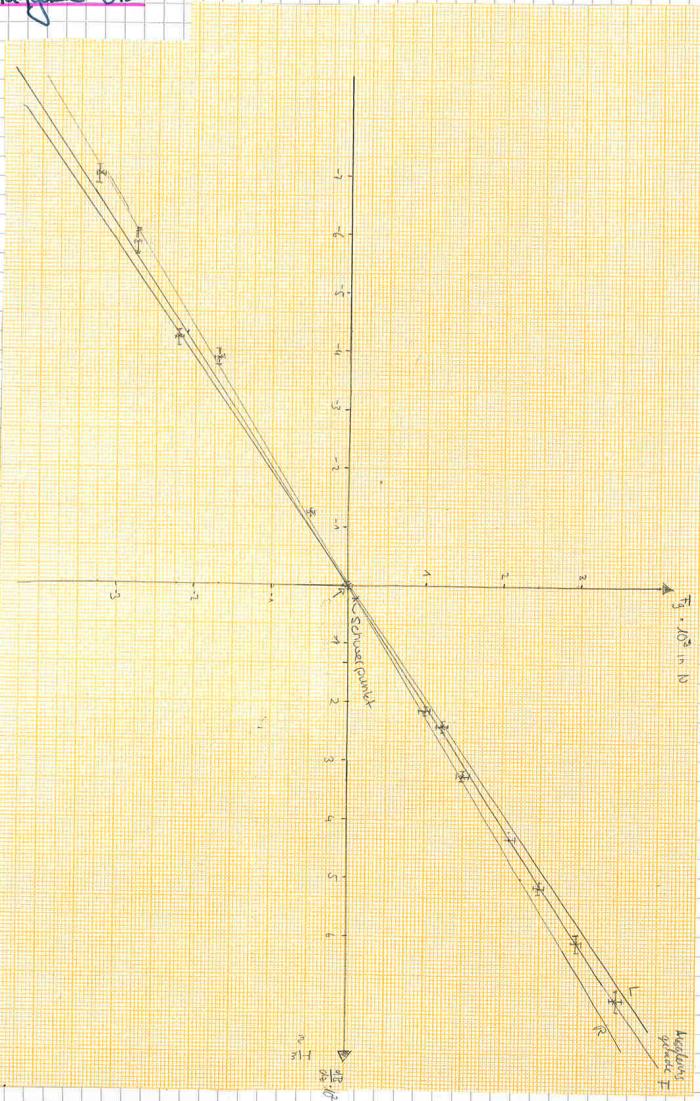
$$= \left[(u_{s_l})^2 + (u_{s_m})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,05294705 \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

$$\Rightarrow \mu = (0,46 \pm 0,05) \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

Bemerkung: Ist schon
Ursprungswerte \rightarrow keine Korrektur
nötig



Aufgabe 6.5



Vergleich:

μ mit verschiedenen Meßmethoden:

$$6.1 \text{ statisches Kräftegleichgewicht: } \mu = (0,48 \pm 0,10) \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

$$6.2 \text{ Schwingungsduer eines sp Pendels: } \mu = (0,32 \pm 0,06) \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

$$6.3 \text{ Präzision der Kugel: } \mu = (0,46 \pm 0,05) \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

$$6.4 \text{ Kraft auf magnetische } M \text{ in } m \text{ in } T. \text{ MFeld: } \mu = (0,97 \pm 0,03) \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

⇒ Alle Werte außer das durch „Schwingungsduer“-Methode ermittelte scheinen sehr gut im Rahmen ihrer Fehler zusammen zu passen.

Die Abweichung von Werten aus Methode 2 lässt sich vielleicht als Teilweise mit der Schwierigkeit ablesbarkeit von Start und Endzeitpunkt erklären. Möglicherweise durch mehrfache Messen diese Fehler vermutlich noch verkleinern. Es scheint jedoch trotzdem einen systematischen

Fehler zu geben ⇒ Vermutlich Trägheitsmoment nicht nur von Kugel abhängt, sondern auch Haltung
⇒ Dann wahrscheinlich auch Ursprungswinkel ✓

Methode 1:

Genaugkeit nicht so gut: Kräftegleichgewicht schwer ablesbar

Methode 2: Ungenau ⇒ Idealisierung und nicht der Realität entsprechend

Methode 3+4: Beste Methoden → höchste Genauigkeit

Wie viel Strom müsste in einer Leiterstrecke mit $R=1\text{m}$ treffen um ein $B=1\text{T}$ zu erzeugen?

$$\text{Das magnetische Moment ist } \vec{m} = I \cdot \vec{A}$$

$$\Rightarrow m = I \cdot A = r^2 \pi r = (0,01\text{m})^2 \pi \approx 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\Rightarrow I = \frac{m}{A} \approx \frac{3,14 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 10^{-4}} = 14,86,05$$

Diesen Strom würde die Leiterstrecke vermutlich nicht aufhalten. ✓

Steigung: siehe Nachtrag

4. Fazit

Bei diesem Experiment haben wir sehr unterschiedliche Methoden kennengelernt, um das magnetische Moment zu messen und dann zu berechnen. Im Vergleich haben wir gesehen, dass die verschiedenen Methoden unterschiedlich gut funktionieren, jedoch ähnliche Ergebnisse liefern.

Aber außerdem davon, dass es sehr spannend war, sich mit <sup>diesem sehr
zentralen</sup> physikalischen Phänomen ^{dem MM} beschäftigen zu können, haben wir uns sehr stark mit den mechanischen Effekten beschäftigt, die auch mit dem magn. Dipolmoment zusammenhängen.
So haben wir uns auch mit der Präzession eines Kreisels und der Schwingungsdauer eines sphärischen Pendels beschäftigt.

79 PUNKTE 10.12.2020

Dr. Berndt & Wimke

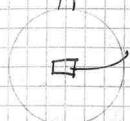
5. Messprotokoll

Versuch MM

Teilnehmer : A: Charlotte Geiger
 M: Manuel Lippert
 P: Leonhard Schatt

In diesem Versuch wird eine Billardkugel versendet, welche wie folgt

- 1) Griff (mit Punkt) Das Magnetfeld wird durch einen Paar Spulen erzeugt, welches einem Hahnkolospulenpaar ähnlich ist
- 2) Magnetscheibe



Gerätenummern: Galvanowäge

Magnetfeldstärke ult. Waage (Leybold): Genauigkeit: 0,01 g

Messleseer

Ampermeter (Digital Multimeter Hand): 10 Amp : 20,2,5 % + 10 digits
 200mA : 1,8 % + 10 digits

Stromquelle/Luftspule... : 77859

Spulenpaar :

Vorbeginn macht sich Maxwell mithilfe eines an einer Feder hängenden rotierbaren Magneten. Dieser wird gemacht um sich schnell mit dem Gerät verfügbar zu machen

Müller

 Lippert

18.11.10

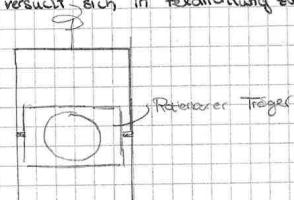
1. Teil: Beobachtung des ~~Negativer~~ bei der Feder mit Hilfe des Plastikzimmers



Der Magnet in der Röhre kann festgestellt werden, oder locker gelassen werden. Veränderbar ist: Feldstärke, Gradient, Feldrichtung festlegen.

- Konstantes M -Feld mit $2\pi f$ (Festgestelltes Moment):
 - Beob: Änderung der Magnetfeldrichtung (up/down) führt zu minimaler Schwingung (Unterschiedliche Höhen bei unterschiedlicher Polung und M -Feldrichtung)

- Konstantes M -Feld mit $2\pi f$ (Festgestellte waagerechte)
 - Beob: Magnet versucht sich in Feldrichtung zu drehen



- Festgestellter Magnet (waagerecht)

Bringen Magnet in die 0 (Mitte zwischen Spulen) während Feld aus ist. Strom 2 A, Gradient aus, Distanz

- Down \Rightarrow + $x_{\text{Max}} \text{ cm}$
- Up \Rightarrow 0 } ausl. aus der 0-Lage

\rightarrow Gradient an:

- Down: Pendelt sich bei 1 cm ein
- Up: Pendelt sich bei negativer Wert ein (vermutlich ≈ -1 cm)

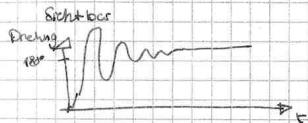
• Fester Magnet (2,4) mit Gradient an:

- Gegenan Up: Magnet drückt gegen die Wand
 - Down: Magnet drückt sich gegen die Gegenwand
- Unterschied zu ohne Gradient: Weniger "Verdrehung" nach oben
mehr "gegen die Wand" → keine Verkantung

Frei Drehbarer Magnet:

• Up/Down / 180 Grad:

- Magnet dreht sich um und pendelt sich dann ein (Charlotte nimmt mit iPhone 6 in Stoßkissen auf)



• Gradient an:

Bereite Maße: $2 \times 1 \text{ cm}$ bzw. $1 \times 1 \text{ cm}$ - mit Rotation

Bei Start genau bei 0: eine Richtung, bleibt bei 0

Magnet & Stab:

Up/Down: Magnet dreht sich ~~frei~~ jede Seite bleibt immer bei einer Seite stehen (Up immer gleiche M-Seite Down immer gleiche Richtung)

Bei Einschalten des Gradienten zieht er ihn nach unten

Cft wenn Gradient eingeschaltet wird $\rightarrow -1$

\Rightarrow fast nur durch unipolen bei eingeschalteten Gradienten

Der statische Kräftegleichgewicht:

Wir messen: • Länge des Griffes: 14,0 mm

• Durchmesser Längel: $50,6 \text{ mm}$

• Länge des Griffes: 11,6 mm / Durchmesser: 9,4 mm

• Gewicht Plastikstabs: 1,45 g

• Gewicht Billardkugeln: 161,0

Die Position der Kugel

wird so gewählt, dass

der wirkende Hebel

maximal wird. Dies

erhöht die Empfindlichkeit
des resultierenden Drehmoments
der Amperew-Messung

Sputen: Wickelungsrichtung: Gegenurzeigersinn

Welle bei $s=0$ und $I=1,87 \text{ A}$

s in mm	0	10	20	30	40	50	60	70	80
J in A	1,88	2,10	2,32	2,53	2,76	2,96	3,19	3,40	3,62

• Sowohl Hebelkraft als auch magnetisches Moment hängen von $\cos \alpha$ ab. \Rightarrow je kleiner α desto größer M und somit ist die Gleichgewichtslage genauer zu bestimmen.

Eigenfrequenz:

Für pendelt bei $25,6 - 25,8 \text{ ms}^{-1} \Rightarrow$ Eigenschwingung

Obiges Ergebnis bezieht sich auf die Billardkugel ohne Stab.

Gleichgültig schwer zu bestimmen, da Drehmoment klein \Rightarrow Ungenauigkeit wird größer, weil Luftstrom und andere Effekte leicht besser kommen stärker zum tragen.

Messung der Schwingungsdauer eines spätzischen Pendels

Wir gehen im Gegensatz zur

Versuchsdurchföhrungsbarcar. nicht mit

antriebslos vor, sondern aktivieren

erst das Magnetfeld, lassen die Tügel

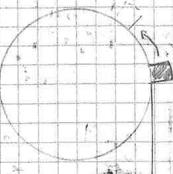
im Vollausschlag gegen und fangen

dann ein Pendel mit dem ersten Peake nach anschalten der Luft an

zu messen. Gemessen werden 10 Schwingungen.

$J \text{ in A}$	0,18	1,4	0,5	2,0	3,0	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75
$t \text{ in s}$	38,95	2,7	4,0	13,84	11,82	22,98	19,45	17,48	18,89	19,84

$J \text{ in A}$	2,25	2,5	2,75
$t \text{ in A}$	13,07	17,38	11,77



Gemessen wird mit einem konventionellen Stoppuhr

Fehler der Stoppuhr: 0,005s

Variant der Reaktionszeit: \rightarrow Verweis Mes

Precision eines symmetrischen Kreisels

Um schließlich den Drehimpuls L zu bestimmen

beschriften wir die Präzession von oben liegen.

Wir müssen nur die Bildrotationen röhren

lassen und benötigen dafür eine stabile

Rotation. Um die geraden Rotations-

frequenz zu beobachten, nutzt man

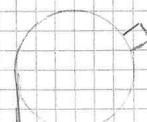
einen Stroboskop, um sie zu messen

Die Rotationsgeschwindigkeit ist dann das Stroboskop nur einen

minimales Einfallwinkel der d. Rotation zeigt. Wenn Beobachtungswinkel der

Schwingung groß bei jedem Aufliegen an den gleichen Stelle

ist man dann durch die Frequenz ermittelten.



stationäre Frequenz:		S_1	f_{Hz}	6,5 Hz	t	t	t	t	t	t
f	t									
f	t									
t										

neu angeleucht

$[Hz]$	5,7	6,8	6,5
$[A]$	0,58	0,53	0,5
$[s]$	23,41	23,97	20,52

neu angeleucht

1. Mal angeleucht

$[Hz]$	6,5	=	=
$[A]$	0,5	=	-
$[s]$	23,63	23,97	20,52

2. Mal angeleucht

$[Hz]$	8,0	=	
$[A]$	1	=	
$[s]$	12,01	11,51	

Mal

$f [Hz]$	5,0	=	=
$[A]$	1	=	=
$[s]$	8,01	7,50	7,31

1. Mal

$f [Hz]$	8,4	(6,2)	4,0
$[A]$	0,5	=	=
$[s]$	37,06	28,77	23,66

berechnet, weil linear (Annahme)

		Erfrequenz = 4,0
f [Hz]	6,3	6,5
[A]	1,03	
+ [S]	15,73	15,73

[A]	1,03	=	=	
f [Hz]	6,9	5,9	4,6	Erfrequenz
+ [S]	17,09	13,95	12,41	3,1
[A]				
f [Hz]	6,2			
+ [S]				

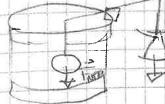
⇒ neue Menge mit festen Frequenzen

Nr	[A]	+ [S]	f [Hz]
1	1,5	11,26	6,2
2	0,5	27,15	"
3	0,5	29,10	"
4	0,5	29,91	"
5	1,0	16,74	"
6	1,0	16,52	"
7	1,0	16,29	"
8	1,5	10,86	"
9	1,5	11,16	"
10	2,0	7,53	"
11	2,0	7,70	"

Nr	[A]	+ [S]	f [Hz]
13	2,5	5,95	6,2
14	2,5	6,58	"
15	2,5	6,63	"
16	3,0	5,41	
17	3,0	5,33	
18	3,0	5,27	

Die Frequenz bleibt bei jeweiliger Messung gleich.
 Das Stoppelkopf wird für mich ein f eingesetzt und man wortet die obige Regel sich mit f dreht.

Kraft auf einen magnetischen Dipol im inhomogenen Magnetfeld
Kugeln groß: 1,27 g Klein 0,51



Balken
An eine "Waage" wird an die eine Seite in die Billardkugel, an die andere Seite eine Schale mit dem Zugelenk

Messen den Feldgradienten gegen die Gewichtskraft zu messen
Graal. ist ein Gravitzustand 4 groß, 4 klein
Gepolt = Up

4 groß, 6 kleine \rightarrow 1,22 A

große Kugel	kleine Kugel	Strom in A	Polung
4	6	1,22	up
6	7	1,85	"
4,5	4	1,36	"
6	5	2,93	"
7,6	5	3,45	"
6	6	4,00	"
4	3	0,71	down
3	3	2,21	"
3	2	2,41	"
2	2	3,131	"
3	1	3,131	"
3	0	4,0	"

Es werden Kugeln eingeschwenkt/weggenommen und dann der Strom entsprechend eingestellt, sodass man wieder in der Ruhelage ist.

6. Nachtrag

zu 6.5

$$\text{Fehler des Feldgradienten: } \frac{\Delta B}{\Delta z} = 0,0176206 \frac{T}{m \cdot s}, \\ = 0,0176206 \frac{T}{m} \cdot (0,251 \cdot 1) + 0,011$$

Bestimmung des Schwerpunkts für das Diagramm:

$$\left(\frac{\Delta B}{\Delta z} \right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta B}{\Delta z} \right)_i = 0,003186 \frac{T}{m}$$

$$\text{und } \bar{F}_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_G)_i = 0,001863 N$$

Definiere \bar{F}_G als die Kraft, die aus der Ruhelage aussteht, also nicht nur die Kraft der Kugel, da diese ja um das Gewicht der Billardkugel herumgedreht wird.

Zeichne Ausgleichsgerade F mit Steigung m

Steigung der Ausgleichsgeraden:

$$m = \frac{\Delta F_G}{\Delta \frac{\Delta B}{\Delta z}} = \frac{0,02 N}{0,043 T/m} = 0,46511 Am^2$$

Fehlerabschätzung zu m : (graphisch)

$$\text{obere Fehlergrenze: } m_U = \frac{3,131 N}{6,07 m} = 0,516 Am^2$$

$$m_R = \frac{2,31 N}{6,07 m} = 0,45 Am^2$$

$$\Rightarrow \Delta m \approx \frac{m_U - m_R}{2} = 0,033 Am^2$$

$$\Rightarrow \mu = (0,47 \pm 0,03) Am^2$$

✓

m_g	g	m_k	k	m_{ges}	F_g
0.00508	4	0.00306	6	0.00814	0.01000426
0.00508	4	0.00357	7	0.00865	0.01500639
0.00635	5	0.00204	4	0.00839	0.01245629
0.00762	6	0.00204	4	0.00966	0.02491257
0.00762	6	0.00255	5	0.01017	0.02991471
0.00762	6	0.00306	6	0.01068	0.03491684
0.00508	4	0.00153	3	0.00661	-0.00500213
0.00381	3	0.00153	3	0.00534	-0.01745842
0.00381	3	0.00102	2	0.00483	-0.02246055
0.00381	3	0.00051	1	0.00432	-0.02746268
0.00381	3	0	0	0.00381	-0.03246481
0.00508	4	0.00204	4	0.00712	0

dB/dz	$ $	s_i	$s_{m_{ges}} / 10^{(-3)}$	s_{F_g}	$s_{dB/dz}$
0.02149713	1.22	0.0405	0.081	0.00079	0.00071
0.03259811	1.85	0.05625	0.090	0.00088	0.00099
0.02396402	1.36	0.044	0.072	0.00070	0.00078
0.05162836	2.93	0.08325	0.081	0.00079	0.00147
0.06079107	3.45	0.09625	0.087	0.00086	0.00170
0.0704824	4	0.11	0.095	0.00093	0.00194
-0.01251063	-0.71	0.02775	0.056	0.00055	0.00049
-0.03894153	-2.21	0.06525	0.047	0.00047	0.00115
-0.04246565	-2.41	0.07025	0.040	0.00040	0.00124
-0.05832419	-3.31	0.09275	0.035	0.00035	0.00163
-0.0704824	-4	0.11	0.034	0.00033	0.00194
0	0	0.01	0.063	0.00062	0.00018