



Technische Universität München
TUM School of Education

TUM Science Labs

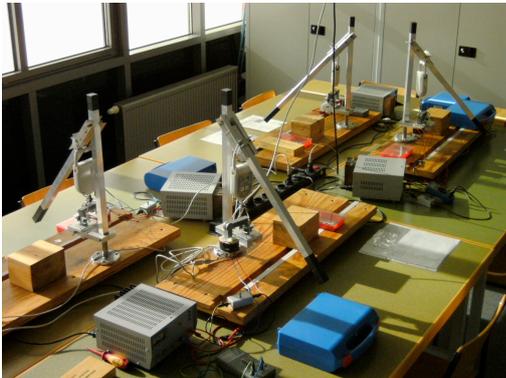
Gefördert durch die

Deutsche Telekom Stiftung



Magnetismus (MAG)

Versuch im Physikalischen Praktikum für Maschinenwesen



Bearbeitet von:

Andrea Bugl und Christian Clemens

Stand: 21. Februar 2012

Organisation

Dieses Angebot eignet sich besonders für Schüler/-innen der gymnasialen Oberstufe, die Physik als naturwissenschaftliches Fach gewählt haben. Es handelt sich hierbei um ein Experiment, welches Bezug auf die Abschnitte: „Statisches magnetisches Feld“ und „Elektromagnetische Induktion“ des bayerischen Lehrplans nimmt. Die vorliegende Anleitung folgt daher den Ausführungen des Schulbuchs *Metzler Physik* und setzt die dort erarbeiteten Grundlagen voraus.

Die jeweiligen Versuchsaufbauten sind für eine Gruppenstärke von acht bis zwölf Personen ausgelegt. Deswegen ist es zu empfehlen den Versuch mit einer Führung am „Walther-Meißner-Institut“ zu kombinieren, da so insgesamt 16 bis 24 Personen teilnehmen können. Größere Gruppen mit bis zu 48 Personen sind auch möglich, und werden auf zwei unterschiedliche Versuche aufgeteilt.

Ziele

Die Schüler/-innen lernen

- den Aufbau eines Versuchs im Physikalischen Praktikum für Maschinenwesen,
- das selbständige Experimentieren,
- das Protokollieren ihres Experiments und
- die Auswertung eines selbständig durchgeführten Experiments.

Arbeitsunterlagen und -mittel

Die Bearbeitung der gestellten Aufgaben erfordert die folgenden Arbeitsunterlagen und -mittel, die die Schüler/-innen am Besuchstag bitte selbst mitbringen: diese Versuchsanleitung, einen Schreibblock sowie Stifte, einen Taschenrechner und ggf. eine Digitalkamera oder ein Mobiltelefon mit Photofunktion zur Illustration der gemeinsamen Ausarbeitung. (USB-Kabel und ein Kartenlesegerät stehen zur Verfügung.)

Zeitplan

Der Tagesablauf eines Science Labs besteht aus einer Versuchsdurchführung (90 min) und einer Führung an einem Forschungsinstitut (90 min) am Vormittag, sowie der Auswertung des Versuchs (2,5 h) im Mathematik-Rechnerraum am Nachmittag. Das Programm beginnt somit üblicherweise um 9 Uhr und endet um 16 Uhr, wobei eine halbstündige Mittagspause vorgesehen ist. Der detaillierte Zeitplan hängt jedoch stark von der Gruppengröße ab und muß daher individuell festgelegt werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	4
1.1. Vorwissen	4
1.2. Grundlagen	5
1.2.1. Magnetisierende Felder und Magnetfelder	5
1.2.2. Magnetfeld einer Spule	6
1.2.3. Magnetfeld einer Spule mit Eisenjoch	8
1.2.4. Kräfte zwischen Magnetfeldern	9
1.2.5. Messung von Magnetfeldern	10
2. Versuchsaufbau	11
3. Versuchsdurchführung	11
3.1. Magnetfeld der Erregerspule	12
3.2. Magnetfeld und magnetische Kraft im Luftspalt des Eisenjochs	13
3.3. Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite	13
4. Versuchsauswertung	14
4.1. Magnetfeld der Erregerspule	14
4.2. Magnetfeld und magnetische Kraft im Luftspalt des Eisenjochs	14
4.3. Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite	14
5. Forschungspräsentation	14

1. Einführung

1.1. Vorwissen

Folgende Begriffe sollten Ihnen für diesen Versuch geläufig sein:

- Hallsonde
- Ferromagnetismus
- Lenz'sche Regel
- Elektromagnetische Induktion
- Lorentz-Kraft F_L , magnetisierendes Feld \vec{H} , magnetische Feldstärke H , Magnetfeld \vec{B} , magnetische Flussdichte B , magnetischer Fluss ϕ_m , magnetische Spannung U_m , magnetischer Widerstand R_m , magnetische Feldenergie E_m

Sie sollten folgende Fragen beantworten können:

- Wie unterscheidet sich ein \vec{H} -Feld von einem \vec{B} -Feld? (ausführliche Erklärung)
- Was versteht man unter „Remanenz“?
- Erklären Sie den Begriff „Koerzitivfeldstärke“.
- Wie werden Magnetfelder erzeugt und wodurch kann man sie verstärken?
- Was ist der Halleffekt?
- Was besagen die Maxwell-Gleichungen?

Zusatzfragen:

- Was versteht man unter magnetischer Suszeptibilität?
- Welcher physikalische Effekt wird zur Magnetfeldmessung in diesem Versuch verwendet?
- Durch welche grundlegende Kraft wird dieser Effekt verursacht?
- In einem Teil des Versuchs wird die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte B vom Abstand s zum Spulenmittelpunkt gemessen. Warum ist es sinnvoll, die erhaltenen Messwerte logarithmisch aufzutragen?
- Zeichnen Sie schematisch die Hysteresekurven für einen harten und einen weichen Ferromagneten in ein Diagramm ein (mit Achsenbeschriftungen). Wo können Sie jeweils die Remanenz ablesen?

Recherchieren Sie vor dem Praktikum:

- Hysteresekurve bzw. Hystereseschleife
- Makroskopische- und mikroskopische Ströme

1.2. Grundlagen

Dieser Versuch beschäftigt sich mit Magnetfeldern und ihrer Kraftwirkung. Sie werden Magnetfelder kennenlernen, die durch elektrische Ströme in Leitern verursacht werden und solche, die mikroskopischen Ursprungs sind (Ferromagnetismus). Sie werden die Felder mit einer Hallsonde messen und ihre Kraftwirkung kennenlernen. Die Kraftwirkung von Magnetfeldern ist grundlegend für das Funktionsprinzip von sehr vielen elektrischen Maschinen (z.B. Elektromotoren). Die Kraftwirkung macht auch massive Konstruktionen bei größeren Magnetspulen und Elektromagneten notwendig.

1.2.1. Magnetisierende Felder und Magnetfelder

Sie werden im Folgenden mit \vec{H} - und \vec{B} -Feldern konfrontiert werden. Dies führt oft zur Verwirrung. Meist wird das Feld einer Spule als \vec{H} -Feld bezeichnet und das Feld innerhalb des Spalts eines Eisenjochs als \vec{B} -Feld. In ihrer Wirkung unterscheiden sich diese Felder natürlich nicht. Wir finden aber einen Unterschied im Ursprung. Das \vec{H} -Feld wird von einem elektrischen Strom in einem Leiter verursacht, während beim \vec{B} -Feld noch die Magnetisierung der Materie (also z.B. des Eisens) dazukommt. Sie werden (sollten) einwenden, dass man die Magnetisierung auch auf (mikroskopische) Kreisströme zurückführen kann. Allerdings wissen wir über diese Ströme viel weniger, so dass ein makroskopischer Standpunkt durchaus sinnvoll erscheint und die Magnetisierung als eigenes makroskopisches Phänomen betrachtet wird. Bei der Entstehung der Maxwell-Gleichungen¹ war dieser Standpunkt im übrigen der einzig mögliche.

Wir arbeiten also mit dem *magnetisierenden Feld* \vec{H} (magnetische Feldstärke H) und dem *Magnetfeld* \vec{B} (magnetische Flussdichte B), welches sich zusammensetzt aus dem magnetisierenden Feld \vec{H} und der Magnetisierung \vec{M} . Im Vakuum, also ohne magnetisierte Materie, gibt es folglich auch aus dieser Sicht keinen Unterschied zwischen \vec{B} und \vec{H} . Etwas komplizierter wird das Ganze jedoch durch unser Maßsystem (SI). Wir benötigen die *Induktionskonstante* μ_0 zur Umrechnung, welche in diesem Sinne eine Maßsystemkonstante ist. Im Vakuum gilt somit:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \text{mit} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} . \quad (1.1)$$

In Materie führt das \vec{H} -Feld zur Magnetisierung $\vec{M} = \chi \vec{H}$ und das \vec{B} -Feld ist:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi \vec{H}) = \mu_0 \mu \vec{H} , \quad \text{wobei} \quad \mu = 1 + \chi . \quad (1.2)$$

χ ist die *magnetische Suszeptibilität* und μ ist die *Permeabilitätskonstante*. Die Permeabilität μ von Luft weicht nur in der Größenordnung von 10^{-6} von 1 ab, sodass für Luft (und auch für viele andere Stoffe) dieselbe Beziehung wie für Vakuum verwendet werden kann.

Von den verschiedenen Magnetisierungsmechanismen ist vor allem der *Ferromagnetismus* von Bedeutung. Beim Ferromagnetismus tritt eine sehr hohe (Anfangs-)Permeabilität auf (bei dem im Versuch verwendeten Eisenjoch ist $\mu \approx 1500$), was zu einer sehr großen Feldverstärkung führt. Derartige Materialien spielen in vielen technischen Anwendungen

¹Die Maxwell-Gleichungen beschreiben vollständig elektrische und magnetische Felder.

(Transformatoren, Elektromotoren, elektrische Generatoren, ...) eine zentrale Rolle. Allerdings ist beim Ferromagnetismus aufgrund der sich abspielenden mikroskopischen Vorgänge das magnetische Verhalten komplizierter.

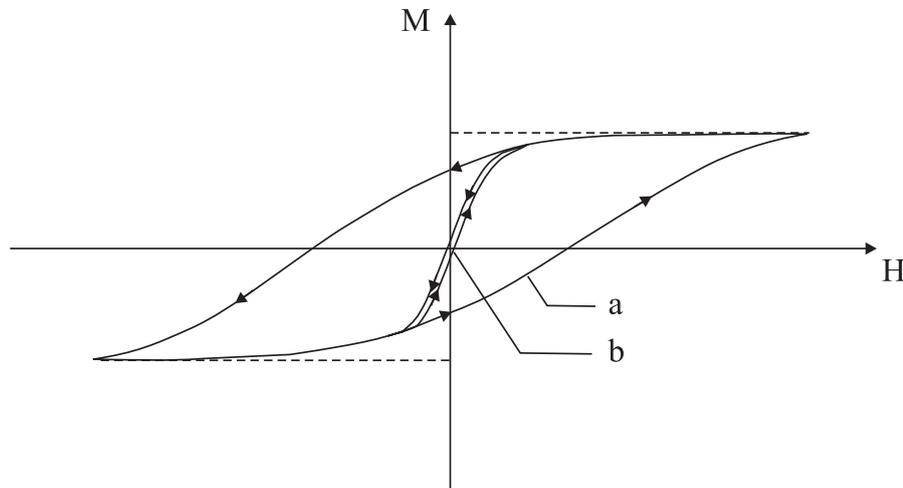


Abb. 1: Die Hysteresekurven $M(H)$ eines harten (Kurve a) und eines weichen (Kurve b) Ferromagneten. Oft ist auch $B(H)$ dargestellt. Wegen $\mu_0 M \gg \mu_0 H$ (also $B \approx \mu_0 M$) sind hier die $M(H)$ und die $B(H)$ Kurven aber praktisch nicht unterscheidbar.

Die magnetische Suszeptibilität χ und damit auch die Permeabilität μ sind keine Konstanten des Materials sondern hängen ab vom magnetisierenden Feld \vec{H} und auch von der magnetischen Vorbehandlung des Materials. Das magnetische Verhalten erkennt man, wenn man die Magnetisierung M in Abhängigkeit der anliegenden magnetischen Feldstärke H in ein Diagramm einzeichnet. Es ergibt sich eine Hystereseschleife, die beim (Um-)Magnetisieren umlaufen wird (vgl. Abb. 1). Man erkennt, dass ab einem bestimmten, magnetisierenden Feld \vec{H} eine Sättigung der Magnetisierung eintritt. Außerdem bleibt nach Abschalten des \vec{H} -Felds (also für $H = 0 \text{ Am}^{-1}$) eine mehr oder weniger große Restmagnetisierung (Remanenz) zurück. Um die Magnetisierung wieder auf Null zu bringen, muss ein entsprechend hohes \vec{H} -Feld in Gegenrichtung (Koerzitivfeldstärke) angelegt werden. Durch die Materialzusammensetzung des Ferromagneten kann die Koerzitivfeldstärke in weiten Grenzen (bis über 7 Größenordnungen) verändert werden. Harte Ferromagneten besitzen eine große Koerzitivfeldstärke und werden als Dauermagneten verwendet. Gleichzeitig ist hier natürlich eine möglichst große Remanenz wünschenswert. Weiche Ferromagneten weisen eine kleine Koerzitivfeldstärke auf und sind leicht (mit geringem Energieaufwand) ummagnetisierbar. Solche Materialien finden z.B. als Transformatorkerne Verwendung. Auch das Eisenjoch im Versuch ist ein weicher Ferromagnet.

1.2.2. Magnetfeld einer Spule

Magnetfelder können durch elektrische Ströme erzeugt werden. Um höhere Feldstärken zu erhalten, wird der Leiter dazu meist zu einer Spule gewickelt. Bei dem in diesem Abschnitt betrachteten Fall, dass die Spule keinen magnetisch aktiven Kern besitzt (d.h. die Spule befindet sich in Vakuum oder ist mit Luft gefüllt), kann das komplette Magnetfeld im ganzen Raum sehr genau mit Hilfe des Biot-Savart-Gesetzes berechnet werden. Wir beschränken

uns hier aber auf das Magnetfeld entlang der Spulenachse, und zwar im Innenbereich der Spule und im Außenbereich bei genügend großem Abstand zur Spule.

1. Innenbereich:

Im Innenbereich einer langen Spule ist das Magnetfeld homogen und hat folgende magnetische Feldstärke H :

$$H(I) = \frac{I \cdot N}{l} \quad (1.3)$$

mit Spulenstrom I , Windungszahl N und Spulenlänge l . Für die im Versuch verwendete Spule ist dies jedoch keine gute Näherung mehr, da die Voraussetzung einer langen Spule nicht erfüllt ist². Für eine (kurze) Spule mit kreisförmigem Querschnitt (Radius r) erhält man stattdessen:

$$H(I) = \frac{I \cdot N}{\sqrt{4r^2 + l^2}} \quad (1.4)$$

Die Daten unserer Versuchsspule sind: $N = 1560$, $l = 3,5 \text{ cm}$ und $A = 21 \text{ cm}^2$ für die mittlere Querschnittsfläche. Um für die Versuchsspule mit rechteckförmiger Querschnittsfläche A die Gl. 1.4 (näherungsweise) anwenden zu können, rechnen wir die Fläche A in den Radius r eines Kreises um, der den gleichen Flächeninhalt besitzt:

$$A = r^2 \pi \quad \Rightarrow \quad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{21 \text{ cm}^2}{\pi}} = 2,59 \text{ cm} \quad (1.5)$$

Für einen Strom $I = 1,0 \text{ A}$ erhalten wir gemäß Gl. 1.4 im Innenbereich unserer Spule:

$$H = 2,50 \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad \text{bzw.} \quad B = \mu_0 H = 3,14 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ T} \quad (1.6)$$

Die Einheit der magnetischen Flussdichte B ist das Tesla T ($1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$).

2. Außenbereich:

Bei genügend großem Abstand zur Spule (d.h. der Abstand ist deutlich größer als die Spulenabmessung) kann ihre Wirkung durch einen punktförmigen magnetischen Dipol (im Zentrum der Spule) beschrieben werden. Bei einer Spule mit N Windungen gilt für das magnetische Dipolmoment \vec{m} :

$$\vec{m} = I \cdot N \cdot \vec{A}, \quad (1.7)$$

wobei der Vektor \vec{A} als Betrag den Flächeninhalt einer Windung hat und senkrecht auf der Windungsfläche steht. Im Falle hinreichenden Abstands s zum Spulenzentrum gilt dann entlang der Spulenachse (= Achse des Dipolmoments) für das magnetisierende Feld $\vec{H}(s)$:

²Voraussetzung: Die Länge der Spule muß sehr viel größer sein als ihr Radius.

$$\vec{H}(s) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\vec{m}}{s^3}. \quad (1.8)$$

Für den Betrag der magnetischen Flussdichte $B(s)$ erhält man für unsere Spule (bei einem Strom $I = 1,0 \text{ A}$):

$$B(s) = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N \cdot A}{2\pi} \cdot \frac{1}{s^3} = 6,55 \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \left(\frac{\text{m}}{s}\right)^3. \quad (1.9)$$

Hinweis: Setzt man den Abstand s mit Einheit ein, so fällt das m (Meter) weg und es bleibt die korrekte Einheit T (Tesla) übrig.

1.2.3. Magnetfeld einer Spule mit Eisenjoch

Die magnetische Flussdichte B kann gegenüber der leeren Spule drastisch gesteigert werden, indem ein möglichst geschlossenes Joch aus ferromagnetischem Material verwendet wird. Um das \vec{B} -Feld außerhalb des Jochs nutzen zu können, muss dieses allerdings einen entsprechenden Luftspalt aufweisen.

Grundsätzlich wird die theoretische Beschreibung des \vec{B} -Felds durch ein Joch (das zudem bestimmte geometrische Randbedingungen mitbringt) wesentlich schwieriger. Um die magnetische Flussdichte B im Joch trotzdem abschätzen zu können, kann folgender Formalismus angewandt werden:

N Spulenwindungen, die vom Strom der Stärke I durchflossen werden, erzeugen eine magnetische Spannung $U_m = I \cdot N$. Die Einheit der magnetischen Spannung ist das A (Ampere).

Der gesamte magnetische Kreis (in unserem Fall Eisenjoch und Luftspalt) besitzt einen magnetischen Widerstand R_m . Im allgemeinen Fall berechnet sich der magnetische Widerstand R_m für ein Element der Länge l und der Querschnittsfläche A mit gleichmäßiger Permeabilität μ gemäß:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu \cdot A}. \quad (1.10)$$

Bei der Berechnung von R_m können somit jeweils Bereiche mit gleicher Permeabilität μ zusammengefasst werden. Das Eisenjoch allein mit der Länge l_{Eisen} und der Querschnittsfläche A_{Eisen} erzeugt folgenden Teilwiderstand:

$$R_{m,\text{Eisen}} = \frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_0 \cdot \mu_{\text{Eisen}} \cdot A_{\text{Eisen}}}. \quad (1.11)$$

Ein Luftspalt der Länge l_{Luft} ruft folgenden Teilwiderstand hervor:

$$R_{m,\text{Luft}} = \frac{l_{\text{Luft}}}{\mu_0 \cdot A_{\text{Eisen}}}. \quad (1.12)$$

Voraussetzung für die letzte Beziehung ist, dass der Luftspalt klein ist verglichen mit den Querabmessungen des Jochs. In diesem Fall ist die laterale Verbreiterung des Feldverlaufs (Streifeld) im Luftspalt vernachlässigbar und die Querschnittsfläche des Luftspalts ist näherungsweise gleich derjenigen des Eisenjochs.

Eisenjoch und Luftspalt werden in Reihe vom \vec{B} -Feld durchsetzt, die Teilwiderstände addieren sich zum Gesamtwiderstand:

$$R_m = R_{m,\text{Eisen}} + R_{m,\text{Luft}} = \frac{1}{\mu_0 \cdot A_{\text{Eisen}}} \cdot \left(\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + l_{\text{Luft}} \right). \quad (1.13)$$

Der Quotient aus magnetischer Spannung U_m und magnetischem Widerstand R_m liefert (in Analogie zum Ohmschen Gesetz beim elektrischen Stromfluss) den magnetischen Fluss ϕ_m :

$$\phi_m = \frac{U_m}{R_m} = \frac{I \cdot N \cdot \mu_0 \cdot A_{\text{Eisen}}}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + l_{\text{Luft}}}. \quad (1.14)$$

(Der magnetische Fluss ϕ_m mit der Einheit Weber ($1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs}$) ist das Integral der magnetischen Flussdichte B über die Fläche A , die vom Feld durchsetzt wird.)

Unter der Annahme, dass sich der magnetische Fluss ϕ_m homogen über die Querschnittsfläche A_{Eisen} des Jochs verteilt, erhält man dann für die magnetische Flussdichte B sowohl im Joch wie auch im Luftspalt:

$$B = \frac{\phi_m}{A_{\text{Eisen}}} = \frac{I \cdot N \cdot \mu_0}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + l_{\text{Luft}}} = \frac{I \cdot N \cdot \mu_0}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + d_0 + d}. \quad (1.15)$$

Das hier verwendete Eisenjoch hat eine Länge von $l_{\text{Eisen}} = 34 \text{ cm}$. Der Luftspalt kann weiter unterteilt werden in einen unvermeidbaren, konstruktionsbedingten (Luft-)Spalt der Länge $d_0 \approx 3 \text{ mm}$ am Scharnier sowie an den Lötstellen des Jochs und in den einstellbaren Arbeitsluftspalt der Länge d .

1.2.4. Kräfte zwischen Magnetfeldern

Magnetfelder üben Kräfte aufeinander aus. Ursache der Magnetfelder sind, wie bereits beschrieben, elektrische Ströme. Diese Ströme können makroskopische Ströme im gewickelten Draht einer Spule oder mikroskopische Ströme ausgerichteter atomarer Dipolmomente sein. Ob die Kräfte zwischen den fließenden Strömen anziehend oder abstoßend sind, hängt von den Flussrichtungen zueinander ab. Parallele Ströme ziehen sich an, antiparallele Ströme (d.h. die elektrischen Leiter liegen parallel zueinander, aber die Ströme darin laufen entgegengesetzt) stoßen sich ab. So ziehen sich z.B. bei einer stromdurchflossenen Spule die einzelnen Windungen entlang der Spulenachse gegenseitig an. Nimmt man zwei Dauermagneten und nähert diese in der Weise, dass in benachbarten Teilen die mikroskopischen Kreisströme in gleicher Orientierung fließen, so ziehen sich die beiden Magneten an. Vor allem im Zusammenhang mit Dauermagneten wird häufig die Nomenklatur des magnetischen Nord- bzw. Südpols gebraucht. Die magnetischen Pole (die nicht der Ursprung von Feldlinien sind) geben lediglich an, wie die Feldlinien bzw. die erzeugenden Ströme im Randgebiet des Magneten (oder auch der Spule) orientiert sind. Hier gilt die Regel, dass sich gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige Pole anziehen.

Auch beim vorliegenden Versuch sollen magnetische Kräfte untersucht werden. Wir verwenden dabei ein Eisenjoch, welches von einer Erregerspule magnetisiert wird. Im Luftspalt wirkt dabei eine Kraft auf die beiden Spaltflächen des Jochs, und zwar in der Weise, dass sich diese gegenseitig anziehen. Um diese Kraft zu berechnen bietet sich hier eine

Betrachtung an, die den Energieinhalt des Magnetfelds mit der magnetischen Flussdichte B im Luftspalt mit dem Volumen V zu Hilfe nimmt. Für die magnetische Feldenergie E_m gilt:

$$E_m = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2 \cdot V = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2 \cdot A_{\text{Eisen}} \cdot d \quad (1.16)$$

mit der Querschnittsfläche des Eisenjochs A_{Eisen} und der Breite d des Arbeitsluftspalts. Die magnetische Kraft F_m ist nun die Ableitung der magnetischen Feldenergie E_m nach der Breite d des Arbeitsluftspalts:

$$F_m = \left| -\frac{\partial E_m}{\partial d} \right| = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2 \cdot A_{\text{Eisen}} \cdot \quad (1.17)$$

Die magnetische Kraft F_m ergibt sich also direkt aus der magnetischen Flussdichte B und der vom Feld durchsetzten Fläche A_{Eisen} .

Verwendet man Gl. 1.15 für die magnetische Flussdichte B , so kann die magnetische Kraft F_m durch die Parameter der Erregerspule und des Jochs beschrieben werden:

$$F_m = \frac{1}{2\mu_0} \cdot A_{\text{Eisen}} \cdot \left(\frac{I \cdot N \cdot \mu_0}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + d_0 + d} \right)^2 = \frac{A_{\text{Eisen}} \cdot \mu_0}{2} \cdot \left(\frac{I \cdot N}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + d_0 + d} \right)^2 \quad (1.18)$$

1.2.5. Messung von Magnetfeldern

Viele Geräte zur Vermessung von Magnetfeldern verwenden den Halleffekt. Damit ist eine präzise Messung über viele Größenordnungen der Stärke des Magnetfelds bei kompakten Sondengeometrien möglich. Der dem Halleffekt zu Grunde liegende physikalische Prozess ist die Kraftwirkung auf einen sich bewegenden Ladungsträger. So wirkt auf ein Teilchen mit der Ladung q , das sich mit der Geschwindigkeit v in einem Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B bewegt, die Lorentz-Kraft F_L . Es gilt sofern die Richtung der Geschwindigkeit senkrecht zu den Magnetfeldlinien steht:

$$F_L = q \cdot v \cdot B \quad (1.19)$$

Die Lorentz-Kraft wiederum steht senkrecht sowohl zu B als auch zu v , d.h. es ändert sich nur die Richtung der Geschwindigkeit, nicht aber ihr Betrag! Die Lorentz-Kraft verschwindet, wenn sich das geladene Teilchen in Richtung des Magnetfelds bewegt. Als Hallsonde wird ein dünnes Plättchen eines geeigneten Materials (hohe Ladungsträgerbeweglichkeit, z.B. Halbleitermaterial) verwendet, welches in einer Richtung von einer definierten elektrischen Strom der Stärke I_{Hall} durchflossen wird.

Liegt nun senkrecht zur Plättchenfläche ein Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B an (vgl. Abb. 2), so werden die Ladungsträger auf eine Seite abgelenkt und es entsteht eine Hallspannung U_{Hall} senkrecht zur Flussrichtung des Stroms und es gilt:

$$U_{\text{Hall}} = \frac{I_{\text{Hall}} \cdot B}{n \cdot e \cdot p} \quad (1.20)$$

mit Ladungsträgerdichte n , Elementarladung e und Plättchendicke p . Durch Auswertung der Hallspannung kann (nach entsprechender Kalibrierung des Geräts) die magnetische Flussdichte B ermittelt werden. Während der Messung ist auf die Richtung des \vec{B} -Felds

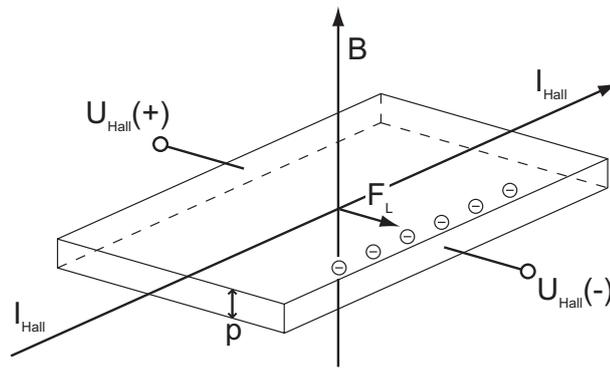
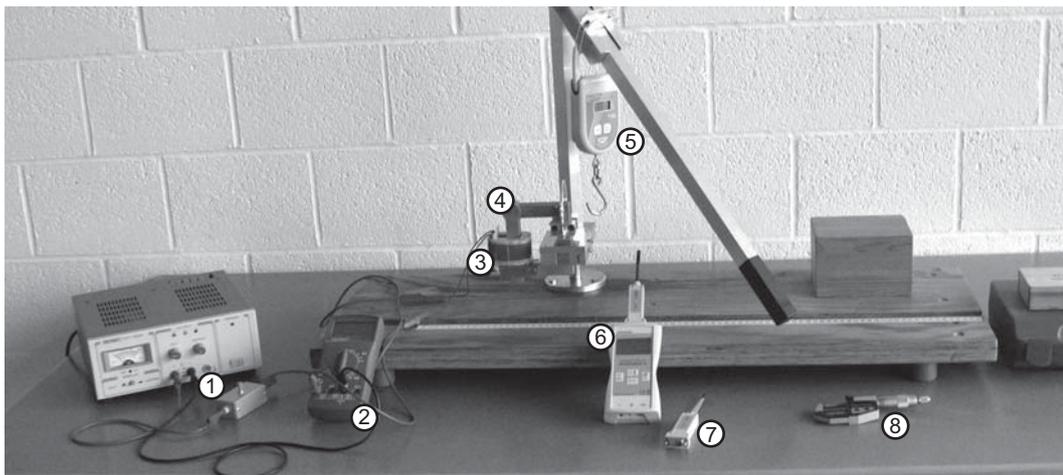


Abb. 2: Funktionsweise einer Hallsonde

relativ zum Hallplättchen zu achten. Im vorliegenden Versuch wird ein kommerzielles Hall-Magnetfeld-Messgerät verwendet, das auf dem Display bereits die magnetische Flussdichte B in den Einheiten T bzw. mT ausgibt.

2. Versuchsaufbau



- | | |
|-------------------------------------|--|
| ① Labornetzgerät und Ein-Aus-Taster | ⑤ Kraftmesser mit Betätigungshebel |
| ② Multimeter | ⑥ Magnetfeldmessgerät (mit Längsfeldsonde) |
| ③ Magnetspule | ⑦ Quersfeldsonde |
| ④ Eisenjoch | ⑧ Mikrometer-Messschraube |

Abb. 3: Versuchsaufbau

Abb. 3 zeigt den Versuchsaufbau.

3. Versuchsdurchführung

In der Wissenschaft ist das Erstellen eines detaillierten Versuchsprotokolls sehr wichtig, denn es macht den Ablauf Ihrer Arbeit für eine spätere Auswertung nachvollziehbar. Ebenso ist eine lückenlose Dokumentation wichtig, falls ein Experiment z.B. aufgrund neuer Erkenntnisse wiederholt werden soll. Auch können bei längeren Experimenten Probleme

auftauchen, und Ihre Partner müssen die genaue Vorgeschichte nachlesen können. So ist in erster Linie der Inhalt des Protokolls wichtig, nicht seine äußere Form. Allerdings soll es auch für andere nachvollziehbar sein und muß deshalb übersichtlich und sauber geführt werden.

Skizzieren Sie zunächst den Versuchsaufbau sowie ggf. einen Schaltplan und beschriften Sie die Zeichnung mit relevanten Informationen (z.B.: Abmessungen, verwendete Substanzen, ...). Alle weiteren Eintragungen in Ihr Versuchsprotokoll müssen zeitnah und deshalb während der Versuchsdurchführung erfolgen: Schreiben Sie sich hierzu wichtige Beobachtungen auf und dokumentieren Sie alle erforderlichen Versuchsparameter (z.B.: Ströme, Spannungen, Widerstände, ...) zusammen mit den Einstellungen der Netzteile und Messgeräte (z.B.: Strom-, Spannungsbereiche, Wechsel- oder Gleichspannung, ...). Vergessen Sie dabei bitte nicht Ihre Messwerte aufzuschreiben! Notieren Sie sich ferner auch Ideen bzw. Dinge, die Sie nicht verstehen.

Hinweise zu den (Mess-)Geräten:

- Gehen Sie bitte sorgfältig mit den Magnetfeldmessgeräten um. Die umsteckbaren Hallsonden sind sehr empfindlich (und auch teuer). Vor allem die Querfeldsonde mit der flachen Spitze darf nicht gequetscht werden.
- Betätigen Sie die Mikrometer-Messschraube (v.a. beim Hineinschrauben bzw. beim Antasten am Objekt) nur an der Ratsche (kleiner, aufgesetzter Drehknopf). Dadurch wird beim Messen das Anzugsdrehmoment definiert und die Messung wird genauer bzw. reproduzierbar. Außerdem ist die Messschraube dann vor Überlastung geschützt.
- Höhere Stromstärken (über 0,5 A) sollten nicht zu lange durch die Spule fließen, da diese sonst zu heiß werden kann. Überprüfen Sie bitte ab und zu die Spulentemperatur.

3.1. Magnetfeld der Erregerspule

Zunächst soll die magnetische Flussdichte B einer stromdurchflossenen Spule ohne magnetisch aktiven Kern entlang der Spulenachse vermessen werden. Montieren Sie dazu die Erregerspule vom Eisenjoch ab (linke Flügelmutter lösen und das Gelenkteil des Jochs nach oben herausziehen) und platzieren Sie sie in die hierfür vorgesehene Aussparung vorne links im Versuchsbrett. Die Spulenachse soll dabei parallel zum aufgeklebten Maßband liegen. Verkabeln Sie (falls nicht schon geschehen) die Spule mit dem Labornetzgerät (wegen der Freilaufdiode muss dabei die Polarität der Spule beachtet werden) und schleifen Sie das Multimeter als Strommessgerät in die Zuleitung ein. Schalten Sie außerdem das Strom-Ein-Aus-Tastkästchen in Serie zur Spule. Damit kann der Strom ohne Veränderung der Netzgeräteeinstellung und ohne Ausstecken ein- bzw. ausgeschaltet werden. Stellen Sie nun den Spulenstrom auf $I = 1,0 \text{ A}$ ein (Taster muss dabei gedrückt sein). Stecken Sie auf das Magnetfeldmessgerät die Längsfeldsonde (mit dem kleinen schwarzen Zylinder) auf und schalten Sie das Gerät ein. Wenn Sie das Messgerät auf Autorange (siehe Bedienungsanleitung) stellen, wechselt dieses automatisch in den jeweils günstigsten Messbereich.

Messen Sie nun die magnetische Flussdichte B entlang der Spulenachse, beginnend im Spulenzentrum ($s = 0 \text{ cm}$) bis hin zu einem Abstand von ca. $0,5 \text{ m}$. (Bedenken Sie bei der Wahl der Abstände, dass Sie die Messwerte später am Computer doppelt-logarithmisch auftragen werden.) Führen Sie dabei an jeder Position eine Differenzmessung durch, indem Sie von der magnetischen Flussdichte B_1 für einen Strom von $1,0 \text{ A}$ die magnetische Flussdichte B_0 ohne Spulenstrom abziehen. (**Hinweis:** Vorzeichen der Werte muss beachtet werden.) Dadurch erhalten Sie das von der Spule erzeugte Netto-Feld, andere Felder (z.B. das Erdmagnetfeld) fallen dann automatisch heraus. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei großen Abständen absolut unerlässlich um brauchbare Messwerte zu erhalten. Tragen Sie Ihre gemessenen $B(s)$ -Werte in einer handschriftlichen Tabelle ein.

3.2. Magnetfeld und magnetische Kraft im Luftspalt des Eisenjochs

Bei diesem Versuch wird nun ein ferromagnetischer Spulenkern verwendet. Die Felder (und auch die wirkenden Kräfte) werden dadurch im Vergleich zum vorigen Versuch wesentlich erhöht.

Bauen Sie zunächst die Erregerspule ins Eisenjoch ein. Um einen definierten Arbeitsluftspalt zu erhalten verwenden Sie eines der beiden (unterschiedlich dicken) Abstandsplättchen mit der Aussparung für die Querfeld-Hallsonde. Messen Sie mit der Messschraube die Plättchendicke. Schließen Sie mit eingelegtem Plättchen das Eisenjoch, so dass die Spaltflächen parallel zueinander liegen. Dies können Sie über die Höheneinstellung (Flügelschraube links) erreichen. Stecken Sie nun die Querfeldsonde auf das Messgerät auf und führen Sie vorsichtig die Sonde in die Aussparung des Abstandsplättchens ein. Hängen Sie außerdem den Haken des Kraftmessers in die Schlaufe des beweglichen Joch-Oberteils ein. Schalten Sie den Kraftmesser ein und stellen Sie (falls nicht schon der Fall) die Betriebsweise auf **Peak-Hold** (siehe ausliegende Bedienungsanleitung). Dadurch wird immer der höchste Kraftwert für einige Sekunden gespeichert und angezeigt.

Hinweis: Betätigen Sie den Hebel mit dem Kraftmesser nicht zu schnell oder ruckartig.

ACHTUNG: Nach jeder Kraftmessung (also bei hochgeklapptem Joch-Oberteil) muß der Spulenstrom ausgeschaltet werden, da sonst beim Zurückklappen aufgrund der magnetischen Anziehungskraft das Joch zuschnappt. Hier besteht die Gefahr, die Hallsonde zu beschädigen.

Messen Sie nun für verschiedene Spulenströme von $I = 0,0 \text{ A}$ bis $I = 1,0 \text{ A}$ in Schritten von $0,1 \text{ A}$ die magnetische Flussdichte B im Luftspalt sowie die magnetische Kraft F_m , mit der sich die Spaltflächen des Jochs gegenseitig anziehen. Notieren Sie sich diese Werte als auch die Dicke d des verwendeten Abstandsplättchen in einer handschriftlichen Tabelle. Wiederholen Sie die Messprozedur dieses Versuchsabschnitts für das andere (dickere bzw. dünnere) Abstandsplättchen.

3.3. Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite

In diesem Versuchsteil soll auf die Messung des Magnetfelds verzichtet werden. Stattdessen messen wir nur die Anziehungskraft im Joch, wobei die Breite des Arbeitsluftspalts über

einen größeren Bereich variiert werden soll.

Stellen Sie den Spulenstrom auf einen Wert von $I = 0,5 \text{ A}$ ein. Dieser Strom wird im Folgenden konstant gehalten. (Bei höheren Stromstärken wird die Kraft bei kleinen Spaltbreiten zu groß.) Messen Sie nun für Spaltbreiten von ca. $0,01 \text{ mm}$ bis 5 mm die Anziehungskraft im Joch. Verwenden Sie dazu die beim Versuch ausliegenden Folien- bzw. Blechstücke als Abstandshalter. Die Dicke soll jeweils mit der Mikrometer-Messschraube ermittelt werden. Achten Sie darauf, dass die Spaltflächen jeweils parallel zueinander aufliegen. Eventuell muss dies mehrfach nachjustiert werden. Notieren Sie sich den Spulenstrom I , die Dicke d der Abstandshalter bzw. die Spaltbreite und Ihre Messwerte in einer handschriftlichen Tabelle.

4. Versuchsauswertung

Fertigen Sie, wie in Kap. 5. beschrieben, als Versuchsauswertung bitte eine Forschungspräsentation an. Dokumentieren Sie hierzu Ihre Ergebnisse aus der Versuchsdurchführung, diskutieren Sie diese sowie gegebenenfalls entstandene Auffälligkeiten ausführlich.

4.1. Magnetfeld der Erregerspule

Erstellen Sie am Computer aus Ihren notierten Messwerten ein doppelt-logarithmisches s - B -Diagramm und bearbeiten Sie die folgende Aufgabe:

In Kap. 1.2.2. wurde die magnetische Flussdichte B im Spuleninneren sowie im (entfernteren) Außenbereich berechnet. Tragen Sie beide Rechenergebnisse in das Diagramm ein und vergleichen Sie dazu Ihre Messwerte. **Hinweis:** Um den $1/s^3$ -Verlauf im Außenbereich einzuzeichnen genügen zwei Werte, z.B. bei $s = 2 \text{ cm}$ und $s = 20 \text{ cm}$.

4.2. Magnetfeld und magnetische Kraft im Luftspalt des Eisenjochs

Tragen Sie am Computer Ihre Messergebnisse für die magnetische Flussdichte B und die magnetische Kraft F_m jeweils in ein I - B - und ein I - F_m -Diagramm ein. Bearbeiten Sie anschließend die folgende Aufgabe:

Gemäß Gl. 1.17 sollte zwischen der magnetischen Flussdichte B und der magnetischen Kraft F_m , die hier unabhängig voneinander gemessen wurden, ein einfacher Zusammenhang bestehen. Berechnen Sie nach dieser Formel für jeden gemessenen Wert der magnetischen Flussdichte B die magnetische Kraft F_m und tragen Sie die so erhaltenen Werte zusätzlich zu den direkt gemessenen Werten für die magnetische Kraft F_m an den entsprechenden Stellen im Diagramm ein. **Hinweis:** Die Querschnittsfläche des Jochs beträgt $A_{\text{Eisen}} = 4,0 \text{ cm}^2$. Sind die jeweiligen Wertepaare konsistent?

4.3. Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite

Tragen Sie am Computer Ihre Messwerte in ein doppelt-logarithmisches d - F_m -Diagramm ein.

Können Sie das gemessene Verhalten mit Hilfe von Gl. 1.18 erklären? (Es ist keine Rechnung erforderlich.)

5. Forschungspräsentation

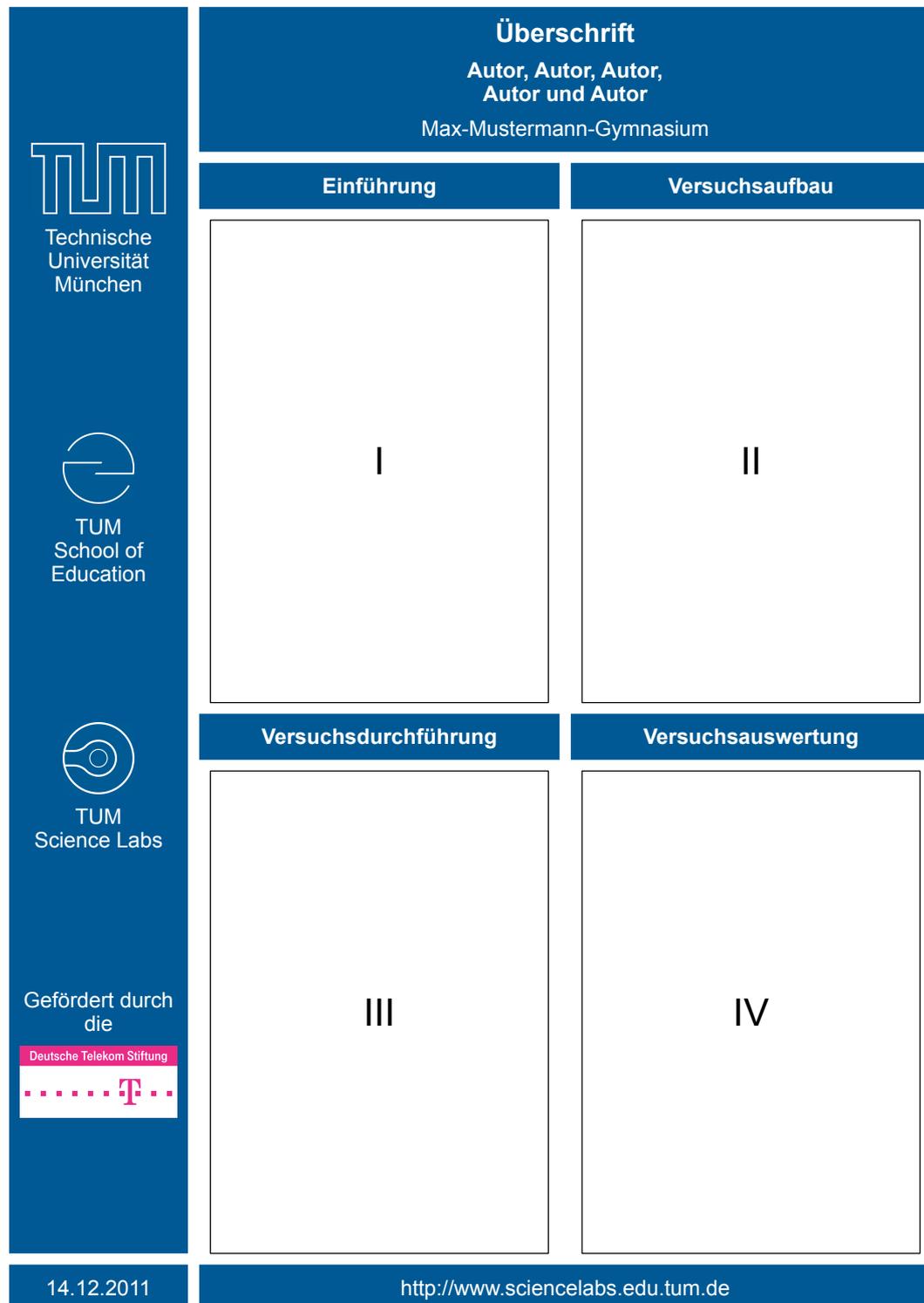


Abb. 4: Forschungspräsentation: Struktur und Aufbau eines Posters

Auf Fachkonferenzen ist es üblich, die eigenen Forschungsergebnisse durch einen Vortrag und ein detailliertes Poster im Format DIN A0 zu präsentieren (vgl. Abb. 4). Diese Poster müssen inhaltlich fehlerfrei sein sowie optisch ansprechend und übersichtlich gestaltet werden, damit ein(e) Konferenzteilnehmer/-in zum Lesen angeregt wird und zudem das

Wesentliche in kurzer Zeit erfassen kann. Ein solches Poster gliedert sich deswegen in

- eine aussagekräftige Überschrift,
- eine alphabetisch sortierte Autorenliste (z.B.: A. Bugl, C. Clemens, ...),
- eine Auflistung der beteiligten Forschungsinstitute bzw. Gymnasien,
- eine Einführung in die physikalischen Grundlagen des Versuchs (I),
- eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus u.a. anhand von Skizzen und Schaltplänen (II),
- eine Erläuterung der Versuchsdurchführung mit wichtigen Beobachtungen, allen erforderlichen Versuchsparametern und einer tabellarischen Aufstellung der Messwerte (III) sowie
- eine Versuchsauswertung mit Angabe der verwendeten Formeln, einer Beschreibung der angewandten Methoden (Wie haben Sie die Daten ausgewertet?), einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse anhand von Diagrammen sowie einer Diskussion bzw. Interpretation der Ergebnisse, wobei letzteres eine physikalische Erklärung der gemachten Beobachtungen und mögliche Folgerungen, die aus den gewonnenen Ergebnissen gezogen werden können, umfasst (IV).

Diese vorgegebene Struktur hat sich über die Jahre hinweg bewährt und wird deswegen in der Forschung bevorzugt verwendet.

Fertigen Sie als Versuchsauswertung bitte ein solches Poster an und gehen Sie dazu wie nachfolgend beschrieben vor:

1. Überlegen Sie sich zunächst gemeinsam eine aussagekräftige Überschrift und versetzen Sie sich dabei in die Lage des Forschenden, der bzw. die auf seine bzw. ihre neuartige Entdeckung aufmerksam machen möchte.
2. Öffnen Sie dann ein neues OpenOffice-Textdokument und notieren Sie sich darin die Überschrift auf die Sie sich geeinigt haben.
3. Erstellen Sie im gleichen Dokument eine vollständige Namensliste der beteiligten Schüler/-innen und fügen Sie diesem Dokument auch den Namen Ihres Gymnasiums bei.
4. Speichern Sie nun dieses Dokument in einem beliebigen Verzeichnis unter der Kurzbezeichnung des Versuchs (z.B.: SEL.odt) ab.
5. Überlegen Sie sich jetzt, wie Sie sich die Abschnitte I bis IV untereinander aufteilen. Jedes Team erstellt im Anschluss daran für seinen Abschnitt ein zweites OpenOffice-Textdokument. Übernehmen Sie für dieses Dokument die Standardvorgaben von OpenOffice und ändern Sie nur folgende Einstellungen:
 - Papierformat: Breite: 30,09 cm, Höhe: 43,26 cm, Ausrichtung: Hochformat

- Seitenränder: links, rechts, oben und unten: 0,00 cm
- Schrift: -art: Arial, -größe: 48 pt, -stil: normal, -farbe: schwarz
- Absatzausrichtung: Blocksatz

Speichern Sie am Ende dieses Dokument in einem beliebigen Verzeichnis unter der Kurzbezeichnung des Versuchs und der arabischen Nummer des bearbeiteten Abschnitts (z.B.: SEL1.odt) ab.

6. Die weitere Gestaltung und der genaue Inhalt Ihres Abschnitts ist frei und somit Ihnen überlassen. Bemühen Sie sich jedoch Ihren Abschnitt vollständig auszufüllen bzw. den vorhandenen Platz komplett auszunutzen.

Versuchen Sie sich beim Formulieren möglichst prägnant und unmissverständlich auszudrücken. Diskutieren Sie jedoch die physikalischen Grundlagen, den Versuchsaufbau, Ihre Beobachtungen und Messungen sowie Ihre Vorgehensweise und Ergebnisse ausführlich. Beantworten Sie zudem die Fragestellungen der Versuchsanleitung und formulieren Sie deutlich die Zielsetzung (d.h. Sinn und Zweck) des Versuchs.

Fügen Sie zur Veranschaulichung ausreichend Skizzen, Photos, Messwerttabellen und Diagramme ein.

Denken Sie bei der Gestaltung des Posters daran, daß es sich um eine Forschungspräsentation handelt mit der Sie auf Ihre Ergebnisse aufmerksam machen wollen und vor allem Interesse an Ihrer Arbeit wecken möchten.

7. Der Praktikumsleiter wird aus den einzelnen Abschnitten ein gemeinsames Poster im Format DIN A0 zusammenstellen und es Ihnen sobald wie möglich als Datei sowie ausgedruckt per Post zuschicken. Sie können es dann in Ihrem Klassenzimmer oder in Ihrer Schule aufhängen.