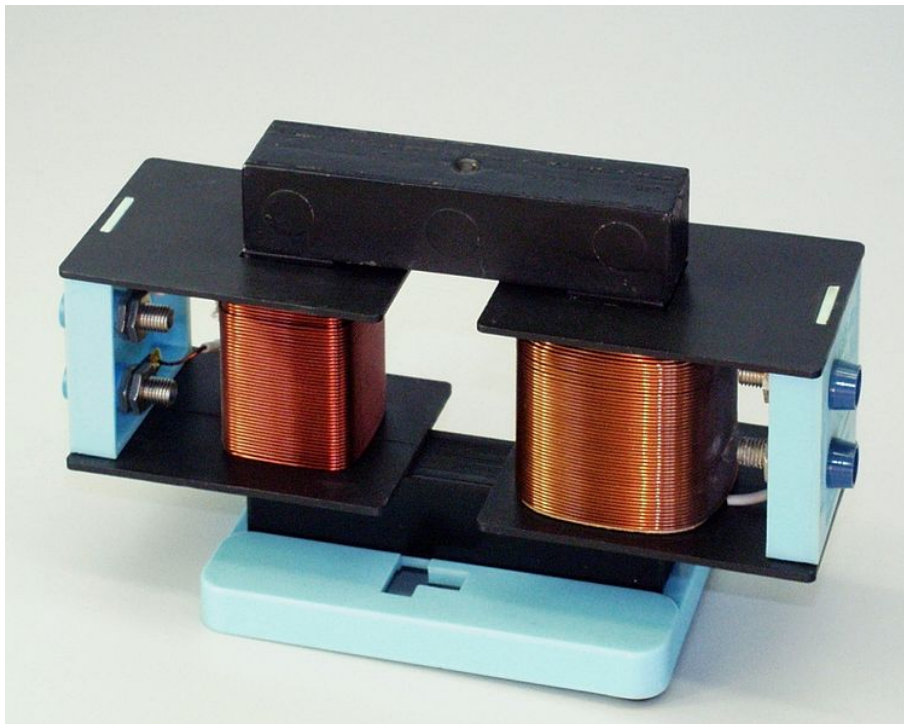


Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen

Teil I

Magnetismus

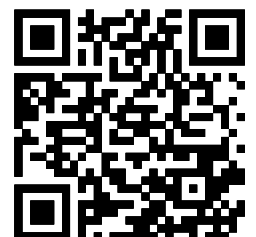


Grundpraktikum Physik: <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>

Kontaktadressen der Praktikumsleiter:

PD Dr. Manfred Deicher
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6
e-mail: manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de
Telefon: 0681/302-58198

Dr. Herbert Wolf
Zimmer: 1.13, Gebäude E2.6
e-mail: herbert@tech-phys.uni-sb.de
Telefon: 0681/302-2038



Ziel des Versuchs

Einführung in die Grundlagen der Erzeugung von Magnetfeldern und deren Messung durch eine Probespule (Pick-up-Spule). Transformatoren werden in allen Bereichen der Elektrotechnik eingesetzt. Ziel des Versuchs ist es, die grundlegenden Eigenschaften der Spannungs- und Stromtransformation kennenzulernen.

1. Fragen

1. Was sind Dia-, Para- und Ferromagnetismus?
2. Welche Kräfte wirken auf ein Elektron, das sich in einem magnetischen Feld bewegt? In welche Richtung wird es abgelenkt und welche Energie gewinnt es dabei?
3. Wie sind die magnetische Feldstärke \vec{H} , die magnetische Flussdichte \vec{B} und der magnetische Fluss Φ miteinander verknüpft? Welche Einheiten haben sie?
4. Wie berechnen Sie aus der gegebenen Messgröße I die magnetische Feldstärke \vec{H} und aus U_{ind} den magnetischen Fluss Φ und die magnetische Flussdichte \vec{B} ? Wie lässt sich μ_0 mit den errechneten Größen darstellen? (Hinweis: Gln. (2), (4), (5), (8) und (9))
5. Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild einer Spule, die an eine Spannungsquelle angeschlossen ist. Leiten Sie aus der Maschenregel die Formel für den Ausschaltvorgang her.
6. Wie transformieren sich beim Transformator Wechselspannungen und Wechselströme? Wie verhält sich der Transformator gegenüber einer Gleichspannung?
7. Was versteht man unter dem Innenwiderstand eines Instrumentes?
8. Diskutieren Sie die Energieverhältnisse auf der Primär- und Sekundärseite eines idealen Transformators. Was versteht man unter einem Wirkungsgrad?
9. Nennen Sie drei Beispiele für Magnetfelder in der Technik.

2. Einführende Literatur

- D. Meschede, *Gerthsen Physik*
24. Auflage (Springer-Verlag, Heidelberg 2010)
Kap. 7.7 -7.9
- W. Demtröder, *Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik*
6. Auflage (Springer-Verlag, Heidelberg 2013)
Kap. 3 – 5

3. Grundlagen

3.1 Eigenschaften von Magnetfeldern

Nach der 1. Maxwell'schen Gleichung erzeugt jeder elektrische Strom ein Magnetfeld:

$$\int_A \vec{j} d\vec{A} = \oint \vec{H} d\vec{s} \quad (1)$$

Dabei ist \vec{j} die durch die Fläche dA hindurch tretende Stromdichte und \vec{H} das Magnetfeld längs des Linienelementes $d\vec{s}$. Die Einheit von \vec{H} ist A/m. Mit dem Magnetfeld \vec{H} ist die materialabhängige Induktionsflussdichte verknüpft:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (2)$$

μ ist die magnetische Permeabilität, $\mu_0 = 1/(\epsilon_0 c^2) = 1.2566 \times 10^{-6}$ Vs/Am ist die Induktionskonstante. Für dia- und paramagnetische Stoffe ist $\mu \approx 1$, für ferromagnetische Stoffe ist $\mu \gg 1$ und feldabhängig. Dann gilt:

$$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0\vec{H} + \vec{M}(\vec{H}) \quad (3)$$

Dieser Zusammenhang spiegelt sich in dem Auftreten einer magnetischen Hystereseschleife $\vec{B}(\vec{H})$ wider.

Die 2. Maxwell'sche Gleichung liefert nun den Zusammenhang mit der durch eine magnetische Flussänderung induzierten Spannung U_{ind} :

$$U_{ind} = -\dot{\Phi} \quad (4)$$

Die für die Induktion relevante Größe ist der magnetische (Induktions-)Fluss Φ . Er ist definiert durch die eine Fläche durchsetzende Induktionsflussdichte \vec{B}

$$\Phi = \int_A \vec{B} d\vec{A} \quad (5)$$

Man kann also elektrische Spannung erzeugen, indem man das Magnetfeld ändert oder indem man die Fläche ändert, die das Magnetfeld durchsetzt (z.B. Elektromotor).

Schließlich erzeugt ein Magnetfeld (genauer eine Induktionsflussdichte) eine Kraft (Lorentzkraft) auf eine bewegte Ladung (d.h. einen elektrischen Strom). Auf ein Elektron wirkt die Kraft

$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B} \quad (6)$$

bzw. auf jedes Längenelement $d\vec{l}$ eines stromdurchflossenen Leiters die Kraft

$$\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (7)$$

Dieser Effekt wird in Drehspulinstrumenten ausgenutzt. Eine Leiterschleife erfährt eine Lorentzkraft, wenn sie sich in einem Magnetfeld befindet und von einem Strom I durchflossen wird. Das erzeugte Drehmoment auf die Leiterschleife ist auch bei kleinsten Strömen gut messbar. Drehspulmesswerke gelten auch heute noch als hochempfindliche Instrumente, wenn sie auch wegen ihrer Anfälligkeit gegen unsachgemäßen Gebrauch kaum noch benutzt werden.

3.2 Transformator

Bei Transformatoren macht man sich die Eigenschaft zunutze, dass ein Wechselstrom durch eine Spule (Primärspule) ein zeitlich veränderliches Magnetfeld und damit eine Induktions-

spannung erzeugt. Bringt man eine zweite Spule (Sekundärspule) in das Feld der ersten, so wird in ihr ebenfalls eine Spannung induziert. Um eine größtmögliche Flussänderung $\dot{\Phi}$ zu erreichen, wählt man ein ferromagnetisches Material, das eine hohe Permeabilität μ besitzt. Dieses bringt man als Kern in die Spule, da dort das B-Feld am größten ist. Die zweite Spule setzt man ebenfalls auf diesen Kern (s. Titelbild).

Es soll zunächst der unbelastete Transformator betrachtet werden. Legt man bei offener Sekundärseite an die Primärwicklung eine Spannung $U_1(t) = U_1 \sin(\omega t)$ an, dann gilt:

$$B(t) = \mu\mu_0 \frac{n_1}{l} I(t) \quad (8)$$

$$\Phi_1(t) = B(t)A \quad (9)$$

mit: n_1 : Windungszahl
 l : Länge der Spule
 A : Fläche einer Windung (Beachte: eine Spule hat n Windungen!)

Infolge dieses Flusses wird in der Primärspule die Spannung

$$U_{ind}(t) = -n_1 \dot{\Phi}_1(t) \quad (10)$$

induziert. Aus der Maschenregel folgt für die Eingangsseite des unbelasteten Transformators

$$U_1 + U_{ind}(t) = 0 \quad \text{bzw.} \quad U_1 = n_1 \dot{\Phi}_1(t) \quad (11)$$

Mit den Gln. (8), (9) und (11) ergibt sich für den Strom I_1 also

$$I_1(t) = -\frac{U_1}{\omega L_1} \cos(\omega t) \quad (12)$$

wobei L_1 die Induktivität der Spule ist:

$$L_1 = \mu\mu_0 \frac{n_1^2}{l} A \quad (13)$$

Beim idealen Transformator ohne Last sind Strom und Spannung um 90° phasenverschoben und die Leistungsentnahme ist Null, da

$$P_{eff} = \frac{1}{2} \int U(t)I(t)dt = 0 \quad (14)$$

Die Flussänderung induziert aber auch in der Sekundärspule mit n_2 Windungen eine Spannung

$$U_2(t) = -n_2 \dot{\Phi}_1(t) \quad (15)$$

Die Spannungen am unbelasteten Transformator verhalten sich also wie

$$\frac{U_1}{U_2} = -\frac{n_1}{n_2} \quad (16)$$

Breibt man den Transformator jetzt sekundärseitig mit einer Last, so fließt ein Sekundärstrom $I_2 = U_2/R_L$, der nun seinerseits wieder einen magnetischen Fluss Φ_2 im Eisenkern zur Folge hat. Dieser ist zu dem von I_1 erzeugten Fluss um 90° phasenverschoben. Er überlagert sich mit Φ_1 zu dem Gesamtfluss $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$, der eine Phasenverschiebung $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$ gegenüber der Eingangsspannung U_1 hat. Es fließt ein Wirkstrom und es gilt

$$P_{\text{eff}} = \frac{1}{2} U_1 \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \cos(\varphi - \Delta\varphi) \quad \text{mit} \quad \tan(\Delta\varphi) = \Phi_2 / \Phi_1 \quad (17)$$

Zur quantitativen Beschreibung des idealen Transformators mit beliebiger Last der Impedanz Z geht man wie folgt vor: Man definiert sich eine gegenseitige Induktivität L_{12} . Diese beschreibt den Einfluss der einen Spule auf die andere. Dazu führt man den Kopplungsgrad

$$k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \text{mit} \quad 0 < k < 1 \quad (18)$$

ein. Damit gilt

$$U_1 = i\omega L_1 I_1 + i\omega L_{12} I_2 + R_e I_1 \quad (19)$$

$$U_2 = Z I_2 = -i\omega L_{12} I_1 - i\omega L_2 I_2 \quad (20)$$

Dieses Gleichungssystem muss dann für die jeweilige Impedanz Z bzw. die Eingangswiderstände R_e berechnet werden. In der Realität kommt noch ein (nichtlinearer) Anteil des Kerns sowie Verluste durch Streufelder und Wirbelströme hinzu. Setzt man den Kopplungsgrad $k = 1$ und $L_1 = L_2 = L$, dann sieht man, dass sich der im unbelasteten Fall allein durch die Primärseite fließende Strom jetzt auf Primär- und Sekundärseite verteilt und für das Verhältnis I_1/I_2 gilt

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z}{i\omega L} - 1 \quad (21)$$

Des Weiteren sind die Spannungen auf beiden Seiten betragsgleich, haben aber umgekehrte Vorzeichen. Allgemein gilt für die Spannungen auf Primär- und Sekundärseite

$$\frac{U_2}{U_1} = - \frac{L_{12}}{L_1 - i\omega(k^2 - 1)L_1 L_2 / Z} \quad (22)$$

Die Wirkleistung auf der Primärseite ist beim idealen Transformator gerade so bemessen, dass sie die sekundäre Belastung ausgleicht

$$U_{1\text{eff}} I_{1\text{eff}} \cos(\varphi_1) = U_{2\text{eff}} I_{2\text{eff}} \cos(\varphi_2) \quad (23)$$

mit φ_1 , φ_2 der Phasenverschiebung auf der Primär- bzw. Sekundärseite. Schließt man die Sekundärseite eines Transformators kurz, wird die Belastung sehr groß und es gilt

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (24)$$

4. Versuchsdurchführung

4.1 Induktionsspule

Aufgabe 1:

Messen Sie den zeitlichen Verlauf des Stromes $I(t)$ durch die Feldspule. Legen Sie dazu eine asymmetrische Rechteckspannung mit 20 Hz ($U_0 = 3$ V) an die Spule und zeichnen sowohl $U(t)$ als auch $I(t)$ auf. Schätzen Sie das Verhältnis L/R ab, indem Sie den Verlauf von $I(t)$ auswerten und mit dem theoretischen Verlauf (Ein- und Ausschaltvorgang) vergleichen.

Aufgabe 2:

Messen Sie nun den zeitlichen Verlauf der induzierten Spannung U_{ind} in der Pick-up-Spule, die sich im Inneren der Feldspule befindet. Bestimmen Sie daraus den magnetischen Fluss Φ in der Pick-up-Spule.

Aufgabe 3:

Bestimmen Sie die magnetische Induktionskonstante μ_0 . Durch den magnetischen Fluss Φ können Sie $B(H)$ berechnen und gegen H auftragen. Aus der Steigung können Sie dann μ_0 bestimmen.

Daten der Spulen:

Feldspule: Länge $l = 20$ cm, $n_1 = 1145$ Windungen

Pick-up-Spule: Querschnittsfläche $A = 3.37$ cm², $n_2 = 3000$ Windungen

4.2 Transformator

Aufgabe 4:

Messen Sie die Hystereseschleife des Weicheisenkerns eines Transformators, indem Sie den magnetischen Fluss Φ in der Sekundärseite in Abhängigkeit des durch die Primärseite fließenden Stromes I auftragen.

Legen Sie dazu eine Dreieckspannung U_1 von 7 V und einer Frequenz von 0.1 Hz an die Primärseite des Transformators. Messen Sie die in der Sekundärseite induzierte Spannung U_2 und berechnen daraus den magnetischen Fluss Φ . Tragen Sie diesen gegen den durch die Primärseite fließenden Strom I auf.

Erhöhen Sie nun die Frequenz der Dreieckspannung bis 10 Hz und fügen Sie diese Messungen unter dem Punkt „Neue Messreihe anhängen“, in denselben Graphen ein. Erklären Sie qualitativ, warum sich die Fläche der Hystereseschleife ändert. Beachten Sie während Ihrer Messung die Messzeit und das Messintervall!

Aufgabe 5:

Bestimmen Sie die Zusammenhänge von Primärstrom I_1 und Sekundärstrom I_2 , sowie von Primär- und Sekundärspannung U_1 bzw. U_2 eines Transformators im Leerlauf. Speisen Sie dazu in die Primärseite eine Sinusspannung mit 50 Hz ($U_0 = 7$ V) ein und tragen jeweils I bzw. U gegeneinander auf.

Aufgabe 6:

Wirkungsgrad eines Transformators. Messen Sie die Energie auf Primär- und Sekundärseite in Abhängigkeit der Last an der Sekundärseite ($0 \Omega - 200 \Omega$). Bestimmen Sie hieraus den lastabhängigen Wirkungsgrad des Transformators.

Speisen Sie dazu in die Primärseite eine Sinusspannung mit 50 Hz ($U_0 = 7 \text{ V}$) ein. Tragen Sie den Wirkungsgrad gegen den Lastwiderstand auf und schätzen Sie den Innenwiderstand des Transformators ab.

Daten des Transformators:

Primärseite: 1000 Windungen, Sekundärseite: 500 Windungen

4.3 Geräteliste

- Feldspule mit Pick-up-Spule
- Transformator
- 2 Drehwiderstände $0 \Omega - 100 \Omega$
- Sensor-CASSY
- Power-CASSY
- PC

5. Anhang: CASSY Lab 2 Tutorial

5.1 Einstellungen Darstellungen

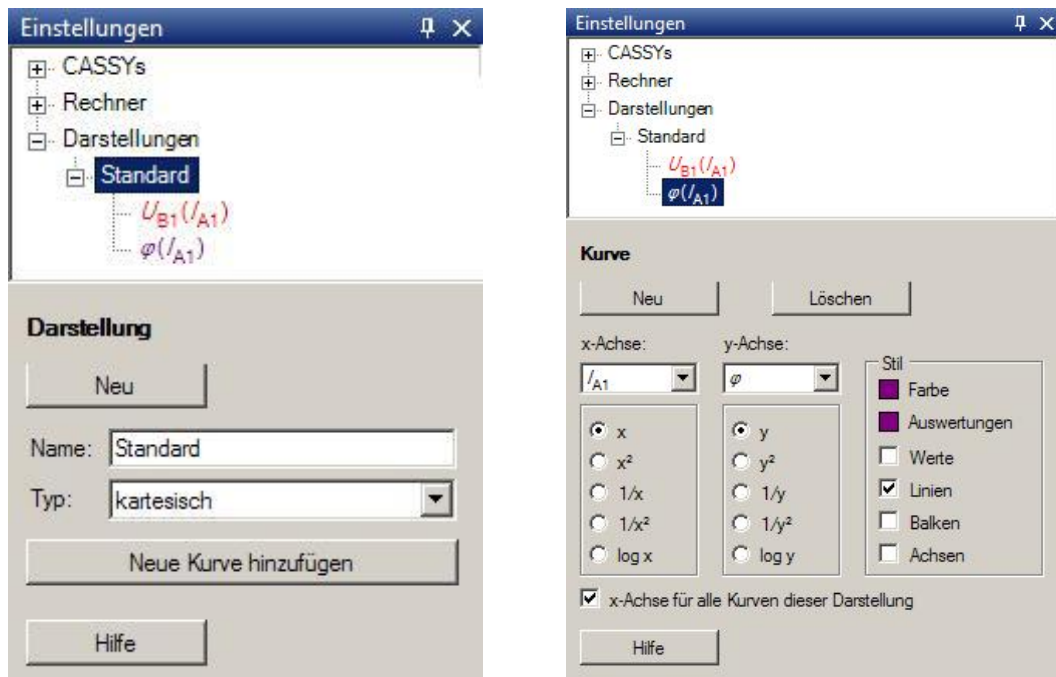


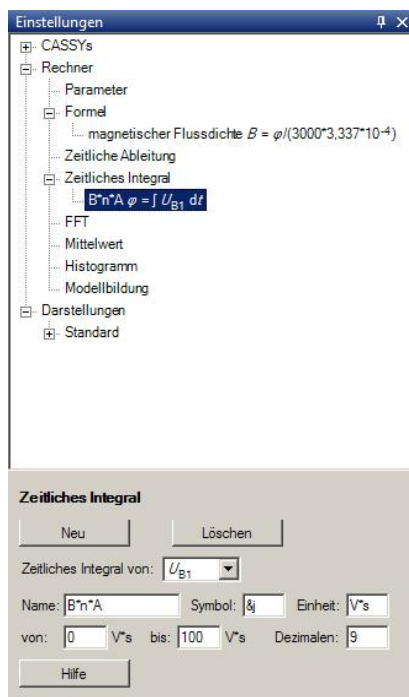
Abbildung links:

- Wenn eine Darstellung nicht ausreicht, können durch **Neu** weitere erzeugt werden, die mit ihrem Namen in die Darstellungsseiten einsortiert werden. Dort kann dann mit der Maus bequem zwischen den verschiedenen Darstellungen umgeschaltet werden.
- **Neue Kurve hinzufügen** erstellt eine neue Kurve in der aktuellen Darstellung.

Abbildung rechts:

- **Neu** erstellt eine neue Kurve in der aktuellen Darstellung. Es können beliebig viele Kurven in einer Darstellung definiert werden.
- Jede Messgröße kann frei auf die x- oder die y-Achse gelegt und im Bedarfsfall dabei noch umgerechnet (x^2 , $1/x$, $1/x^2$, $\log x$) werden. Für die x-Achse sind drei weitere Größen vordefiniert: n (Tabellenzeile), t (Zeit), f (Frequenz für FFT).
- Wenn mehr als eine y-Achse dargestellt wird, kann die sichtbare y-Achsenkalierung im Diagramm durch einen entsprechend bezeichneten Button umgeschaltet werden.
- Üblicherweise bekommen alle Kurven automatisch dieselbe x-Achse. Wird dies nicht gewünscht, kann **x-Achse für alle Kurven dieser Darstellung** ausgeschaltet werden.
- Der Stil jeder Kurve kann hier individuell geändert werden. Dazu gehören auch die Farbe der Kurve und die Farbe ihrer Auswertungen.

5.2 Einstellungen Rechner



Einige Größen können nicht direkt mit CASSY gemessen werden und liegen deshalb nicht als CASSY-Kanal vor. Wenn solche Größen trotzdem in einer Tabelle oder in einem Diagramm angezeigt werden sollen, müssen die Größen hier definiert werden.

Neu legt dazu einen neuen Datensatz an, beginnend mit dem Namen dieser Größe. Die neue Größe muss ein Symbol erhalten, unter dem sie angesprochen werden kann. Dieses Symbol sollte aus möglichst wenigen, aber aussagekräftigen Buchstaben bestehen und darf auch aus einem &-Zeichen gefolgt von einem Buchstaben bestehen. Es wird dann der entsprechende griechische Buchstabe angezeigt (z.B. &j= φ , &h= η). Außerdem sind die vorgeschlagenen Werte für den Messbereich und die Achsenskalierung, sowie die Anzahl der signifikanten Nachkommastellen den individuellen Erfordernissen anzupassen. **Der Wert bei Dezimalen ist hier auf 9 zu erhöhen.**

5.2.1 Formel und Integral

Abhängig von bereits bekannten Größen lässt sich über eine mathematische Formel eine neue Messgröße definieren. Die bekannten Größen werden dabei von CASSY Lab 2 über ihre Symbole angesprochen, die in der angezeigten Liste aufgeführt sind. Die eigentliche Formel wird unter Beachtung der korrekten Formelschreibweise eingegeben.

Für das zeitliche Integral muss lediglich der zu transformierende Kanal ausgewählt werden

Die vollständige Anleitung zu CASSY Lab 2 finden Sie unter

http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/scripts/CASSY_Lab_2_Handbuch.pdf