

Inhalt

- A. Einleitung
- B. Beschreibung der Geräte
- C. Versuche *)
1. Magnetische Induktion B (Magnetische Flußdichte)
 2. Das Magnetfeld einer langen Zylinderspule
 3. Messung der magnetischen Feldkonstanten μ_0
 4. Induktionsgesetz 1. Teil Bewegtes Leiterstück im Magnetfeld
 5. Induktionsgesetz 2. Teil Spule in sich änderndem Magnetfeld
 6. Die Fläche der Induktionsspule steht nicht senkrecht zur Feldrichtung
 7. Rotation einer Spule im homogenen Magnetfeld
 8. Selbstinduktion
 9. Induktiver Widerstand einer eisenlosen Spule
 10. Resonanz am Schwingkreis - Thomsongleichung
 11. Gedämpfte Eigenschwingungen eines Schwingkreises
 12. Rückkopplungsschaltung

A Einleitung

Die Kraftwirkungen, die auf ruhende oder bewegte Ladungen im elektrischen oder magnetischen Kraftfeld ausgeübt werden, sind von großem wissenschaftlichen Interesse und für das Verständnis zahlreicher elektrischer und magnetischer Vorgänge in Geräten und Maschinen (z.B. elektrostatische und elektromagnetische Meßinstrumente, Stromerzeuger und Elektromotoren) von Bedeutung.

Im elektrischen Feld der Feldstärke \vec{E} wird auf eine ruhende oder bewegte Ladung q die Kraft

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \quad (1)$$

ausgeübt. Im magnetischen Feld wird auf eine ruhende Ladung keine Kraft ausgeübt, da ruhende Ladungen kein Magnetfeld besitzen. Werden elektrische Ladungen in Bewegung gesetzt, so baut sich um sie herum ein Magnetfeld auf, dessen Größe von der Ladung q und deren Geschwindigkeit v abhängig ist. Die Kraft \vec{F} , die auf eine mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegte Ladung q in einem Magnetfeld der magnetischen Induktion \vec{B} einwirkt, ist

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

*) Siehe auch :

Dorn, Physik, Oberstufe Ausgabe A, Schröder-Verlag, Hannover
Bader, Dorn, Greiner, Versuche mit eisenlosen Spulen

Praxis der Naturwissenschaften, 1966/2, S.37-41

Die vorliegende Versuchsbeschreibung wurde von Prof. G. Groschopf, Geislingen verfasst.

Während die im elektrischen Feld auf Ladungsträger ausgeübten Kräfte leicht meßbar sind (z.B. mit Drehwaagen), kann der entsprechende elektromagnetische Versuch nach Gl. (2) nicht durchgeführt werden, da es mit den uns zur Verfügung stehenden experimentellen Mitteln unmöglich ist, das Produkt $q \cdot v$ ausreichend groß zu machen.

Nun ist aber die sichtbare Bewegung eines Elektrizitätsträgers der unsichtbaren Bewegung von Elektronen im Inneren von elektrischen Leitern *) gleichwertig. Befindet sich in einem Leiterstück der Länge s die Ladung q und bewegt sich diese mit der Geschwindigkeit v , so gilt

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q \cdot v}{s} \quad \text{oder} \quad I \cdot s = q \cdot v \quad (I \text{ Stromstärke}).$$

Bringt man also eine stromdurchflossene Flachspule durch einen Schlitz in das Magnetfeld einer eisenlosen Spule, so kann die, durch die magnetische Induktion B bewirkte und von der Geschwindigkeit v der Ladungsträger abhängige Kraft F mit makroskopischen Hilfsmitteln, - z.B. mit Kraftmessern - gemessen werden. Die Gleichung

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{geht nämlich über in} \quad \vec{F} = s \cdot \vec{I} \times \vec{B}.$$

Mit eisenlosen Spulen lassen sich - meist in Verbindung mit dem stabilisierten Netzgerät 5224 und mit dem Meßverstärker 7212 auch Messungen zum Induktionsgesetz, zur Eigeninduktivität und zur Thomsonschen Gleichung mit großer Genauigkeit in einfacher Weise durchführen.

*) Dazu gehören auch Elektronenstrahlen (z.B. in Elektronenstrahl- und Wehnelt- röhren).

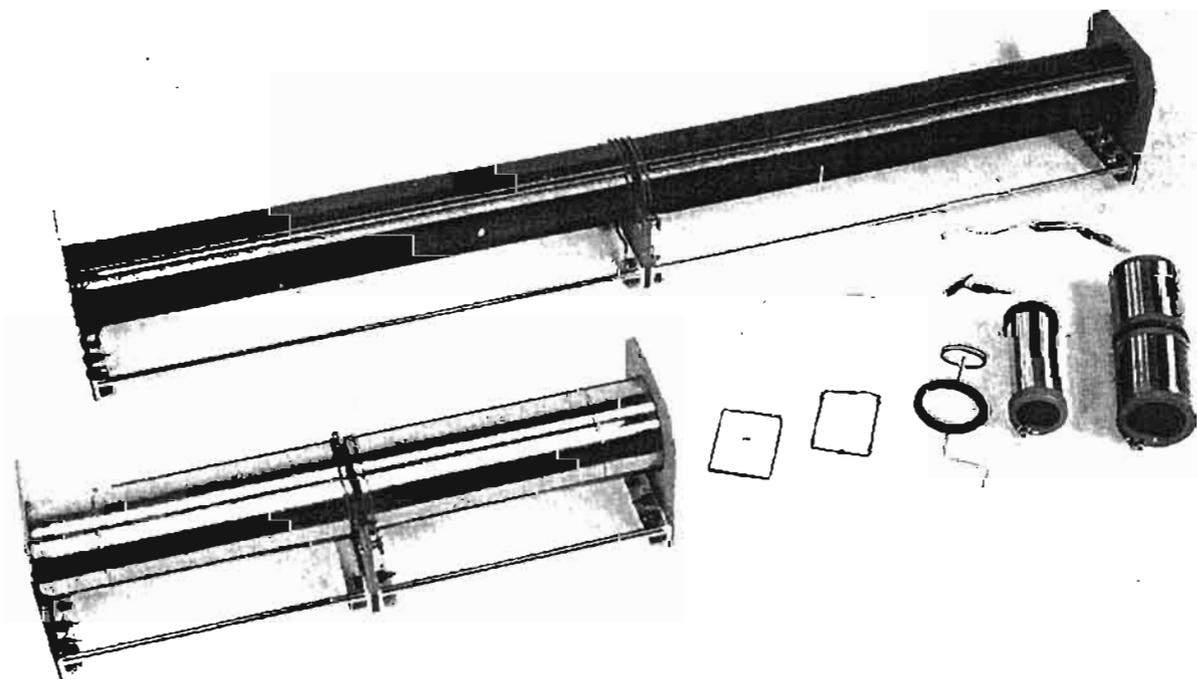


Abb. 1

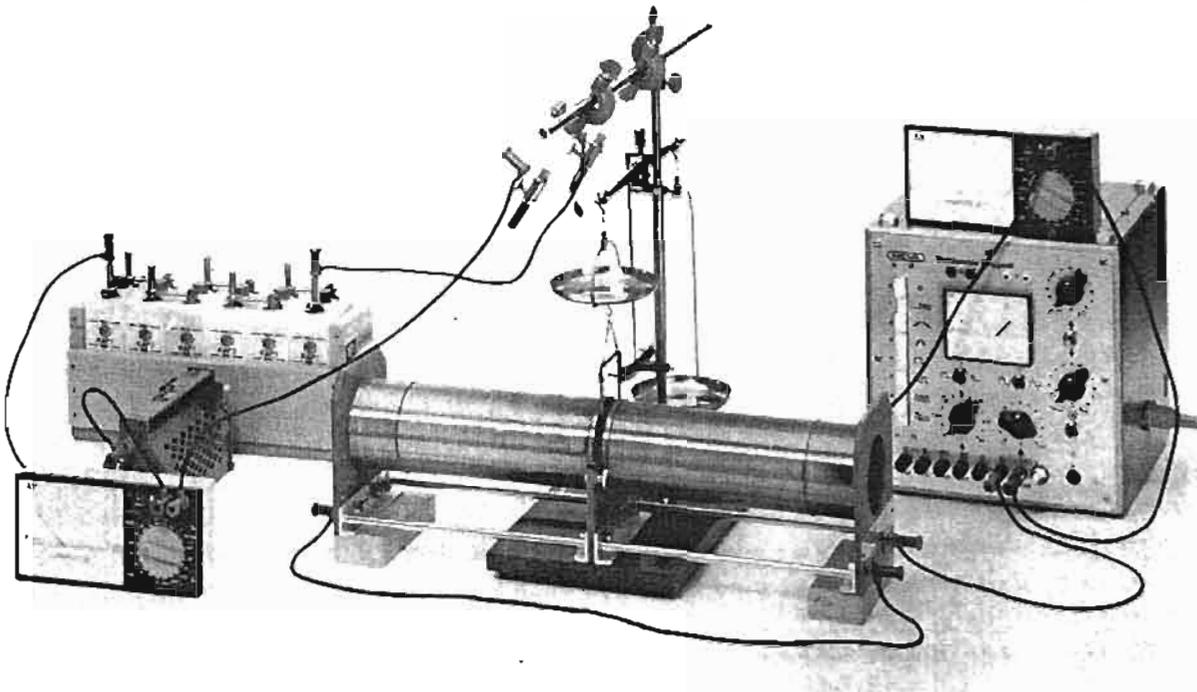


Abb. 2 Aufbau für Versuch 1
Kraftmessung mit der hydrostatischen Waage

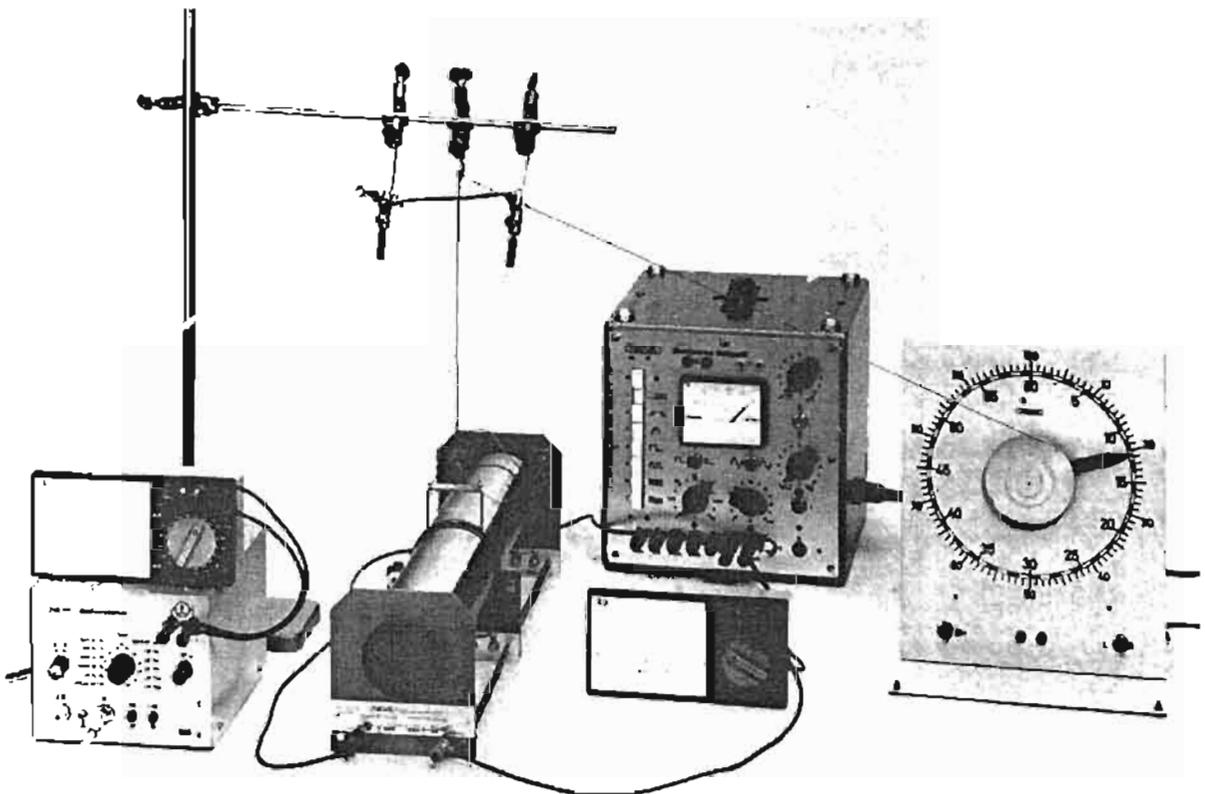


Abb. 3 Aufbau für Versuch 4
Bewegtes Leiterstück im Magnetfeld.

B Beschreibung der Geräte

Nr. 6533 Zylinderspule hochohmig

Gesamtwindungszahl 16000 Wd

Gesamtlänge 48 cm

Mittlerer Wicklungsquerschnitt $46,5 \text{ cm}^2$

Ohmscher Widerstand ca. 2300 Ohm

Max. zulässiger Spulenstrom 100 mA

Drahtdurchmesser der Wicklung 0,20 mm

Die Zylinderspule besteht aus zwei zusammensteckbaren Spulenhälften, die jeweils zwei Wicklungen mit je 4000 Windungen haben. Jede Wicklung kann - vom Ende her gesehen - bei einem Fünftel (= 800 Wd. auf 4,8 cm) angezapft werden.

Bei der zusammengesteckten Zylinderspule sind die äußeren Wicklungen beider Spulenhälften und die inneren Wicklungen miteinander verbunden. Die äußeren Wicklungen haben blaue, die inneren rote Buchsen. Alle Wicklungen sind im gleichen Wicklungssinn hintereinandergeschaltet, wenn die Spule nach Abb. 4 angeschlossen wird. Es muß also eine rote Buchse am einen Spulenende mit einer blauen am anderen Ende verbunden werden. Bei der Erregerstromstärke $I_{\text{err}} = 100 \text{ mA}$ und bei Anschluß von 16000 Windungen erhält man so in der Spule die

magnetische Induktion $B = 4,19 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 41,9 \text{ Gauß}$ oder die

magnetische Feldstärke $H = \frac{1}{3} \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{m}}$.

Eigeninduktivität $L = 3,11 \text{ H}$

Verbindet man eine blaue und eine rote Buchse am gleichen Spulenende und führt den Strom am anderen Spulenende zu, so durchläuft der Strom die Wicklungen im entgegengesetzten Umlaufsinn und die magnetische Induktion ist Null.

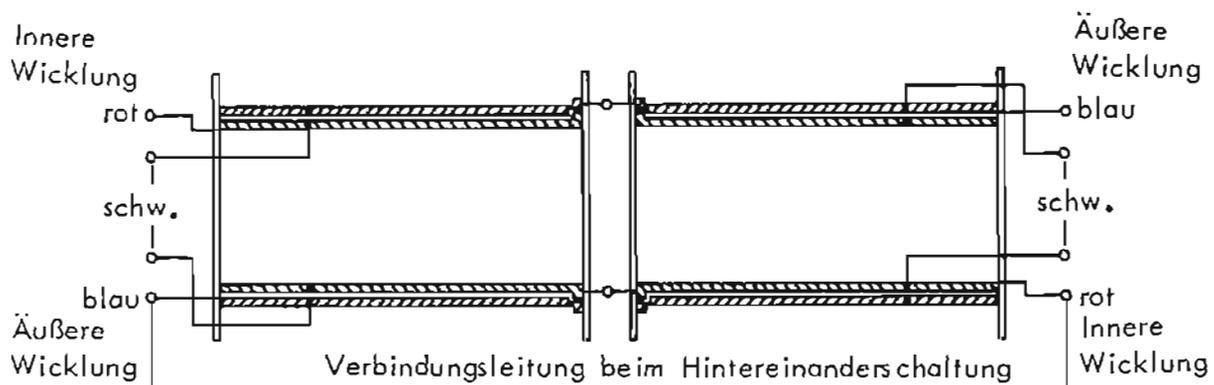


Abb. 4 Anordnung der Wicklungen

Beim Zusammenstecken der Spulen ergibt sich in der Mitte ein Schlitz von 6 mm Breite. Durch diesen kann man einen Drahtrahmen, der den Prüfstrom führt, oder flache Induktionsspulen einschieben. Die im Schlitz fehlenden Windungen sind unmittelbar daneben zusätzlich aufgewickelt; das Feld ist im Inneren der Spule hinreichend homogen, wie die Messungen zeigen.

Die Feldstärke entspricht dem für unendlich lange Spulen geltenden Wert bis auf einen Fehler, der unter 1 % bleibt; das außen zurücklaufende Feld beträgt weniger als 0,3 % vom Innenfeld.

Nr. 6534 Zylinderspule niederohmig

Gesamtwindungszahl 2660 Wd Ohmscher Widerstand ca. 30 Ohm
 Gesamtlänge 1 m Max. zulässiger Dauerstrom 1,5 A
 Mittlerer Wicklungsquerschnitt 46,5 cm² Drahtdurchmesser der Wicklung 0,70 mm

Diese Zylinderspule entspricht in Anordnung und Aufbau der Spule Nr. 6533. Sie hat auf jeder Spulenhälfte zwei Wicklungen mit je 665 Windungen, die jeweils bei 133 Windungen (von außen) angezapft sind. Die Anschlußbuchsen der äußeren Wicklung sind blau, die der inneren Wicklung rot. Das Hintereinanderschalten der Wicklungen erfolgt nach Abb. 4.

Bei 1,5 A Erregerstromstärke und 2660 Windungen erhält man im Inneren der Spule die

$$\text{magnetische Induktion } B = 5,01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 50,1 \text{ Gauß oder die}$$

$$\text{magnetische Feldstärke } H = 3990 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Eigeninduktivität $L = 41,3 \text{ mH}$.

Nr. 6536 Induktionsspule 2-teilig, 6 cm ϕ

bestehend aus zwei zusammensteckbaren Spulen mit je 1000 Windungen, je 7 cm lang.

Ohmscher Widerstand ca. 50 Ohm Mittlerer Wicklungsquerschnitt 28 cm²
 Drahtdurchmesser 0,30 mm

Die Spulen sind in gleichem Wickelsinn hintereinandergeschaltet, wenn der angeschlossene Steckerstift der einen Spule in die Buchse der anderen Spule eingeführt wird. Der zweite Stift dient nur als Führungstift.

Nr. 6537 Induktionsspule 4,2 cm ϕ , 2000 Windungen

Gesamtlänge 10 cm Mittlerer Wicklungsquerschnitt 14 cm²
 Widerstand ca. 140 Ohm Drahtdurchmesser 0,20 mm²

Der mittlere Wicklungsquerschnitt dieser Spule ist halb so groß wie bei der Spule Nr. 6536.

Nr. 6538 Drahring 5,2 cm ϕ mit Achsen, Schnurrolle und Kurbel

Windungszahl 500 Ohmscher Widerstand 200 Ohm
 Mittlerer Wicklungsquerschnitt 21,5 cm² Drahtdurchmesser 0,1 mm

Der Drahring ist 5,5 mm dick und kann in den Schlitz der zusammengesteckten Zylinderspulen eingeführt werden. Um zwei in der Richtung eines Durchmessers angebrachte Achsen kann der Ring im Feld gedreht werden. Die Achsen dienen gleichzeitig als elektrische Anschlüsse. Mit zwei beigegebenen Blattfedern, die unter die Rändelmutter am mittleren Spulenflansch geklemmt werden, kann die zweiteilige Achse des Rings drehbar gelagert werden. Die Buchsen in den Rändelmuttern dienen dann als Anschlußbuchsen.

Nr. 6539 Drahtrahmen 50 Windungen

Länge einer Schmalseite 5 cm somit wirksame Länge 2,50 m
Gewicht ca. 8,5 p Ohmscher Widerstand ca. 3 Ohm
Drahtdurchmesser 0,30 mm max. zulässiger Dauerstrom 1 A

Kurzzeitig kann durch den Rahmen ein größerer Strom fließen. Vorsicht !
Der Rahmen darf nicht zu warm werden.

Nr. 6540 Drahtrahmen 500 Windungen auf Plexiglas

Länge einer Schmalseite 5 cm somit wirksame Länge 25 m
Ohmscher Widerstand 280 Ohm Drahtdurchmesser 0,10 mm

Dieser Rahmen wird bei Versuch 4 als "bewegtes Leiterstück" im Magnetfeld verwendet. Zwei Querstriche in 30 mm Abstand dienen als Wegmarken.

Nr. 6541 Drahtrahmen 100 Windungen

Länge einer Schmalseite 5 cm somit wirksame Länge 5 m
Gewicht ca. 7,5 p Ohmscher Widerstand 14 Ohm
Drahtdurchmesser 0,20 mm max. zulässiger Dauerstrom 0,5 A
Kurzzeitiger Prüfstrom bis 1,5 A. Vorsicht !

Nr. 6545 Satz Zubehörteil bestehend aus :

1 Winkelmesser	2 isolierte Klemmen
1 Querstab 400 x 10 ø	1 Aufhängehaken
4 Einfachmuffen	Perlonfaden

Nr. 6546 Aufbauteile für Substitutionswaage

2 Auflagestäbe 1 Haltefuß für Drahtrahmen

Zur Durchführung der Versuche sind folgende Geräte zusätzlich erforderlich:

Stabilisiertes Netzgerät 0...250 V	NEVA Nr. 5224
oder Gleichstromquelle 60...120 V mit 2...4 A belastbar für 6534	
Gleichstromquelle 6...12 V, z.B. 2 Nickel-Cadmium-Stahlbatterien	NEVA Nr. 5281/5282
Federwaage 10 p	NEVA Nr. 2050
oder hydrostatische Waage (mit einer Waageschale an kurzem Bügel)	NEVA Nr. 2002
oder Präzisionswaage (Substitutionswaage von Bizerba, Mettler oder Sartorius)	
Meßverstärker	NEVA Nr. 7212
oder Spiegelgalvanometer	
Synchronmotor mit Getriebe (elektrische Stoppuhr)	NEVA Nr. 5407
Experimentiermotor langsam laufend, regelbar (für Versuch 7)	NEVA Nr. 5405
Elektronischer Zähler und Kurzzeitmesser	NEVA Nr. 7203
Elektronenstrahl-Oszillograf	NEVA Nr. 7251
Fotodiode	NEVA Nr. 7208
Tonfrequenzgenerator	
Experimentierleuchte	NEVA Nr. 0304
Kondensator 1 µF, 2 Stück	
Verstärkerröhre auf Platte, z.B. EC 92	
Regulierwiderstand ca. 3 Ohm	
Stoppuhr	NEVA Nr. 1076
Verbindungsleitungen, Stellzeug und Kleinmaterial	

C VersucheVersuch 1Magnetische Induktion B (magnetische Flußdichte)Benötigte Geräte :

Hochohmige Zylinderspule (6533)
 Stabilisiertes Netzgerät zur Erzeugung des Erregerstroms (5224)
 Strommeßgerät 0,1 A. –

oder

Niederohmige Zylinderspule (6534)
 Gleichstromquelle mit 60...120 V und 2...4 A Belastbarkeit
 Strommeßgerät 2...4 A –

ferner

Drahtrahmen 5 cm x 7 cm mit 50 Windungen (6539)
 Drahtrahmen 5 cm x 7 cm mit 100 Windungen (6541)
 Gleichstromquelle 6...12 V (Sammler 5281-82 oder Netzgerät mit Gleichrichter 5230)
 Strommeßgerät 1 A –
 Federwaage 10 p (2050) (und Haken)
 oder Hydrostatische Waage (mit einer Waagschale an kurzem Bügel)
 oder Präzisionswaage (Substitutionswaage von Bizerba, Mettler oder Sartorius u.a.)
 2 isolierte Schlitzklemmen
 Regulierwiderstand
 Verbindungsschnüre, Stellzeug

Bemerkung : Bei den Versuchen 1...3 benötigt man jeweils zwei Ströme, den Strom I im Drahtrahmen und den Erregerstrom I_{err} in der Spule. Man mißt die Kraftwirkung, die die Magnetfelder dieser Ströme aufeinander ausüben. Richtige Werte für die Kraft F erhält man, wenn wenigstens einer der beiden Ströme ein reiner Gleichstrom ist (Strom von einem Akkumulator oder gut geglätteter Gleichstrom von einem Netzgerät, z.B. vom stabilisierten Netzgerät Nr. 5224); der andere kann ein pulsierender Gleichstrom sein. Denn die Kraft F am Drahtrahmen ist, ebenso wie die Anzeige eines Drehpulmeßwerks bei pulsierendem Gleichstrom, proportional zum galvanometrischen Mittelwert des Stroms.
 Wenn jedoch beide Ströme pulsieren, so weisen die Meßergebnisse Fehler bis zu 25 % auf.

Zweck des Versuchs : Es ist eine Maßgröße für das magnetische Feld aufzufinden.

In einem magnetischen Feld wirkt auf einen Leiter der Länge s , der von einem Strom der Stärke I durchflossen wird, und der senkrecht zu den magnetischen Feldlinien steht, eine Kraft F . Diese Kraft F steht senkrecht zur Strom- und zur Feldrichtung. Sie ist, wenn das Feld nicht verändert wird, proportional zur Stromstärke I und zur Länge s des Leiters.

Der Quotient $F/I \cdot s$ ist also nur abhängig vom Magnetfeld und nicht abhängig vom Prüfstrom I und von der Leiterlänge s . Man definiert deshalb als magnetische Induktion (magnetische Flußdichte)

$$B = \frac{F}{I \cdot s}$$

Versuchsdurchführung : Beim Versuch wird die Proportionalität der Kraft F zum Prüfstrom I und zur wirksamen Länge s des Drahtrahmens bei konstanter Erregerstromstärke I_{err} in der Spule nachgewiesen.

Die beiden Lagen der Spule 6533 werden hintereinandergeschaltet. Die Erregerstromstärke wird auf 0,1 A eingestellt und laufend nachreguliert (Widerstandsänderung durch Erwärmung der Spule).

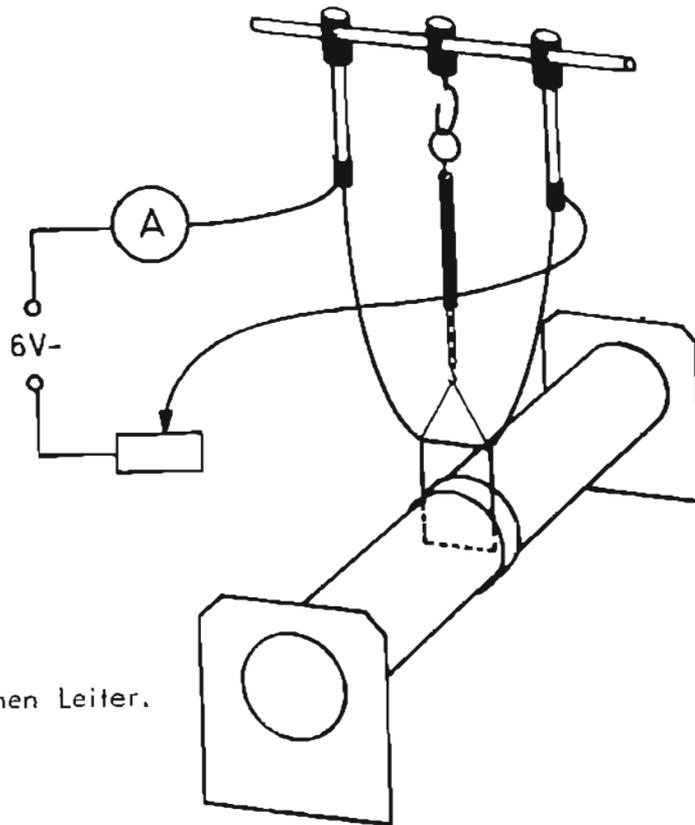


Abb. 5 Kraft auf stromdurchflossenen Leiter.
Versuchsanordnung nach (1)

a) Abhängigkeit der Kraft F von der Prüfstromstärke I bei konstanter Erregerstromstärke I_{err}

(1) Kraftmessung mit der Federwaage. Der Drahtrahmen mit 50 Windungen wird an einem 10 p-Kraftmesser (0,1 N) so aufgehängt, daß er frei im Spalt der Feldspule spielen kann; seine untere Schmalseite soll waagrecht und etwas über der Spulennmitte liegen. Die Zuleitungen werden lose hängend an die Buchsenstiele geführt. Dort werden Akkumulator bzw. Netzgerät und Strommesser angeschlossen (siehe Abb. 5). Die Richtungen von Erregerstrom und Prüfstrom sind so zu wählen, daß der Drahtrahmen nach unten gezogen wird. Es ist zu beachten, daß der Rahmen nirgends anstößt und daß die Zuleitungen nicht spannen !

Die Ungenauigkeiten der Kraftmessung mit einer Federwaage wirken sich bei kleinen Kräften am stärksten aus. Beim Demonstrationsversuch empfiehlt es sich deshalb mit $I = 2$ A anzufangen und dann auf 1 A und 0,5 A überzugehen.

(2) Kraftmessung mit der hydrostatischen Waage. Genauere Messungen kann man ausführen, wenn man anstelle der Federwaage eine Balkenwaage, z.B. eine hydrostatische Waage mit einer Waagschale an kurzem BÜgel verwendet. Man hängt den Drahtrahmen an den Haken der kurzen Waagschale und führt die Zuleitungen lose hängend zu den Buchsenstielen. Die Waage wird austariert. Dabei soll der Rahmen frei im Spalt der Feldspule spielen. Seine untere Seite soll waagrecht in der Mitte der Spule hängen. Nun legt man auf der langen Waagschale nacheinander verschiedene Übergewichte auf (bis zu etwa 1,5 g), schaltet Erregerstrom und Prüfstrom ein und verändert den Prüfstrom so lange, bis die Waage wieder einspielt. (Aufbau nach Abb. 2)

(3) Kraftmessung mit der Präzisionswaage. Sehr bequem und mit besonders großer Genauigkeit läßt sich die Kraftmessung mit einer überschaligen Substitutionswaage durchführen. Man stellt den Drahtrahmen in einem Haltefuß auf die Waagschale, so daß die freie Schmalseite nach oben zeigt. Die Zuleitungen werden lose hängend an die Buchsenstiele geführt. Die Feldspule wird mit Stativmaterial so über der Waage angebracht, daß der Spalt nach unten zeigt und der Drahtrahmen ohne zu berühren in die Mitte der Feldspule hineinragt. (Aufbau nach Abb.6) Dann wird die Waage auf Null austariert. Auf genaue Einstellung des Nullpunktes ist zu achten. Die Nullpunkteinstellung wird am besten vor und nach jeder Messung kontrolliert. Nun werden Erreger- und Prüfstrom eingeschaltet und die Waage abgelesen. Nach Multiplikation des Meßergebnisses in Gramm mit der Fallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ erhält man die Kraft F in Millinewton (mN).

Ergebnis : Die Kraft F ist proportional zum Prüfstrom I oder $\frac{F}{I} = \text{konst.}$
(siehe Schaubild 5).

b) Der Drahtrahmen wird gegen den Rahmen mit 100 Windungen ausgetauscht. Stellt man gleiche Prüfstromstärken wie bei a) ein, so erhält man jeweils doppelt so große Kräfte wie bei a).

Ergebnis : Die Kraft F ist proportional zur wirksamen Leiterlänge s oder $\frac{F}{s} = \text{konst.}$
(siehe Schaubild 5).

Die wirksame Leiterlänge s ist gleich der Summe der Längen aller waagrechten unteren Drahtstücke des Rahmens; sie ist gleich dem Mittelwert aus größter und kleinster Rahmenbreite, multipliziert mit der Windungszahl des Rahmens. Der Rahmen soll genau rechteckig sein; ist er verbogen, treten Fehler auf.

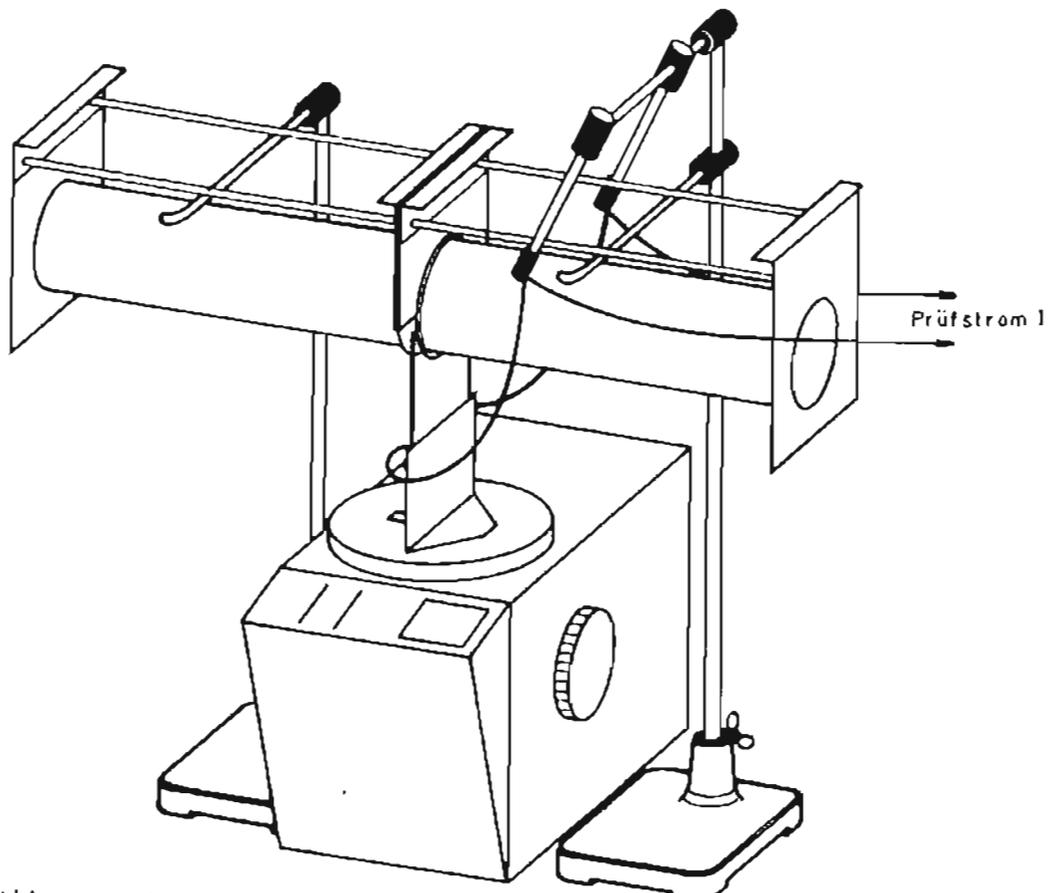


Abb. 6 Kraft auf stromdurchflossenen Leiter
Versuchsanordnung nach (3)

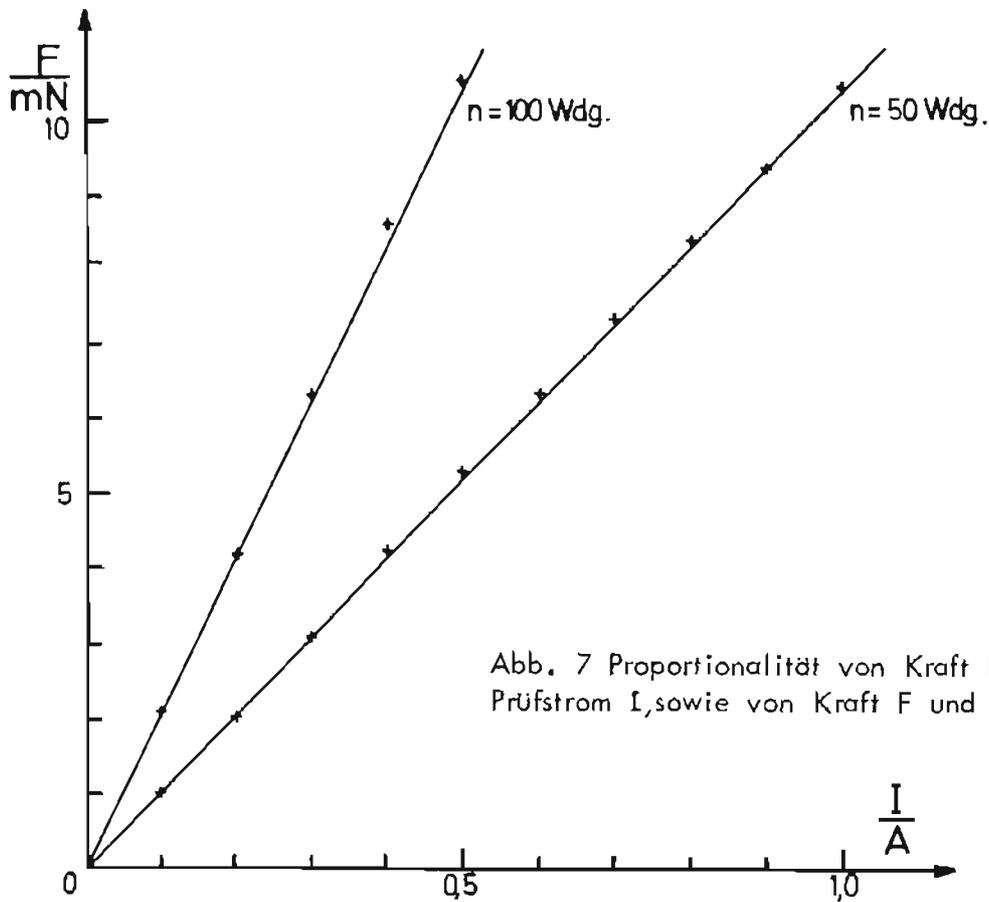


Abb. 7 Proportionalität von Kraft F und Prüfstrom I , sowie von Kraft F und Leiterlänge s .

c) Es ist einleuchtend, daß das Feld schwächer wird, wenn man die Erregerstromstärke kleiner macht. Dann findet man aber auch einen kleineren Ausdruck $B = F/l \cdot s$; es ist also sinnvoll diesen Ausdruck als Maßgröße für das magnetische Feld zu verwenden. Die Messungen von a) und b) liefern mit großer Genauigkeit (bei $I_{\text{err}} = 100 \text{ mA}$) die magnetische Induktion $B = 4,19 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$.

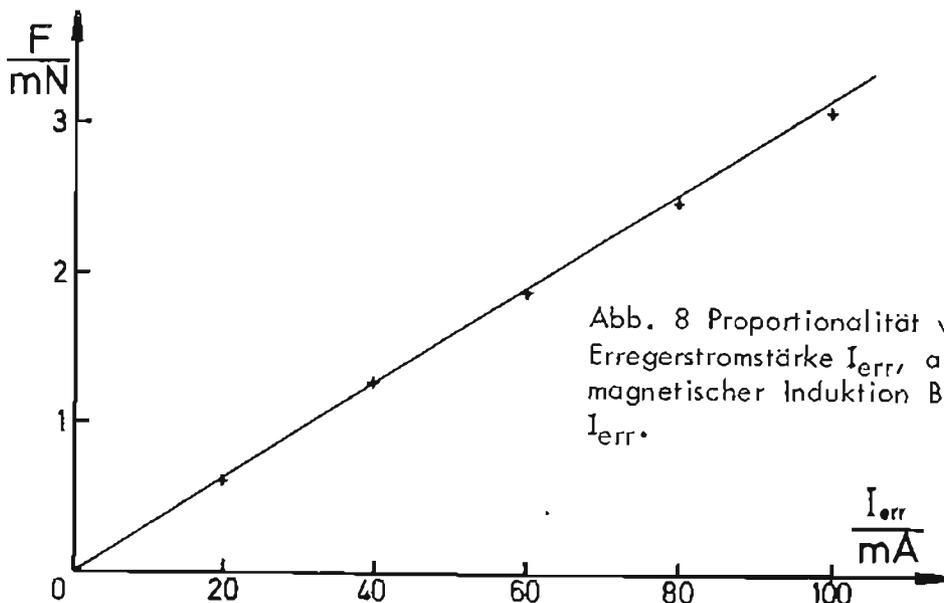


Abb. 8 Proportionalität von Kraft F und Erregerstromstärke I_{err} , also auch von magnetischer Induktion B und Erregerstromstärke I_{err} .

Versuch 2 Das magnetische Feld einer langen Zylinderspule

Benötigte Geräte und Versuchsaufbau wie bei Versuch 1

Zweck des Versuchs : Es soll die Abhängigkeit der magnetischen Induktion B einer langen eisenfreien Zylinderspule von der Erregerstromstärke I_{err} , von der Windungszahl n der Spule, von ihrem Querschnitt A und von ihrer Länge ℓ untersucht werden.

a) Durch Änderung der Erregerstromstärke I_{err} erhält man bei konstantem Prüfstrom I das

Ergebnis : Die Kraft F ist der Erregerstromstärke I_{err} proportional, also ist auch die magnetische Induktion B der Erregerstromstärke I_{err} proportional, $B \sim I_{\text{err}}$. (siehe Schaubild 8).

b) Schaltet man nur eine der beiden Lagen der Erregerspule ein, so findet man für eine gleiche Erregerstromstärke wie bei a)

$$F \sim n, \text{ also auch } B \sim n.$$

c) Verwendet man bei gleicher Erregerstromstärke und bei gleichem Prüfstrom einmal die äußeren Lagen der Erregerspule und dann die inneren Lagen, so bleibt die Kraft fast unverändert trotz des verschiedenen Spulenquerschnitts. Die Kraft F und damit die magnetische Induktion B ist also unabhängig von der Querschnittsfläche A der Erregerspule.

Um dies zu zeigen, kann man auch die beiden Spulenlagen gegeneinander schalten. Ihre Felder heben sich dann gegenseitig auf und auf den Drahtrahmen wirkt fast keine Kraft. So läßt sich auch der Vektorcharakter der magnetischen Induktion B zeigen.

d) Läßt man die an den Enden der Spule liegenden absplittbaren Windungen weg (bei beiden Lagen) und stellt die Erregerstromstärke wieder auf den ursprünglichen Wert ein, so ändert sich die Kraft F und damit die magnetische Induktion B kaum merklich. Die beiden äußeren Teile für sich liefern also in der Mitte der Spule keinen merklichen Beitrag zum Feld. Die magnetische Induktion B ist somit außer von der Erregerstromstärke I_{err} nur noch von der Wicklungsdichte n/ℓ abhängig.

Ergebnis : In einer eisenfreien langen Zylinderspule ist die magnetische Induktion

$$B = \mu_0 \cdot I_{\text{err}} \cdot \frac{n}{\ell},$$

wobei der Proportionalitätsfaktor μ_0 magnetische Feldkonstante heißt.

Versuch 3 Messung der magnetischen Feldkonstanten

Benötigte Geräte wie bei Versuch 1

Aus Versuch 1 erhält man für die magnetische Induktion

$$B = \frac{F}{I \cdot s},$$

nach Versuch 2 ist $B = \mu_0 \frac{I_{\text{err}} \cdot n}{\ell}$.

Aus diesen beiden Gleichungen erhält man für die magnetische Feldkonstante

$$\mu_0 = \frac{F \cdot \ell}{I \cdot s \cdot I_{\text{err}} \cdot n}$$

Die magnetische Feldkonstante μ_0 läßt sich also berechnen, wenn F , I und I_{err} gemessen werden und wenn die Apparatekonstanten n , ℓ und s bekannt sind. Die genauesten Wert für μ_0 erhält man bei Verwendung einer Präzisionswaage. Die Meßpunkte der Schaubilder (7) und (8) wurden mit einer solchen gemessen. Die eingezeichneten Geraden stellen die berechneten Werte dar.

Zahlenbeispiel :

Erregerstromstärke $I_{\text{err}} = 0,1 \text{ A}$

Windungszahl der Feldspule $n = 16000$

Länge der Feldspule $\ell = 48 \text{ cm}$

wirksame Länge des Drahtrahmens $s = 50 \cdot 5 \text{ cm} = 2,5 \text{ m}$

damit ist
$$\mu_0 = \frac{0,48 \text{ m}}{2,5 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ A} \cdot 16000} \cdot \frac{F}{I}$$

oder als Zahlenwertgleichung

$$\frac{\mu_0}{\text{Vs/Am}} = 1,20 \cdot 10^{-4} \frac{\text{F/mN}}{\text{I/mA}}$$

oder

$$\frac{\mu_0}{\text{Vs/Am}} = 1,18 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m/g}}{\text{I/mA}}$$

(m Massenangabe der Waage, mN Millinewton)

Prüfstrom- stärke I/mA	Massen- angabe m/g	Kraft F/mN	magnetische Feldkonstante $\mu_0 / (\text{Vs/Am})$
100	0,105	1,03	1,236
200	0,208	2,04	1,224
300	0,316	3,10	1,239
400	0,433	4,25	1,274
500	0,540	5,30	1,271
600	0,647	6,35	1,269
700	0,752	7,38	1,264
800	0,858	8,42	1,262
900	0,956	9,39	1,250
1000	1,066	10,47	1,254

Versuch 4Induktionsgesetz 1. Teil Bewegtes Leiterstück im Magnetfeld

Ein Leiterstück der Länge ℓ wird in einem konstanten Magnetfeld der magnetischen Induktion B so bewegt, daß seine Geschwindigkeit senkrecht zu den Feldlinien v_s beträgt. Dann entsteht an seinen Enden die Spannung

$$U = B \cdot \ell \cdot v_s$$

Benötigte Geräte :

Hochohmige Zylinderspule, zweiteilig (Nr. 6533)

Drahtrahmen mit 500 Windungen, 5 cm x 7 cm, auf Plexigloskörper (Nr. 6540)

Drahtrahmen mit 100 Windungen, 5 cm x 7 cm (Nr. 6541)

Stabilisiertes Netzgerät zur Erzeugung des Erregerstroms (Nr. 5224)

Strommeßinstrument, Meßbereich 0,1 A –

Meßverstärker (Nr. 7212) mit Spannungsmeißinstrument, Meßbereich 3 V– oder 10 V–
oder Spiegelgalvanometer

Synchronmotor mit Getriebe (Nr. 5407)

Stativmaterial, Verbindungsleitungen

Anstelle der hochohmigen Spule 6533 kann auch die niederohmige Spule 6534 verwendet werden. Man benötigt dann eine entsprechende Stromquelle für den Erregerstrom (z.B. 60 V...120 V, mit 2...4 A belastbar, gut geglättet) sowie ein passendes Strommeßinstrument.

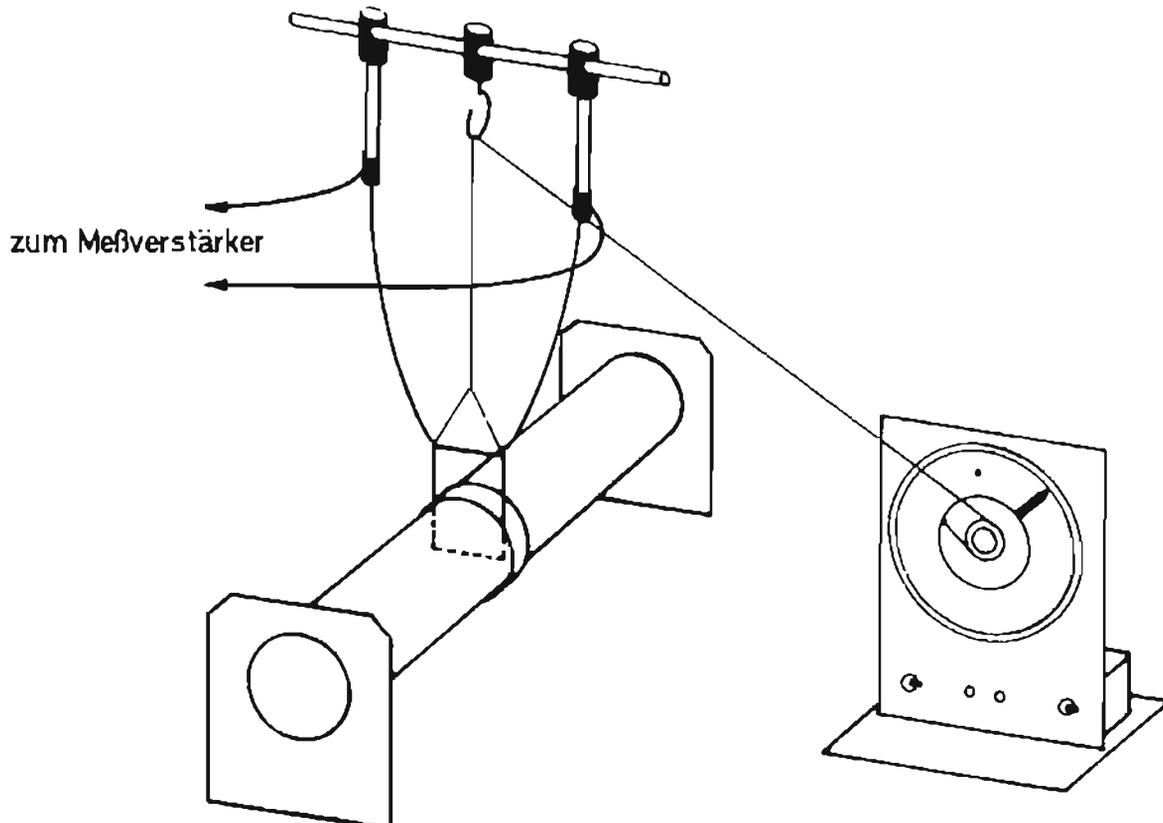


Abb. 9 Bewegtes Leiterstück im Magnetfeld.
Versuchsanordnung

Versuchsaufbau und -durchführung

Die beiden Spulenhälften (6533) werden zusammengesteckt und die beiden Windungslagen hintereinandergeschaltet. Erregerstromquelle und Strommeßinstrument werden angeschlossen. Am stabilisierten Netzgerät kann jede Erregerstromstärke zwischen Null und 0,1 A eingestellt werden. Der Drahtrahmen kommt in den Schlitz der Feldspule. Seine Zuleitungen führen lose hängend zu zwei Buchsenstielen und von dort zum Meßverstärker. Anstelle des Meßverstärkers kann auch ein Spiegelgalvanometer verwendet werden. Ein dünner Perlonfaden (0,2 mm dick), der über einen Haken zur Stufenscheibe des Synchronmotors geführt und dort eingehängt wird, dient dazu, den Rahmen langsam durch das Feld zu ziehen. Die dabei auftretende Induktionsspannung wird mit dem Meßverstärker gemessen. (siehe Abb.9)

Die Stufenscheibe des Synchronmotors hat Rollen mit den Durchmessern 18,9 mm, 38,0 mm und 76,2 mm. Damit ergeben sich bei Verwendung des Perlonfadens mit 0,2 mm Dicke Umfänge von 60 mm, 120 mm und 240 mm und somit Geschwindigkeiten v_s , mit denen der Drahtrahmen durch das Spulenfeld bewegt wird, von 1 mm/s, 2 mm/s und 4 mm/s.

Diese Geschwindigkeiten können auch direkt gemessen werden. Der Plexiglas-körper des Drahtrahmens trägt zwei Querstriche in $\Delta s = 3$ cm Abstand. Man beobachtet wie diese Striche aus dem Spulenrohr auftauchen und stoppt die dazwischen liegende Zeit Δt . Dann ist $v_s = \Delta s / \Delta t$.

Anstelle des Synchronmotors kann auch jeder langsam und gleichmäßig laufende Motor dienen, dessen Geschwindigkeit sich regulieren läßt und dessen Achse nicht schwankt. Die Geschwindigkeiten, mit denen der Rahmen aus der Spule gezogen wird, sollen etwa zwischen 1 mm/s und 5 mm/s liegen.

Bestimmung der Induktionsspannung U

a) Bei Verwendung des Meßverstärkers läßt sich die Induktionsspannung U direkt in mV ablesen. Bei der Einstellung des Meßbereichs ist zu beachten, daß die Angaben auf der Frontplatte des Meßverstärkers die gemessenen Spannungen für ein Volt des Anzeigeinstruments bedeuten. Empfehlenswert sind Anzeigeinstrumente mit 3 V – oder 10 V– Meßbereich.

Bei Verwendung eines Spiegelgalvanometers ergeben sich folgende Möglichkeiten zur Spannungsbestimmung :

b) Die Stromkonstante des Galvanometers ist bekannt (oder eine Eichkurve für die Stromstärke ist vorhanden), ebenso kennt man die Widerstände R_i des Galvanometers und R_G des Drahtrahmens. Dann ist

$$U = I (R_G + R_i),$$

wo I die vom Galvanometer gemessene Stromstärke ist.

Bestimmung des Galvanometerwiderstandes R_i :

Man legt eine Akku-Zelle über einen hinreichend großen regelbaren Widerstand (z.B. Drehpotentiometer mit einigen MOhm) an das Galvanometer und stellt auf einen an sich beliebigen Galvanometerausschlag ein. Nun schaltet man einen Meßwiderstand parallel zum Galvanometer und verändert diesen so lange bis das Galvanometer nur noch die halbe Stromstärke anzeigt. Nun stimmen Galvanometerwiderstand R_i (samt Zuleitungen) und Parallelwiderstand überein.

c) Spannungseichung des Galvanometers mit einer Spannungsteilerschaltung

Man legt nach Abb. 10 einen Widerstand von genau 1 Ohm in den aus Galvanometer und Drahtrahmen gebildeten Induktionskreis (dieser Widerstand liegt während des Induktionsversuchs noch nicht im Kreis!) und bildet mit einer Widerstandsdekade und einer Akkumulatorzelle einen Spannungsteiler. Dann gilt, wenn R der eingeschaltete Widerstand der Dekade ist

$$U = \frac{U_0 \cdot 1\Omega}{R + 1\Omega}$$

(bis auf eine kleine Ungenauigkeit, die dadurch entsteht, daß die Belastung des Potentiometers durch den Induktionskreis nicht berücksichtigt wurde). Durch geeignete Einstellung der Widerstandsdekade kann man den gleichen Galvanometerausschlag wie beim Induktionsversuch herstellen. Dann sind die Induktionsspannung und der oben angegebene Spannungsabfall an dem 1 Ohm-Widerstand einander gleich.

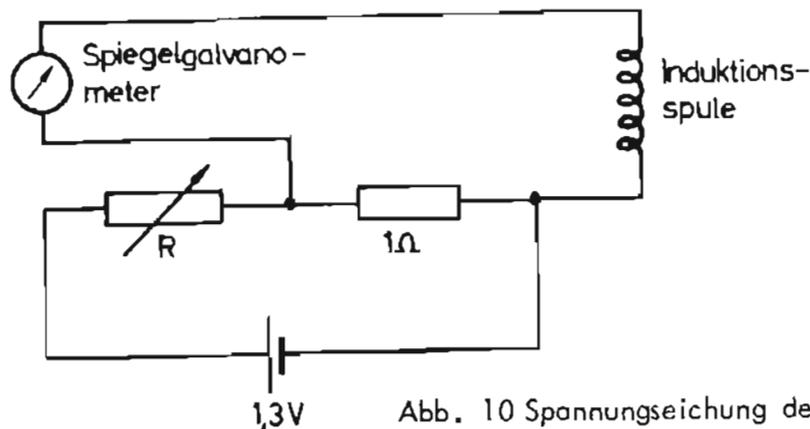


Abb. 10 Spannungseichung des Galvanometers

Messungen

a) Man verändert die Geschwindigkeit v_s mit der der Rahmen (Nr. 6540) durch das homogene Magnetfeld der Spule (6533) bewegt wird, indem man den Perlonfaden am äußeren Rand der Stufenscheibe des Synchronmotors eingehängt und ihn von dort aus über die verschiedenen Stufen lenkt.

Der Synchronmotor läßt sich auf Rechts- u. Linkslauf umsteuern, so daß die Induktionsspannung beim Eintauchen in das Spulenfeld und beim Herausziehen gemessen werden kann. Beim Umsteuern ist jeweils am Meßverstärker der Schalter für die Polung des Anzeigeinstrumentes (Kippschalter rechts oben) umzulegen.

Außerdem ist - vor allem beim Meßbereich $0,1 \text{ mV/V}$ auf genaue Einstellung des Nullpunktes zu achten (Drehknopf 0 P). Erhält man bei Aufwärts- und Abwärtsbewegung verschiedene Spannungswerte, so ist der Grund dafür meist die ungenaue Einstellung des Nullpunktes des Anzeigeinstrumentes. Mißt man unmittelbar hintereinander die Spannungswerte für beide Bewegungsrichtungen und bildet den Mittelwert, so wird ein etwaiger Nullpunktsfehler eliminiert.

Ergebnis : Die Induktionsspannung U ist der Geschwindigkeit v_s des Leiters proportional. $U \sim v_s$. Siehe Abb. 11

Bei $I_{\text{err}} = 100 \text{ mA}$ ($B = 4,19 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/m}^2$), $l = 500 \cdot 5 \text{ cm} = 25 \text{ m}$ und $v_s = 1 \text{ mm/s}$ ergibt sich eine Induktionsspannung $U = 0,105 \text{ mV}$. Entsprechend erhält man für $v_s = 2 \text{ mm/s}$ bzw. 4 mm/s die Spannungen $U = 0,210 \text{ mV}$ bzw. $0,419 \text{ mV}$.

Mittelt man über die kleinen Schwankungen der Spannung, die bei der Bewegung des Spulenrahmes auftreten und über die Messungen für Aufwärts- und Abwärtsbewegung, so ergeben sich diese Wert mit großer Genauigkeit.

b) Man verändert die magnetische Induktion B durch Verändern des Erregerstroms I_{err} und läßt die Leiterlänge und die Geschwindigkeit v_s unverändert.

Ergebnis : Die Induktionsspannung U ist der magnetischen Induktion B proportional. $U \sim B$. Siehe Abb. 12.

c) Man ersetzt den Drahtrahmen mit 500 Windungen durch denjenigen mit 100 Windungen (Nr. 6541) und läßt die magnetische Induktion B und die Geschwindigkeit v_s unverändert.

Ergebnis : Die Induktionsspannung U ist proportional zur Leiterlänge l . $U \sim l$.
Abb. 11

Die Versuche 4a, b und c liefern zusammengefaßt das Ergebnis

$$U \sim B \cdot l \cdot v_s \quad \text{oder} \quad U = K \cdot B \cdot l \cdot v_s .$$

Die Proportionalitätskonstante K erhält man aus den Meßwerten

$$K = \frac{U}{B \cdot l \cdot v_s} = 1 .$$

Damit lautet das Induktionsgesetz für den bewegten Leiter

$$U = B \cdot l \cdot v_s .$$

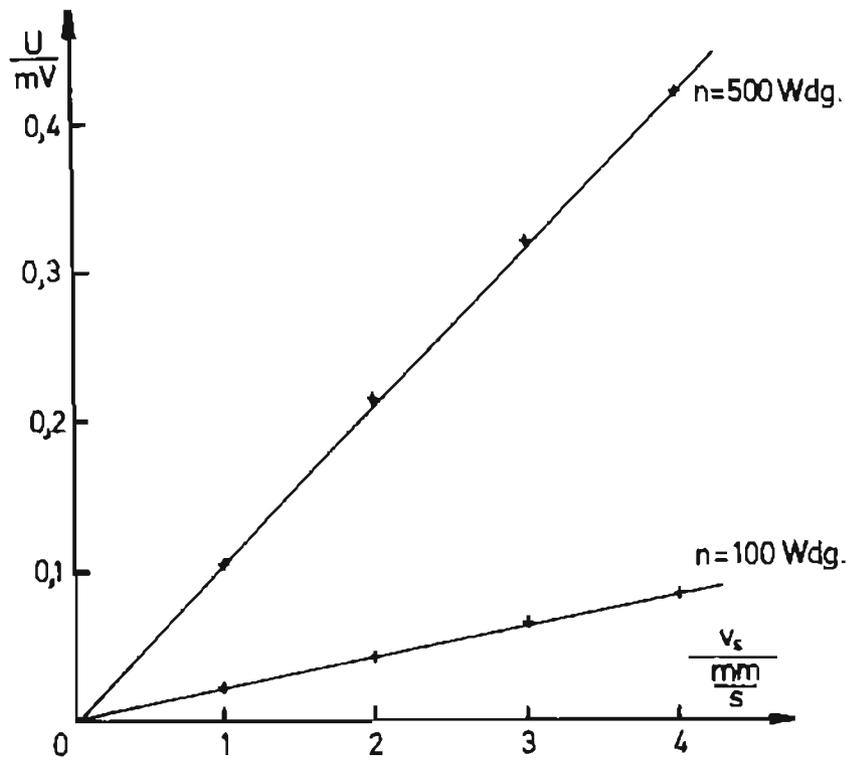


Abb. 11 Proportionalität der Induktionsspannung U zur Geschwindigkeit v und zur Länge des Leiters.

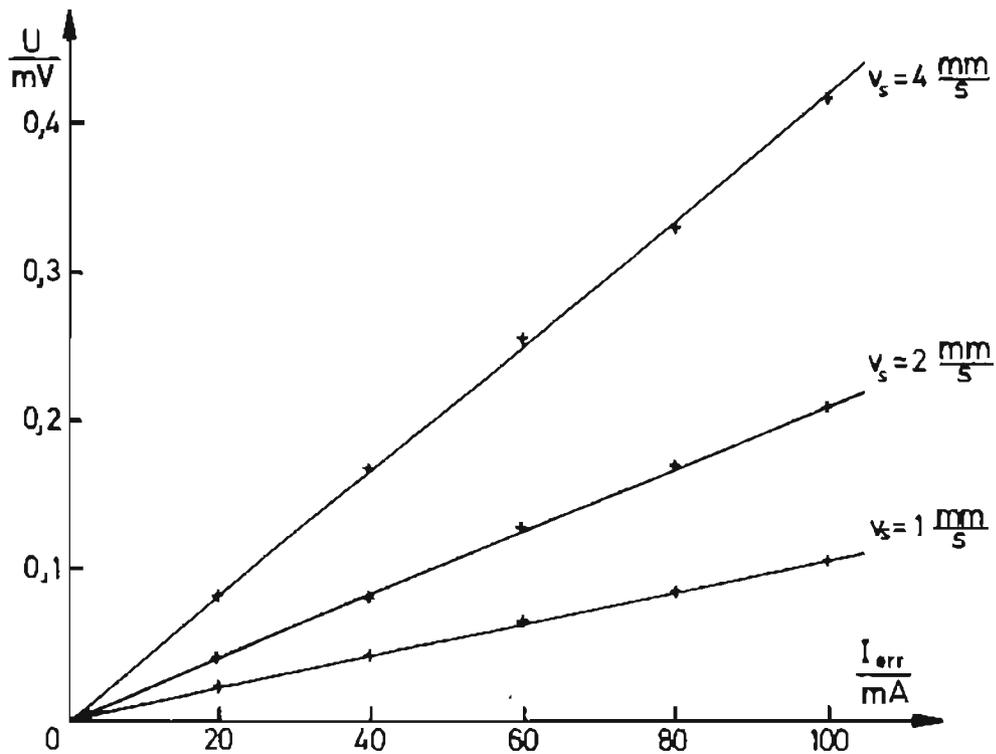


Abb. 12 Proportionalität von Induktionsspannung U und Erregerstrom I_{err} (magnetische Induktion B)

Versuch 5

Induktionsgesetz 2. Teil, Spule in sich änderndem Magnetfeld

Wird eine Induktionsspule mit n Windungen von einem Induktionsfluß senkrecht durchsetzt, der sich in der Zeit Δt gleichmäßig um $\Delta \Phi$ ändert, so entsteht in der Spule eine Induktionsspannung

$$U = - n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

Der Induktionsfluß Φ ist das Produkt aus der magnetischen Induktion B und der vom Feld senkrecht durchsetzten Fläche A_S der Induktionsspule.

Die Induktionsflußänderung $\Delta \Phi$ wird erzeugt durch die Änderung der Erregerstromstärke I_{err} in der Feldspule

Benötigte Geräte :

Hochohmige Zylinderspule zweiteilig (Nr. 6533) als Feldspule

Stabilisiertes Netzgerät zur Erzeugung des veränderlichen Erregerstroms I_{err} , (5224)

Strommeßinstrument, Meßbereich 0,1 A-

Induktionsspulensatz : 2 Spulen mit je $n_1 = 1000$ Windungen und $A_1 = 28 \text{ cm}^2$ Querschnittsfläche und eine Spule mit $n_2 = 2000$ Windungen und $A_2 = 14 \text{ cm}^2$ Querschnittsfläche (6536,6537).

Meßverstärker 7212

oder Spiegelgalvanometer

Stoppuhr, Verbindungsleitungen

Versuchsaufbau und -durchführung

Die beiden Hälften der Feldspule (6533) werden zusammengefügt und die beiden Windungslagen hintereinandergeschaltet. Das stabilisierte Netzgerät und das Strommeßinstrument werden angeschlossen. Am stabilisierten Netzgerät können nun gleichmäßig ansteigende und abfallende Erregerströme eingestellt werden mit Änderungsgeschwindigkeiten von etwa 1 mA/s bis 40 mA/s ($\nearrow \searrow$) bzw. 10 mA/s bis etwa 200 mA/s ($\nearrow \searrow$). Die Maximalstromstärke beträgt 100 mA.

Die Induktionsspulen werden an den spannungsempfindlichen Eingang des Meßverstärkers gelegt.

Zunächst werden die beiden Induktionsspulen mit 1000 Windungen und 28 cm^2 Querschnittsfläche zusammengesteckt und in die Mitte der Feldspule gebracht. Man mißt die Zeit Δt für eine bestimmte Änderung der Erregerstromstärke, z.B. für $\Delta I_{err} = 50 \text{ mA}$ im mittleren Strombereich, (z.B. von 30 mA bis 80 mA und umgekehrt) und beobachtet den Ausschlag des Anzeigeelementes am Meßverstärker.

Verwendet man ein Spiegelgalvanometer, so schaltet man die drei Induktionsspulen bei allen Teilversuchen von Versuch 5 hintereinander und schließt sie an das Galvanometer an. Durch das Hintereinanderschalten der Induktionsspulen vermeidet man eine Widerstandsänderung im Induktionskreis bei Auswechslung der im Feld befindlichen Induktionsspule.

Man findet :

a) Die Induktionsspannung U ist konstant, wenn das Feld sich gleichmäßig ändert, wenn also $\Delta B / \Delta t$ und damit auch $\Delta I / \Delta t$ konstant ist.

b) Die Induktionsspannung U ist proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der magnetischen Induktion $\Delta B / \Delta t$;

$$U \sim \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad \text{oder auch} \quad U \sim \frac{\Delta I_{\text{err}}}{\Delta t} \quad (\text{siehe Abb. 13})$$

Beim Demonstrationsversuch kann man wie folgt vorgehen :

Man regelt am stabilisierten Netzgerät die Anstiegsgeschwindigkeit der Erregerstromstärke so ein, daß ein geeigneter Wert der Induktionsspannung, z.B. 3 mV entsteht und mißt die Zeit Δt für eine Änderung der Erregerstromstärke $\Delta I = 50$ mA. Dann regelt man die Anstiegsgeschwindigkeit so, daß Induktionsspannungen von z.B. 2 mV und 1 mV entstehen und mißt die zugehörigen Zeiten Δt für $\Delta I = 50$ mA. Man findet, daß das Produkt aus Induktionsspannung und gemessener Zeit konstant ist : $U \cdot \Delta t = \text{konstant}$, also

$$U \sim \frac{\Delta I_{\text{err}}}{\Delta t} \sim \frac{\Delta B}{\Delta t} .$$

c) Die Induktionsspannung U ist proportional zur Windungszahl n der Induktionsspule. $U \sim n$. Man bringt, um dies nachzuweisen nur eine der beiden Induktionsspulen mit 1000 Windungen ins Feld (siehe Abb.13).

d) Die Induktionsspannung U ist proportional zur Fläche A der Induktionsspule (A sei senkrecht zum Feld). Um dies nachzuweisen, bringt man die Induktionsspule mit 2000 Windungen und 14 cm^2 Querschnittsfläche ins Feld (siehe Abb.13).

e) Faßt man die magnetische Induktion B und die Fläche A der Induktionsspule ($A \perp \vec{B}$) zum magnetischen Fluß $\Phi = B \cdot A$ zusammen, so ergibt sich aus a)...d)

$$U \sim -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{oder} \quad U = -K \cdot n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

Bestimmt man die Induktionsspannung U mit dem Meßverstärker oder wie in Versuch 4 angegeben mit dem Spiegelgalvanometer in Volt, so läßt sich

$$K = \frac{U}{n \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \Phi}} \quad \text{bestimmen.}$$

Man erhält $K = 1$ (siehe nachfolgende Tabelle)

$$\text{Also ist} \quad U = -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Zahlenbeispiel :

Für die Berechnung der Induktionsspannung gilt

$$U_{\text{ber}} = n \cdot \mu_0 \cdot \frac{w}{\ell} \cdot \frac{\Delta I_{\text{err}}}{\Delta t} \cdot A$$

n Windungszahl, A Fläche der Induktionsspule
 w Windungszahl, ℓ Länge der Feldspule.

Verwendet man stets eine Änderung der Erregerstromstärke $\Delta I_{err} = 50 \text{ mA}$, so gilt für $n = 2000$

$$U_{ber} = 2000 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \cdot \frac{16000}{0,48 \text{ m}} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-2} \text{ A}}{\Delta t} \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$U_{ber} = 1,17 \cdot 10^{-2} Vs \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

Gemessene Spannung $\frac{U_{gem}}{\text{mV}}$	Zeit Δt für $\Delta I_{err} = 50 \text{ mA}$	$\frac{\Delta I_{err}}{\Delta t}$ $\frac{\text{mA}}{\text{s}}$	Berechnete Spannung $\frac{U_{ber}}{\text{mV}}$	$K = \frac{U_{gem}}{U_{ber}}$ v
3,0	3,9	12,8	2,98	1,00
2,5	4,7	10,6	2,49	1,004
2,0	5,8	8,46	2,01	0,995
1,5	7,8	6,41	1,50	1,00
1,0	11,6	4,31	1,00	1,00
0,5	23,3	2,14	0,50	1,00

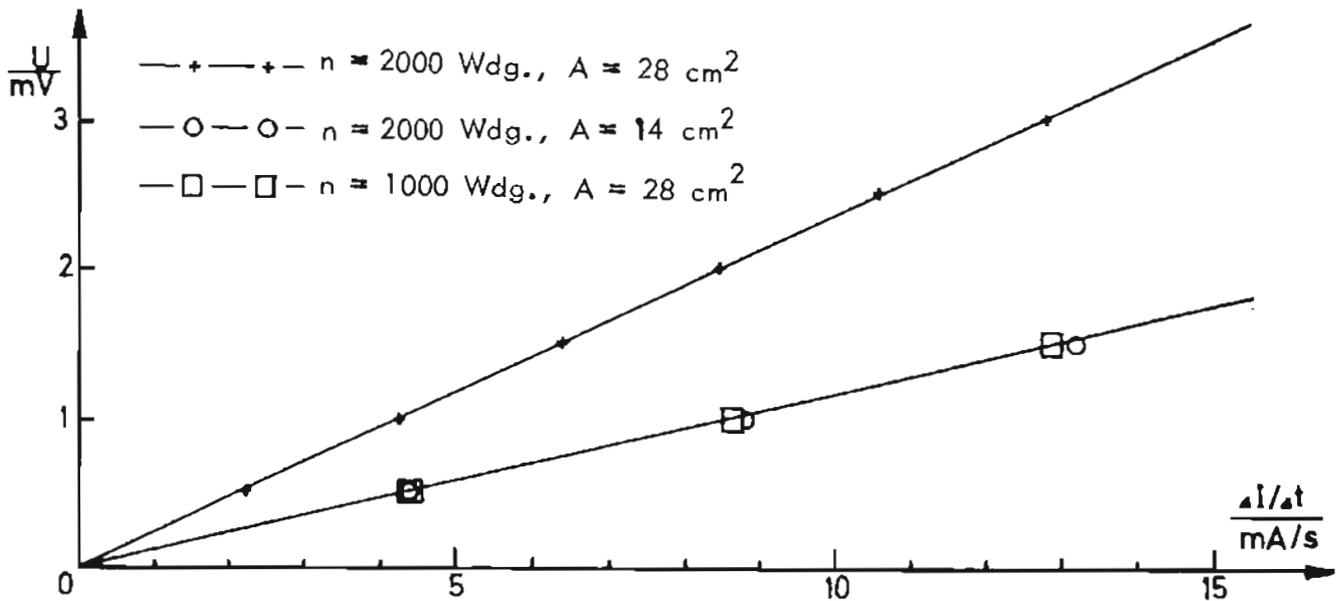


Abb. 13 Abhängigkeit der Induktionsspannung U von der Änderungsgeschwindigkeit der Erregerstromstärke $\Delta I_{err} / \Delta t$, von der Windungszahl n der Induktionsspule und von ihrer Querschnittsfläche A .

Versuch 6 Die Fläche der Induktionsspule steht nicht senkrecht zur Feldrichtung

Benötigte Geräte :

Wie bei Versuch 5, jedoch als Induktionsspule den flachen Drahting Nr.6538 mit 500 Windungen.

Man ersetzt die Induktionsspulen durch den Drahting (Nr. 6538) mit 500 Windungen. Die elektrische Verbindung mit der unterteilten Achse, die als Zuleitung zum Drahting dient, geschieht durch zwei kleine Blechwinkel. Der Meßverstärker bzw. das Spiegelgalvanometer wird an die Buchsen, an denen diese Blechwinkel befestigt werden, angeschlossen. Steckt man den Winkelmesser (Zubehör) auf den Mittelflansch der Spule, so kann man mit der Kurbel des Drahtings als Zeiger die Stellung der Ringfläche von außen genau festlegen. Ist φ der Winkel zwischen der Feldrichtung und der Normale auf der Ringfläche, so ist die Projektion der Ringfläche A auf eine Ebene senkrecht zu den Feldlinien

$$A_s = A \cos \varphi .$$

Mißt man bei gleicher Änderungsgeschwindigkeit der Erregerstromstärke $\Delta I_{\text{err}}/\Delta t$ die Induktionsspannung U für verschiedene Winkel φ , so findet man $U \sim A_s$ oder $U \sim \cos \varphi$. Im Schaubild ergibt sich für die Abhängigkeit der Induktionsspannung vom Winkel φ eine Kosinuslinie (siehe Abb. 14). Sollte die Änderungsgeschwindigkeit der Erregerstromstärke nicht für alle Messungen gleich sein, so erhält man eine Kosinuslinie, wenn man das Produkt $U \cdot \Delta t$ bildet und dieses über dem Winkel φ abträgt, wobei Δt die Zeit für die jeweils gleiche Änderungen der Erregerstromstärke (z.B. für 50 mA) ist.

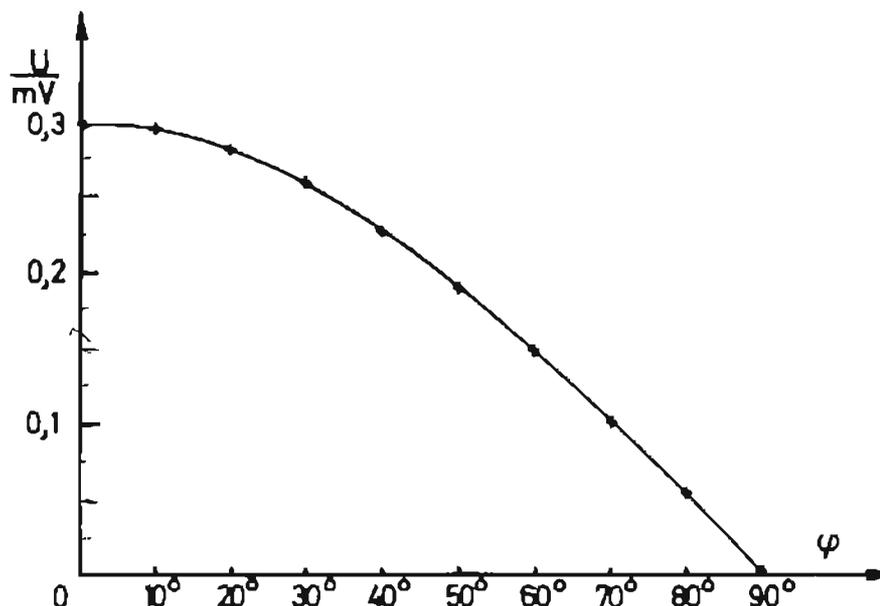


Abb. 14 Proportionalität von Induktionsspannung U und Fläche A_s senkrecht zum Feld

Versuch 7

Rotation der Spule im homogenen Magnetfeld

Wird eine Spule mit n Windungen und der Fläche A in einem homogenen Magnetfeld der magnetischen Induktion B mit gleichbleibender Winkelgeschwindigkeit ω um eine Achse gedreht, die senkrecht zu den Feldlinien steht, und die senkrecht zur Achse der rotierenden Spule verläuft, so entsteht in der Induktionsspule eine sinusförmige Wechselspannung von der Form

$$U = U_m \sin \omega t$$

mit $U_m = n \cdot B \cdot A \cdot \omega$ und $\omega = 2\pi f$

wobei f die Drehfrequenz der rotierenden Spule ist.

Dieser Spannungsverlauf läßt sich auf dem Schirm eines Oszillografen zeigen; die Scheitelspannung kann quantitativ bestimmt werden.

Benötigte Geräte :

Hochohmige Zylinderspule (Nr. 6533)

Stabilisiertes Netzgerät zur Erzeugung des Erregerstroms (Nr. 5224)

Strommeßgerät mit 0,1 A = Meßbereich

oder

Niederohmige Zylinderspule (Nr. 6534)

Gleichstromquelle mit 60...120 V Spannung und 2...4 A Belastbarkeit, gut geglättet

ferner

Drahtring mit 500 Windungen und Schnurscheibe (Nr. 6538)

Regelbarer Experimentiermotor

Elektronenstrahl-Oszillograf (Nr. 7251)

Experimentierleuchte (0304)

Fotodiode (Nr. 7208)

Elektron. Zähler (Nr. 7203)

Verbindungsleitungen, Pappe, Klebeband

Versuchsdurchführung

Die Feldspule wird an die Stromquelle und an das Meßinstrument angeschlossen. Der Drahtring (Nr. 6538) wird in der Spule gelagert. Die Lagerbleche müssen gut angedrückt werden. Vorteilhafterweise bringt man auf diese Bleche einen Tropfen Kontaktflüssigkeit oder etwas Kontaktfett (erhältlich in Radiogeschäften). Der Drahtring wird durch einen weichen Bindfaden mit dem Experimentiermotor angetrieben.

Die entstehende Induktionsspannung wird dem Vertikalverstärkereingang eines Elektronenstrahl-Oszillografen zugeführt. Bei Drehfrequenzen zwischen 500 und 2000 Umdr./Min. lassen sich auf dem Schirm sehr gute Sinuslinien zeigen.

Dieser Versuch läßt sich auch quantitativ auswerten. Man kann leicht zeigen, daß die Scheitelspannung U_m der Drehfrequenz f proportional ist. Entsprechend läßt sich die Proportionalität von Scheitelspannung U_m und magnetischer Induktion B (oder I_{err}) nachweisen.

Die Messung der Scheitelspannung U_m erfolgt mit dem Elektronenstrahl-Oszillograf (Nr. 7251).

Messung der Drehfrequenz

Auf der Schnurscheibe des Drahrings befestigt man eine runde Pappscheibe (\varnothing etwa 9 cm) mit einem Loch in der Nähe des Randes. Durch dieses Loch wird mit einer Experimentierleuchte mit Kondensator die Fotodiode beleuchtet. Die Fotodiode liegt am Eingang des NEVA-Zählers- und Kurzzeitmessers. Dieser ist auf die Zählung von Lichtimpulsen und auf 1 Sekunde Zeitvorwahl geschaltet. So lassen sich die Drehfrequenzen direkt bestimmen.

Die so gemessenen Werte von U_m stimmen sehr gut mit den aus $U_m = n \cdot B \cdot A \cdot \omega$ berechneten überein.

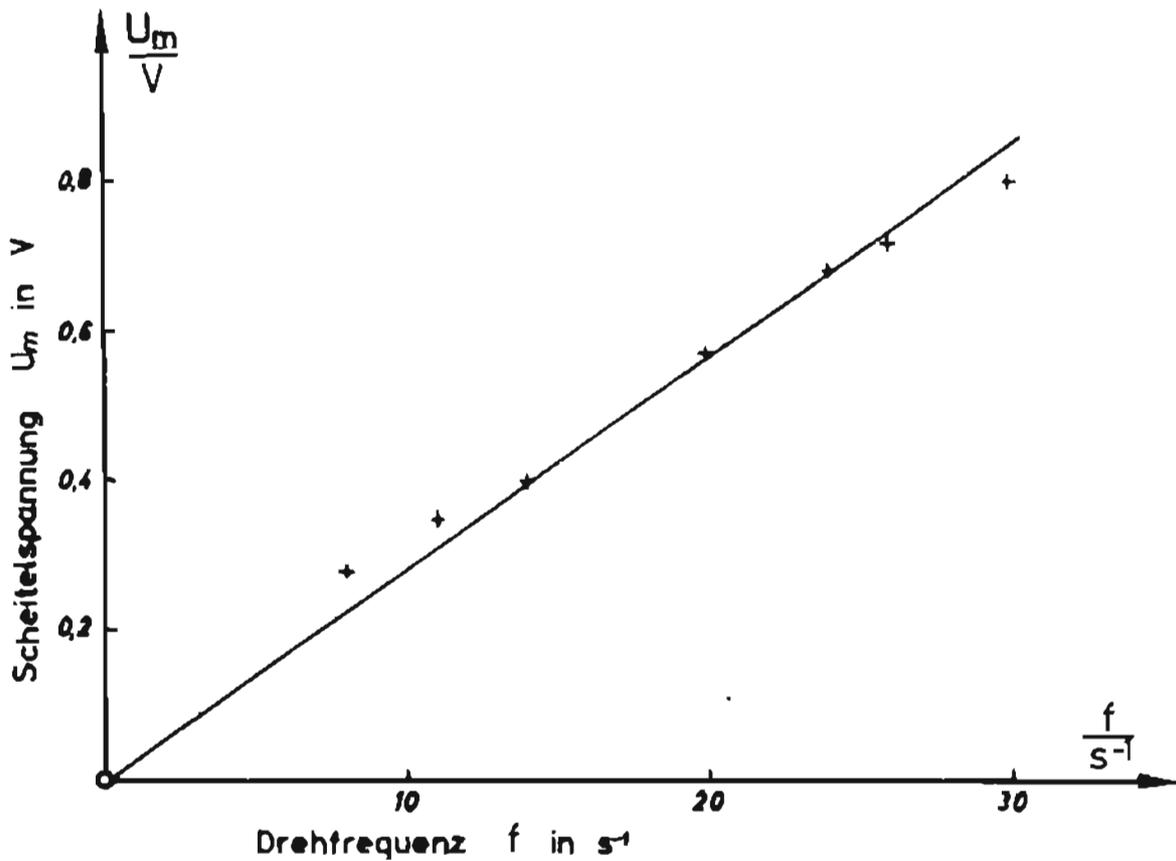


Abb.15. Rotation einer Spule im homogenen Magnetfeld Proportionalität von Scheitelspannung U_m und Drehfrequenz (Die eingezeichnete Gerade stellt die nach $U_m = n \cdot B \cdot A \cdot \omega$ berechneten Werte dar)

Versuch 8 Selbstinduktion

Ändert sich der durch eine Spule fließende Strom I , so ändert sich auch der die n Windungen dieser Spule durchsetzende Induktionsfluß Φ und es entsteht in der Spule eine Selbstinduktionsspannung U_{ind} , die nach dem Lenzschen Gesetz der Änderung der Stromstärke entgegenwirkt. Ist $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ die Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke, so gilt für eine lange eisenfreie Spule

$$U_{\text{ind}} = - \mu_0 \frac{n^2 \cdot A}{\ell} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

oder $U_{\text{ind}} = - L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$, wo $L = \mu_0 \frac{n^2 \cdot A}{\ell}$ die Eigeninduktivität der Spule ist.

Benötigte Geräte :

Hochohmige Zylinderspule (Nr. 6533)
Stabilisiertes Netzgerät (Nr. 5224)
Strommeßinstrument mit 100 mA-Meßbereich
Meßverstärker (Nr. 7212)
oder Spiegelgalvanometer
Stoppuhr, Verbindungsleitungen

Versuchsaufbau und -durchführung

Die beiden Spulenhälften werden zusammengesteckt. Das stabilisierte Netzgerät wird unter Zwischenschaltung des Strommeßinstruments an die **i n n e r e** Spulenwicklung angeschlossen. Die **äußere** Wicklung wird an den Meßverstärker gelegt.

Bei Verwendung eines Spiegelgalvanometers muß gegebenenfalls ein Widerstand parallel geschaltet werden, damit der aperiodische Grenzwiderstand des Galvanometers erreicht wird.

Läßt man nun die Stromstärke in der inneren Wicklung gleichmäßig ansteigen oder abfallen, so mißt man an der äußeren Wicklung eine Spannung, die ebenso groß ist wie die Selbstinduktionsspannung in der inneren Wicklung, da beide Wicklungen gleich viel Windungen haben und da beide von (fast) dem gleichen Induktionsfluß durchsetzt werden.

Man stellt fest, daß die Selbstinduktionsspannung U_{ind} konstant ist, wenn die Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ gleich bleibt. Stellt man verschiedene Werte von $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ ein, so findet man, daß die Induktionsspannung U_{ind} und die Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ proportional sind (siehe Schaubild 16). Die Proportionalitätskonstante ist die Eigeninduktivität L .

Mißt man die Induktionsspannung wie bei Versuch 4 angegeben in Volt, so kann man die Eigeninduktivität

$$L = \frac{U_{\text{ind}}}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} \quad \text{berechnen.}$$

Der so erhaltene Wert stimmt gut mit dem nach $L = \mu_0 \frac{n^2 \cdot A}{\ell}$ berechneten Wert von $L = 0,77 \text{ H}$ überein.

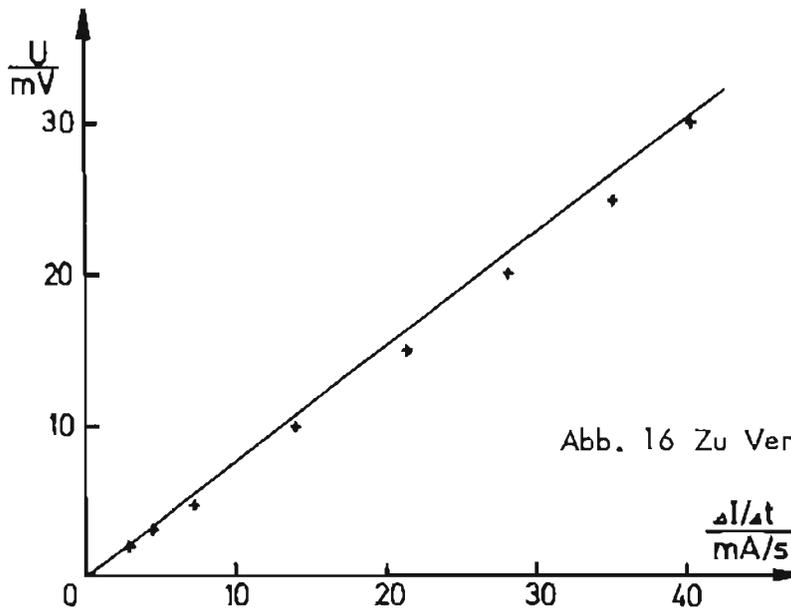


Abb. 16 Zu Versuch 8 Selbstinduktion

Versuch 9 Induktiver Widerstand einer eisenlosen Spule

Benötigte Geräte :

Niederohmige Zylinderspule (Nr. 6534)

Tonfrequenzgenerator (R-C-Generator)

Spannungsmeßinstrument für Wechselspannung 3...6 V

Strommeßinstrument für Wechselstrom 3 mA, 30 mA

Der Widerstand R einer Spule läßt sich nach dem Ohmschen Gesetz bestimmen, indem man die Stromstärke I mißt, die von einer ebenfalls zu messenden Spannung U erzeugt wird und beide Größen dividiert. Verwendet man Gleichspannung, so erhält man auf diese Weise den Ohmschen Widerstand $R_{\Omega} = \frac{U}{I}$.

Verwendet man Wechselspannung, so erhält man den Scheinwiderstand $R_s = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$.

Der Scheinwiderstand R_s ergibt sich aus dem Ohmschen Widerstand R_{Ω} der Spule und ihrem induktiven Widerstand $R_L = \omega L$ durch geometrische Addition

$$R_s = \sqrt{R_{\Omega}^2 + R_L^2}.$$

Für eine lange eisenlose Spule läßt sich die Eigeninduktivität L berechnen aus

$L = \mu_0 \frac{n^2 \cdot A}{l}$, so daß auch der induktive und der Scheinwiderstand berechnet werden können.

Die Eigeninduktivität L der niederohmigen Spule 6534 für beide Lagen errechnet sich zu

$$L = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \cdot \frac{2660^2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} \text{m}^2}{1 \text{ m}}$$

$$L = 4,27 \cdot 10^{-2} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

Bei $f = 1000 \text{ Hz}$ oder $\omega = 6280 \text{ s}^{-1}$ wird dann der induktive Widerstand $R_L = 268 \text{ Ohm}$.

Die beiden hintereinandergeschalteten Lagen der Spule haben den Ohmschen Widerstand $R_{\Omega} = 30 \text{ Ohm}$. Dieser kann gegenüber R_L vernachlässigt werden

(Fehler $< 0,6 \%$), so daß für Frequenzen, die größer als 1000 Hz sind, $R_S \approx R_L$ gesetzt werden kann.

Der Scheinwiderstand wächst mit der Frequenz des Wechselstroms. Dies läßt sich durch Messungen bei verschiedenen Frequenzen bestätigen und quantitativ nachprüfen.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die beiden Lagen der Spule werden hintereinandergeschaltet. Man legt von einem Tonfrequenzgenerator Spannung verschiedener Frequenz an die Spule und mißt die Spannung U_{eff} und die Stromstärke I_{eff} und dividiert die beiden Größen. Zur Messung sollte man zwei Meßinstrumente gleichen Typs verwenden, damit sich ein Frequenzgang beim Dividieren herausheben kann. Die Spannungs- und Frequenzmessung kann mit einem Elektronenstrahl-Oszillograf (Nr.7251) ausgeführt bzw. kontrolliert werden.

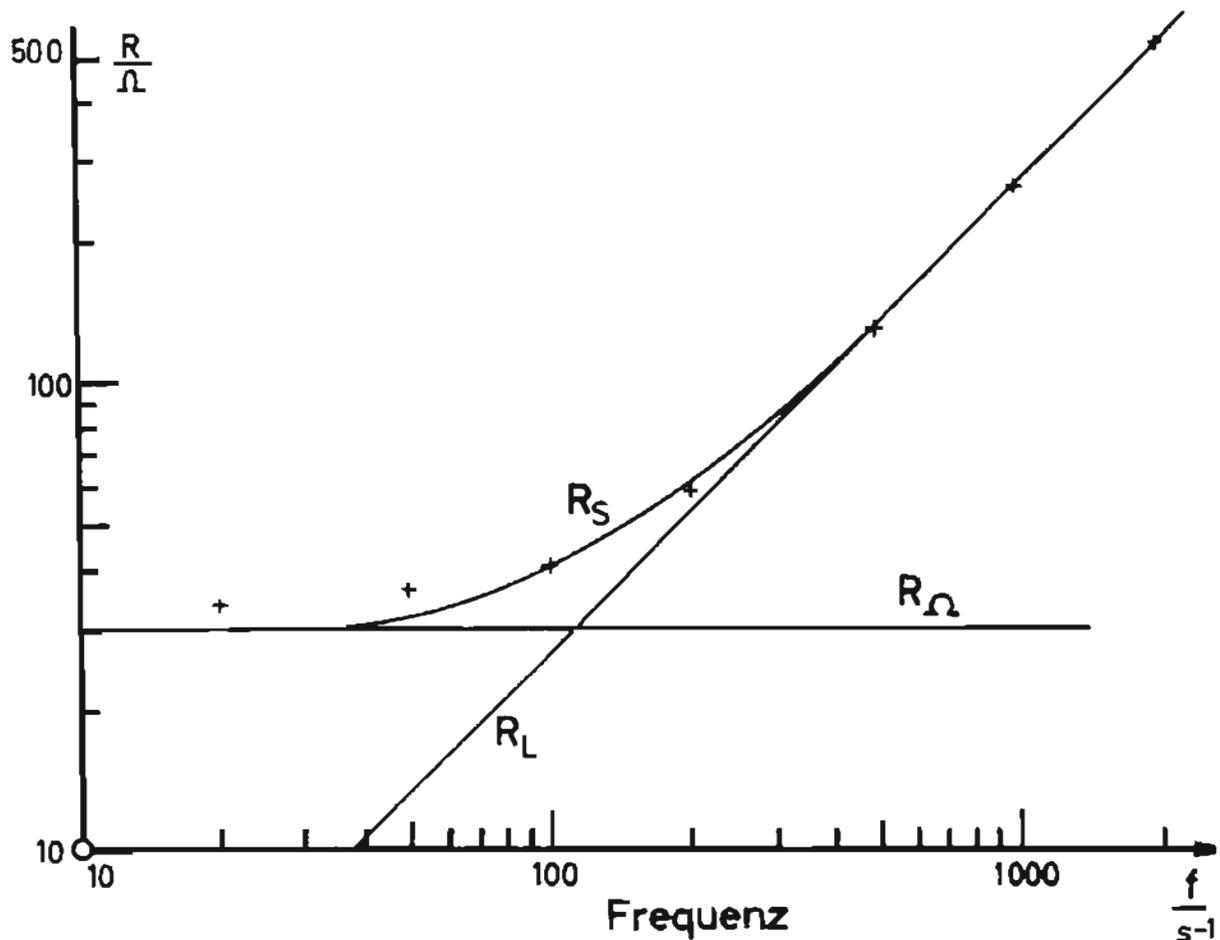


Abb. 17 Scheinwiderstand einer Spule in Abhängigkeit von der Frequenz

Die Meßergebnisse werden am besten in doppelt logarithmischen Koordinaten dargestellt (siehe Abb.17).

Bei höheren Frequenzen können Resonanzerscheinungen auftreten. Siehe dazu M.Kern, Stromresonanz und Eigenkapazität bei einer langen Spule in PRAXIS der Naturwiss. (Physik), 1968, S.242ff.

Versuch 10 Resonanz am Schwingkreis, Thomson - Kirchhoffsche Schwingungs-
gleichung

Benötigte Geräte:

Niederohmige Zylinderspule (Nr. 6534)

Kondensator mit 0,5 μF Kapazität

Induktionsspule mit 1000 Windungen (6536)

Tonfrequenzgenerator (R-C-Oszillator)

Elektronenstrahl-Oszillograf

Spannungsmeßinstrument 6 V

Anstelle der niederohmigen Spule 6534 kann auch die hochohmige Zylinderspule 6533 verwendet werden.

Die beiden Teile der Spule werden zusammengesteckt. Der Kondensator wird einer Lage der Spule parallelgeschaltet. Spule und Kondensator bilden einen Schwingkreis.

Die Induktionsspule (Nr.6536) und das Spannungsmeßinstrument werden an den Tonfrequenzgenerator angeschlossen (niederohmiger Ausgang). Die Induktionsspule wird in die Schwingkreisspule hineingesteckt. Ein Wechselstrom in dieser Erregerspule erzeugt im Schwingkreis durch induktive Kopplung erzwungene Schwingungen. Diese werden von den beiden Belegungen des Kondensators abgenommen und einem Elektronenstrahl-Oszillografen zugeführt. Die Amplitudenhöhe der Schwingungskurven des Oszillografen ist ein Maß für die Kondensatorspannung. (s. Abb. 18)

Wenn man die Zwangsfrequenz am Tonfrequenzgenerator kontinuierlich verändert, so durchlaufen die Schwingungsamplituden eine Resonanzkurve mit einem Resonanzmaximum.

Durch Abmessen der Amplitudenhöhe auf dem Oszillografen bei konstant gehaltener Spannung am Tonfrequenzgenerator läßt sich bequem eine Resonanzkurve aufnehmen, die die Abhängigkeit der Schwingkreisspannung von der Zwangsfrequenz zeigt. (s. Abb. 19)

Es lassen sich u.U. auch Nebenmaxima bzw. Überlagerungen von mehreren Schwingungen auf dem Oszillografen beobachten, die bei Vielfachen oder Teilen der Resonanzfrequenz liegen.

Die Resonanzfrequenz errechnet man aus der Thomson - Kirchhoffschen Schwingungsgleichung: $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$

Für eine Lage der niederohmigen Spule ist $L = 1,07 \cdot 10^{-2} \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}}$

Mit $C = 0,5 \mu\text{F}$ erhält man $f_{\text{res}} = 2180 \text{ Hz}$. Am Tonfrequenzgenerator wurde abgelesen $f_{\text{res}} \approx 2250 \text{ Hz}$.

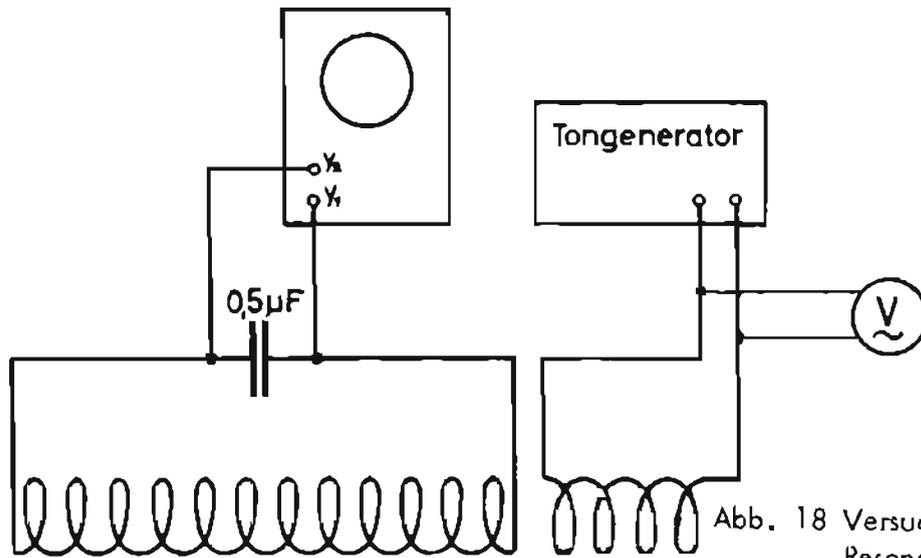


Abb. 18 Versuchsanordnung zur Resonanz am Schwingkreis

Frequenz f in Hz	Schwingkreis- spannung in Skt. am Oszillogr.	Spannung am R-C-Generator
500	4,0	2,0 V
1000	5,0	
2000	14,0	
2250	20,0 (Max.)	
2500	12,7	
3000	5,0	
3500	3,0	
4000	2,1	

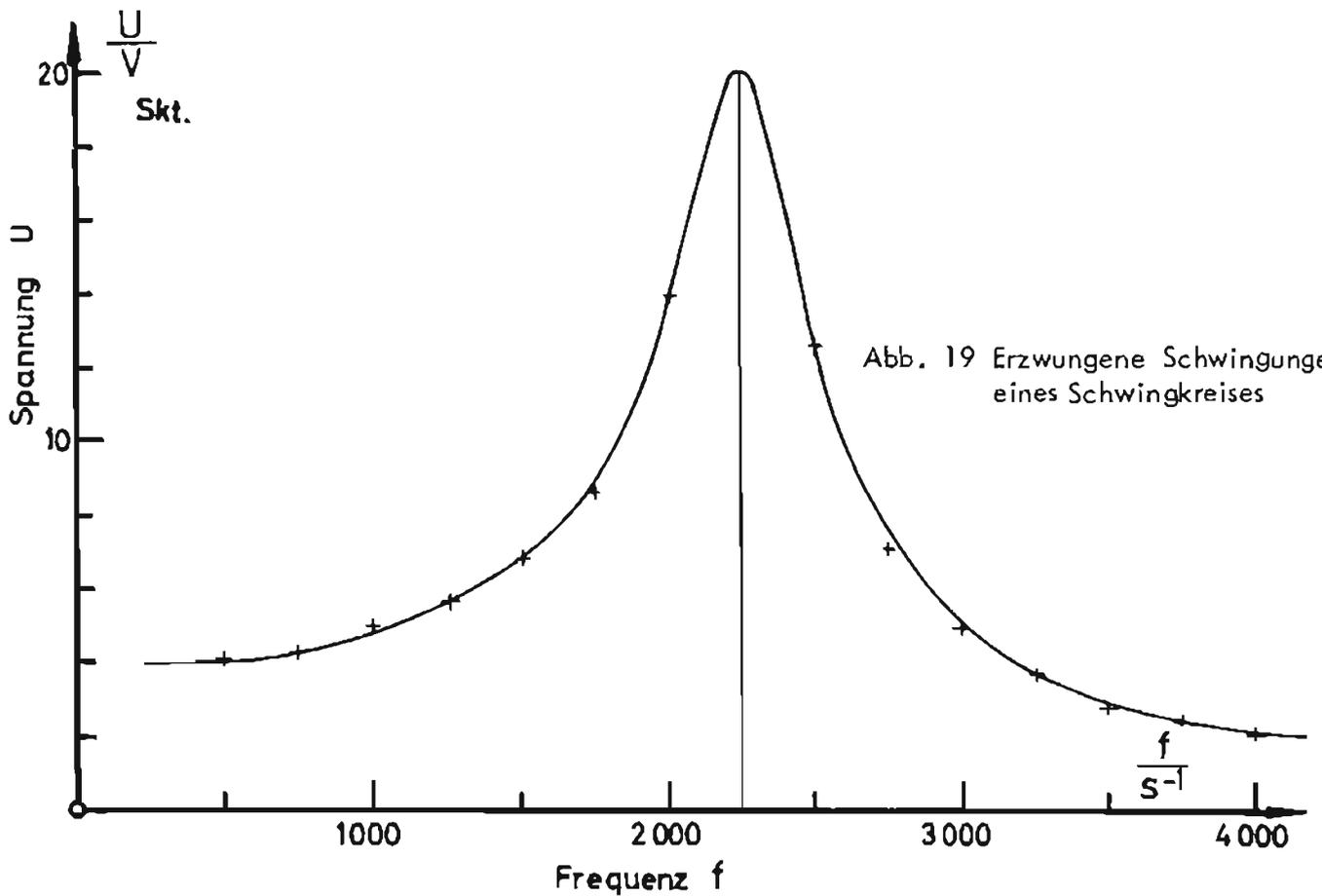


Abb. 19 Erzwungene Schwingungen eines Schwingkreises

Versuch 11 Gedämpfte Eigenschwingungen eines Schwingkreises

Benötigte Geräte:

Niederohmige Zylinderspule (Nr. 6534)

Kondensator $0,5 \mu\text{F}$

Elektronenstrahl-Oszillograf

Induktionsspule 1000 Windungen (6536)

Trennkondensator $5 \text{ nF} \dots 10 \text{ nF}$

Verbindungsleitungen

Die beiden Teile der Spule 6534 werden zusammengesteckt. Der Kondensator wird einer Windungslage parallel geschaltet. Die Induktionsspule wird in die Schwingkreisspule gesteckt. Ihre Enden werden mit der Sägezahnspannung und dem Gehäuse des Oszillografen über einen Kondensator mit $5 \dots 10 \text{ nF}$ Kapazität (zur Blockierung von Gleichspannungen) verbunden (s. Abb. 20) Beim Zurückkippen der Sägezahnspannung erhält die Erregerspule einen kurzen Stromstoß, wodurch der Schwingkreiskondensator durch Induktion aufgeladen wird. Anschließend schwingt der Schwingkreis in seiner Eigenfrequenz gedämpft aus bis ein neuer Spannungstoß erfolgt. Das Bild der gedämpften Schwingung zeigt sich auf dem Oszillografenschirm.

Wenn man Kippfrequenz und Horizontaldehnung des Oszillografen gegenüber Versuch 9 nicht verändert hat, so findet man, daß die nunmehrige Eigenfrequenz mit der Resonanzfrequenz des Versuchs 10 praktisch übereinstimmt. Die Perioden der beiden Schwingungskurven sind gleich. Dieser Versuch entspricht dem Anschlagen einer Glocke, die dann ungestört ausschwingt.

Bemerkung: Die Anregung des Schwingkreises kann auch direkt erfolgen, indem man den Schwingkreiskondensator an die Kippspannung legt (unter Zwischenschaltung eines Trennkondensators).

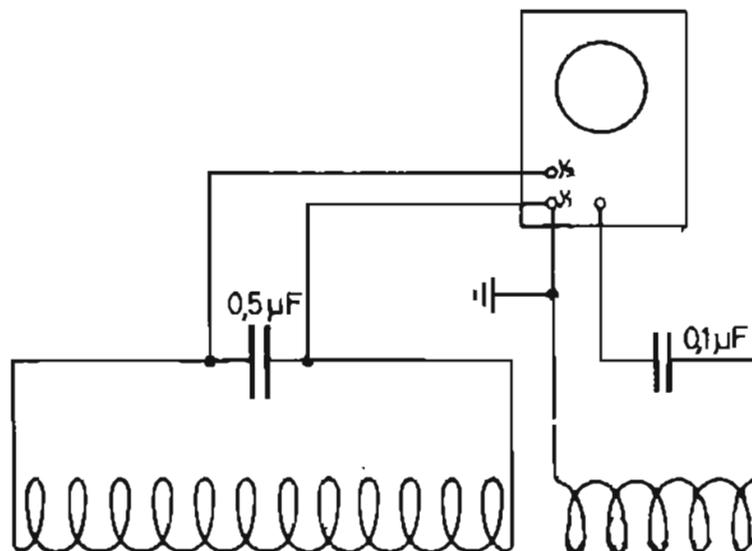


Abb. 20 Versuchsanordnung zur Erzeugung gedämpfter Schwingungen

Versuch 12

Ungedämpfte Eigenschwingungen eines Schwingkreises, Rückkopplungsschaltung

Benötigte Geräte:

Niederohmige Zylinderspule (Nr. 6534)

Kondensator mit $0,5 \mu\text{F}$ Kapazität

oder

2 Kondensatoren mit je $1 \mu\text{F}$ Kapazität

Triode mit Heizstromquelle und Anodenspannungsquelle

Elektronenstrahl-Oszillograf

Verbindungsleitungen

Soll der Schwingkreis in seiner Eigenfrequenz ungedämpft schwingen, so muß ihm durch Selbststeuerung immer im richtigen Augenblick aus einer Energiequelle Energie zugeführt werden, um Verluste durch Wärme und Strahlung auszugleichen.

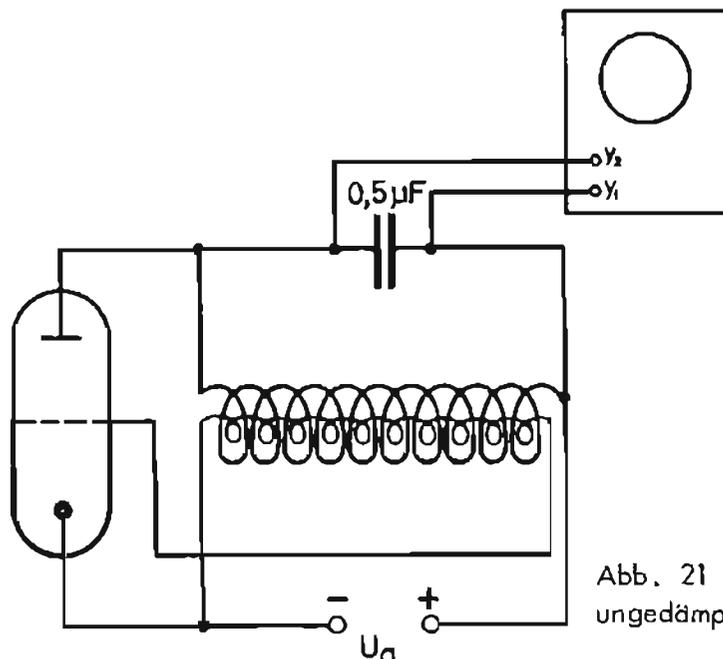


Abb. 21 Versuchsanordnung zur Erzeugung ungedämpfter Schwingung.

Dies geschieht z.B. durch die Meißnersche Rückkopplungsschaltung.

Die zweite bisher unbenutzte Lage der Spule 6534 wird als Kopplungsspule zwischen Gitter und Kathode der Triode gelegt. Der Schwingkreis wird durch Parallelschalten der anderen Lage und des Kondensators mit $0,5 \mu\text{F}$ hergestellt. Anstelle des Kondensators mit $0,5 \mu\text{F}$ verwendet man, wenn man die Thomson-Gleichung überprüfen will, zwei hintereinandergeschaltete Kondensatoren mit je $1 \mu\text{F}$ Kapazität. Mit einer Anodenspannungsquelle wird die Schaltung gemäß Abb. 21 vervollständigt.

Auf dem Schirm des Oszillografen sieht man das Bild einer ungedämpften Schwingung, deren Frequenz dieselbe ist wie bei den Versuchen 10 und 11. Wenn der Oszillograf nicht verstellt wurde, haben alle Schwingungskurven gleiche Perioden.

Schaltet man die beiden Kondensatoren mit je $1 \mu\text{F}$ parallel statt hintereinander, so wird die Periode der Schwingungskurve doppelt so groß. Nach der Thomsonschen Schwingungsgleichung ergibt sich bei 4-facher Kapazität die 2-fache Schwingungsdauer.

Polt man die Anschlüsse der Kopplungsspule um, so tritt keine Entdämpfung, sondern eine Gegenkopplung und damit eine Vernichtung der Schwingungen ein.

Versuch 13Langsame Rotation einer Spule im homogenen Magnetfeld
(Ergänzung zu Versuch 7)

Bei Versuch 7 erfolgte die Rotation der Spule im Magnetfeld so schnell, daß zur Aufzeichnung der entstehenden Wechselspannung ein Elektronenstrahl-oszillograf nötig war. Im Gegensatz dazu erfolgt die Rotation der Spule in diesem Versuch so langsam, daß man die zu einem bestimmten Drehwinkel oder Phasenwinkel gehörige Induktionsspannung direkt messen kann.

Man kann so die Abhängigkeit der Induktionsspannung U vom Phasenwinkel φ , bzw. von der Zeit t durch Messungen gewinnen und in einem Spannungs-Zeit-Schaubild darstellen.

Es gilt

$$U = U_m \sin \varphi$$

bzw.
$$U = U_m \sin \omega t$$

mit
$$U_m = n \cdot B \cdot A \cdot \omega .$$

Dabei ist

$$\text{Phasenwinkel } \varphi = \frac{2 \pi}{T} \cdot t$$

$$\text{Kreisfrequenz } \omega = \frac{2 \pi}{T} = 2 \pi f$$

T Umdrehungsdauer, f Frequenz des Drahttringes

A Fläche, n Windungszahl des Drahttrings

$$A = 21,5 \text{ cm}^2; \quad n = 500$$

B magnetische Flußdichte der Feldspule

Benötigte Geräte :

Hochohmige Zylinderspule (6533)

Stabilisiertes Netzgerät zur Erzeugung des Erregerstroms (5224)

Strommeßinstrument 0,1 A -

oder

Niederohmige Zylinderspule (6534)

Gleichstromquelle mit 60 ... 120 V und 2 ... 4 A Belastbarkeit

Strommeßinstrument 2 ... 4 A -

ferner

Drahttring mit Achsen, Schnurrolle und Kurbel (6538)

Synchronmotor (5407)

Meßverstärker (7212)

Spannungsmeßinstrument $\pm 5 \text{ V}$ - , Nullpunkt in der Mitte

Aufsteckbarer Winkelmesser (6545)

Halogenlampe (3002), Umlenkspiegel,

Verbindungsleitungen, Zwirnsfaden,

Versuchsdurchführung : Die Feldspule wird unter Zwischenschaltung des Strommeßinstruments an die Stromquelle angeschlossen. Die beiden Wicklungen sind hintereinandergeschaltet. Der mitgelieferte Winkelmesser wird auf den Flansch zwischen den beiden Spulenhälften aufgesteckt. Der Drahttring wird in der Mitte der Feldspule gelagert. Die Lagerbleche müssen gut angedrückt werden.

Der Antrieb des Drahrings erfolgt mit einer der Schnurscheiben des Synchronmotors durch einen Zwirnsfaden. Die Umdrehungsdauern des Drahrings betragen

$$\begin{aligned} T_1 &\approx 94 \text{ s} && \text{(kleine Schnurscheibe)} \\ T_2 &\approx 47 \text{ s} && \text{(mittlere Schnurscheibe)} \\ T_3 &\approx 23,5 \text{ s} && \text{(große Schnurscheibe)} \end{aligned}$$

Dem entsprechen die Winkelgeschwindigkeiten, bzw. Kreisfrequenzen

$$\begin{aligned} \omega_1 &\approx 0,067 \text{ s}^{-1} && \text{(kleine Schnurscheibe)} \\ \omega_2 &\approx 0,133 \text{ s}^{-1} && \text{(mittlere Schnurscheibe)} \\ \omega_3 &\approx 0,267 \text{ s}^{-1} && \text{(große Schnurscheibe)} \end{aligned}$$

Die Induktionsspannung wird mit dem Meßverstärker gemessen (Meßbereich $100 \mu\text{V}$). Steht ein Spannungsmeßinstrument mit $\pm 5 \text{ V}$ Meßbereich, Nullpunkt in der Mitte, zur Verfügung, so kann man die Änderung der Spannung während einer vollen Umdrehung des Drahrings beobachten. Die Erregerstromstärke der Feldspule wird so eingestellt, daß der Meßbereich des Anzeigeinstrumentes nicht überschritten wird. Vor Beginn einer Messung wird der Nullpunkt des Meßverstärkers mit dem Drehknopf "OP" genau eingestellt. Bei einem 3 V - Spannungsmesser kann man mit diesem Drehknopf den Nullpunkt des Instruments in die Skalenmitte schieben. Bei Instrumenten mit Nullpunkt links schaltet man bei den Nulldurchgängen der Spannung das Anzeigeinstrument mit dem Knebelschalter (rechts oben) um.

Will man eine U, φ - Tabelle aufstellen, so beobachtet ein Helfer die Kurbel des Drahrings (Blickrichtung längs der Achse des Drahrings) und gibt an, wann die Spannung abgelesen werden soll. Bei der kleinsten Drehgeschwindigkeit kann man z.B. mit 30° - Abständen ablesen (also bei $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots, 10^\circ, 40^\circ, \dots, 20^\circ, 50^\circ, \dots$). Bei den größeren Geschwindigkeiten sind 60° - oder 90° - Abstände empfehlenswert.

Die Abb. 23 zeigt die Ergebnisse einer Meßreihe. Die eingezeichneten Sinuslinien stellen die Schaubilder der Gleichungen $U = U_m \sin \omega t$ dar, wobei U_m wie oben angegeben berechnet wurde.

Als Demonstrationsversuch eignet sich folgende Anordnung : Man rückt die Feldspule so an den Rand des Tisches, daß die Kurbel des Drahrings über die Tischkante hinausragt. Die Bewegung der Kurbel wird mit der Halogenlampe in Schattenprojektion an die Decke projiziert. Die Halogenlampe wird dazu möglichst tief unten am Fußboden aufgestellt. Mit einem Umlenkspiegel kann man nun den Schatten der Kurbel auf die Skala des Spannungsanzeigeinstrumentes werfen, so daß man Schatten und Zeiger gleichzeitig beobachten kann. Das Anzeigeinstrument wird direkt hinter der Feldspule in geeigneter Höhe und Entfernung aufgestellt. Durch Verändern der Erregerstromstärke läßt sich die Amplitude der Zeigerschwingung des Anzeigeinstrumentes der Schattenamplitude der Kurbelbewegung angleichen. Abgesehen von einem leichten Nachhinken des Anzeigeinstrumentes laufen Zeiger und Schatten synchron. Das Spannungs-Zeit-Gesetz der Induktionsspannung stimmt demnach mit dem Weg-Zeit-Gesetz der Parallelprojektion einer gleichförmigen Kreisbewegung überein. Beides sind Sinusfunktionen.

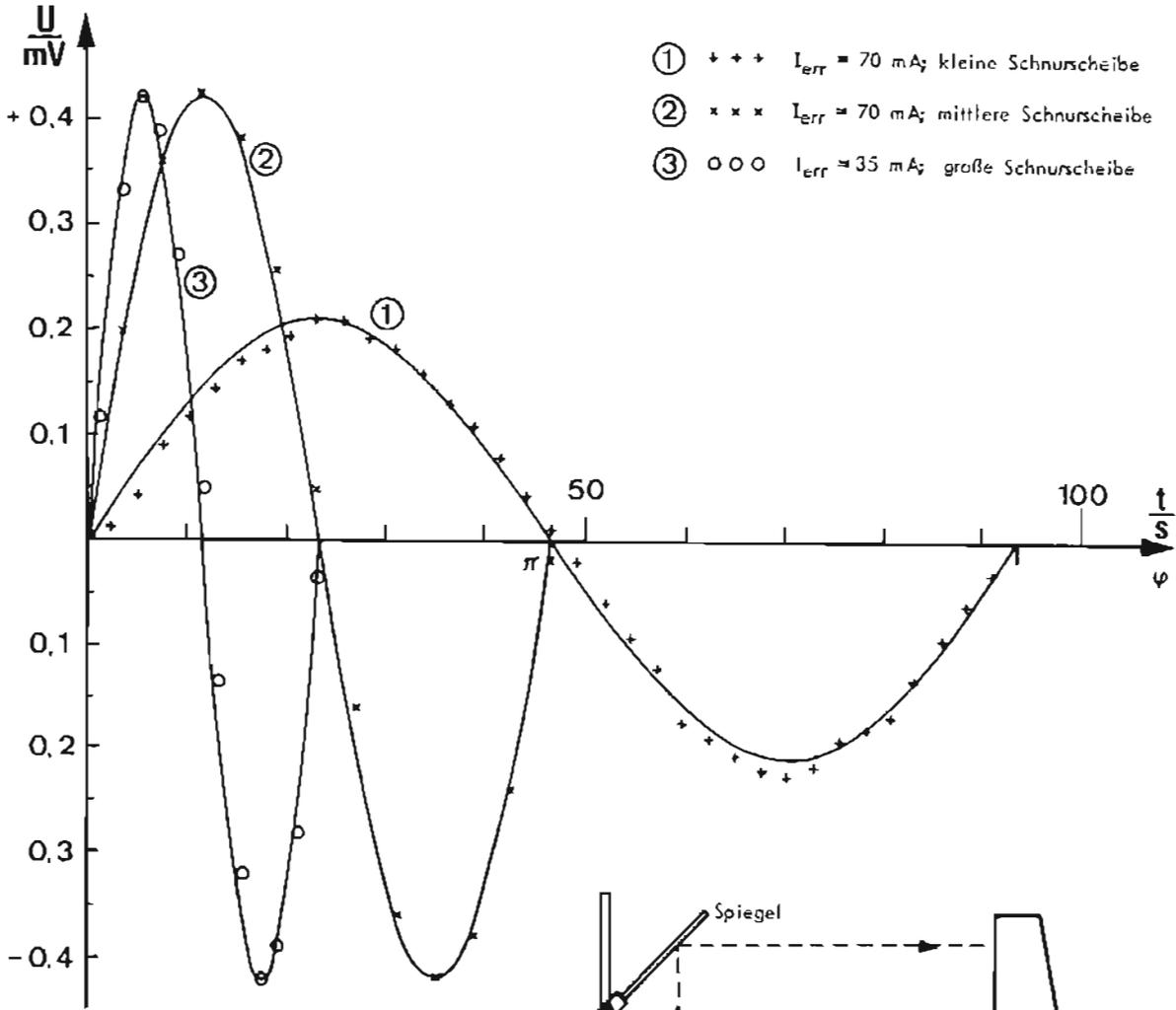


Abb. 23 Schaubild der Gleichung $U = U_m \sin \omega t$

Abb. 24 Anordnung für Schattenprojektion

