

# Faradays Gesetz



## Zielsetzung:

Experimentelle Studien zu Faradays Gesetz der Induktion.

Durch Messungen der elektromotorischen Kraft (EMK), also der Spannung, die von einem pendelnden Stabmagneten in einer Spule induziert wird, wird Faradays Gesetz der Induktion untersucht. Dabei soll die zeitliche Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte (infolge des sich bewegenden Magneten) und der EMK, die in der Spule induziert wird, bestimmt werden. Die Frage ist wie die EMK vom zeitlichen Verlauf des magnetischen Feldflusses abhängt.

## Theoretisches Modell

**Faradays Gesetz** sagt aus, dass die elektromotorische Kraft, die in einem geschlossenen Stromkreis durch ein Magnetfeld induziert wird, direkt proportional zu der Geschwindigkeit ist, mit der der magnetische Feldfluss den Stromkreis durchdringt.

Die EMK, die im Stromkreis induziert ist, ist gleich der negativen Ableitung des magnetischen Feldflusses durch den Stromkreis (Gleichung 1)

$$E = \frac{-d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

Das Minuszeichen im Faradayschen Gesetz resultiert aus der Richtung der Induktionsspannung. Sie lässt sich aus einem physikalischen Prinzip herleiten, das unter dem Namen **Lenz'sches Gesetz** bekannt ist:

**Die Induktionsspannung und der Strom, der sie hervorruft, sind stets so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenwirkt.**

Der Wechsel des magnetischen Feldflusses könnte, bei dem Wechsel von mindestens einem seiner Faktoren, so sein (Gleichung 2):  $\Phi = \vec{B} * \vec{S} = B * S \cos \angle(\vec{B}, \vec{S})$  (2)

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} B * S \cos \angle(\vec{B}, \vec{S}) \quad (3)$$

Die EMK kann auf verschiedene Art und Weise induziert werden. Typische Beispiele sind: Ein wechselndes magnetisches Feld oder eine relative Bewegung der magnetischen Quelle. Der Induktionseffekt ist - in diesem Fall hervorgerufen durch die Rotationsbewegung einer Schleife im Magnetfeld - das funktionale Prinzip der elektrischen Generatoren.

Eine detaillierte Betrachtung der induzierten EMK für das aktuelle Experiment finden Sie [hier](#).

## Das magnetische Feld eines Stabmagneten

Die räumliche Anordnung der magnetischen Feldlinien, die von einem Stabmagneten erzeugt werden, ist ähnlich der, die an einer stromdurchflossenen Spule entsteht. - siehe Bild 1 und 2. Insbesondere die magnetische Flussdichte des Stabmagneten kann mit Hilfe des Feldes dargestellt werden. Das Feld wird von einem magnetischen Dipol erzeugt und von dem Dipolmoment  $\mu$  charakterisiert. Die magnetische Flussdichte (magnetische Induktion) entlang der Achse des Magneten bei einem Abstand  $y$  von seinem Neutralpunkt, wird definiert durch:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi y^3} \vec{\mu} = C \frac{1}{y^3} \quad (4)$$

Für die magnetische Flussdichte auf der Spulenachse gilt bei  $N$  Windungen mit dem Radius  $r$  und dem Strom  $i$

folgende Gleichung: 
$$B_y = \frac{\mu_0 N i r^2}{2(y^2 + r^2)^{3/2}} \quad (5)$$

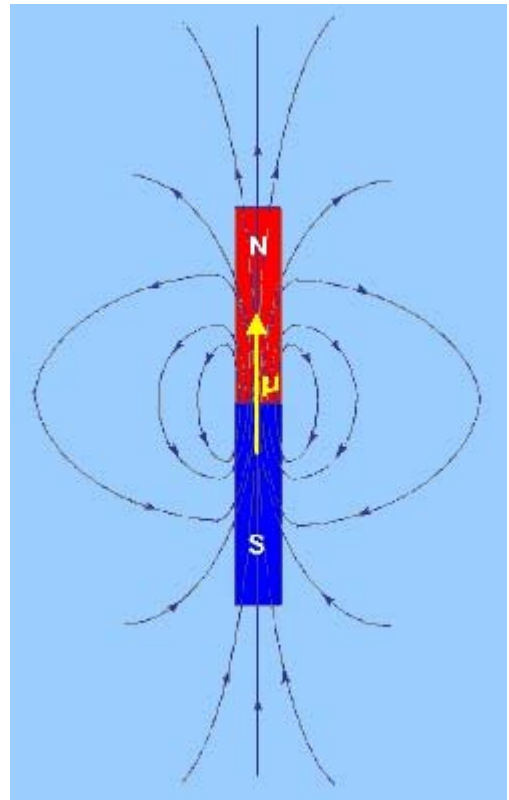
sie definiert die magnetischen Dipole der Spule als:

$$|\vec{\mu}| = N i r^2 \quad (6)$$

Für die vom Zentrum der Spule weit entfernt liegenden Punkte, an denen gilt  $y > r$ , wird der Ausdruck für die

magnetische Flussdichte: 
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \vec{\mu}}{2\pi y^3} \quad (7)$$

was dem Ergebnis für den Stabmagneten gleicht (Gleichung 4)



### Das magnetische Feld in Folge des schwingenden Stabmagneten

Die magnetische Flussdichte an einem bestimmten Punkt im Raum ändert sich wegen des sich bewegenden Stabmagneten. Sie folgt also dem Takt, mit der sich die Entfernung des Magneten zu diesem Punkt ändert.

Abbildung 3 zeigt die Situation in dem vorgestellten Experiment.

Hier gilt

$D$  - ist die Entfernung von der Spule zur Ruheposition des Magneten,

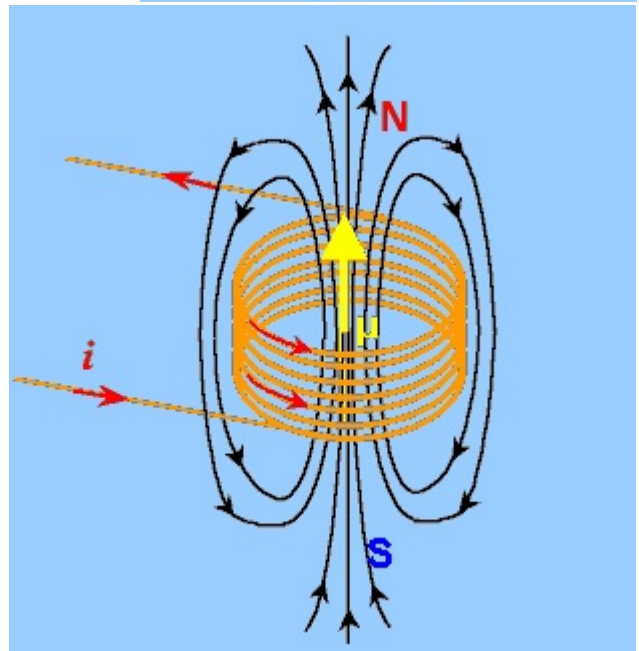
$A$  - ist die Amplitude der Magnetschwingungen,

$\omega$  - ist die Winkelfrequenz der Schwingungen,

$\varphi$  - ist die Anfangsphase der Schwingungen,

$y$  - ist die Distanz zu der Spule von der gegenwärtigen Position des Magneten, gegeben durch:

$$y = D + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$



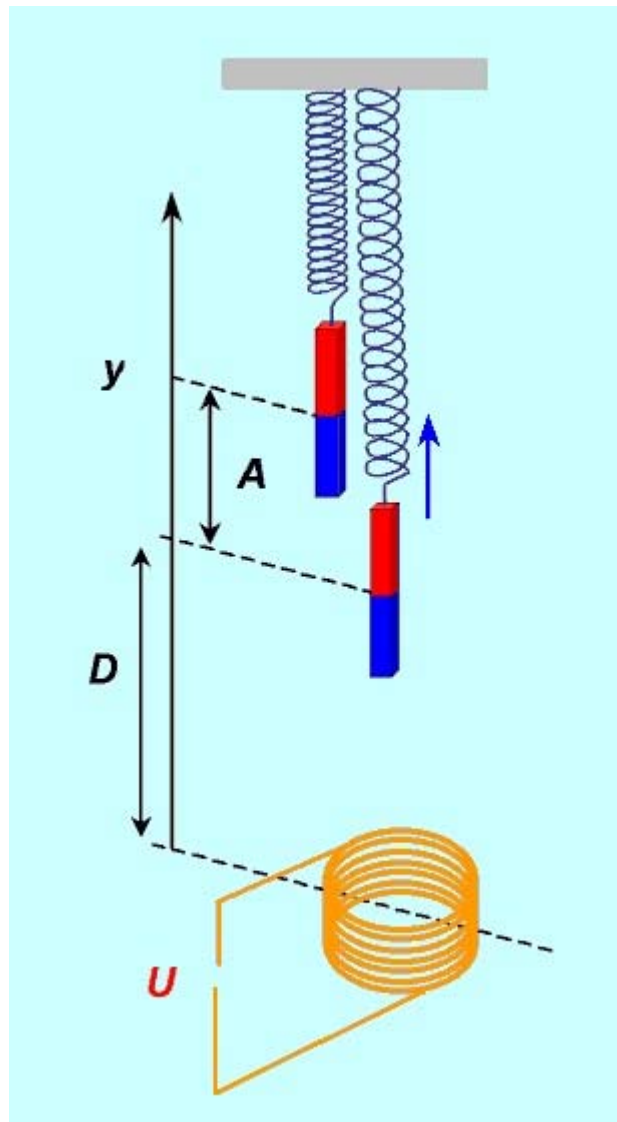


Abb. 3.

Das magnetische Feld im Zentrum der Spule, wird definiert durch (vergleiche Gleichung 4) :

$$B_y = C \frac{1}{(D + A * \sin(\omega t + \varphi))^3} \quad (9)$$

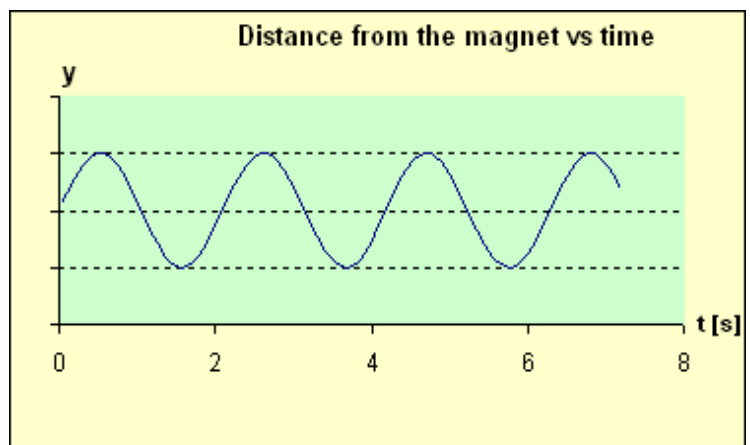


Abb. 4.

Abbildung 5 zeigt die Flussdichte vs Zeit-Abhängigkeit.

Die Zeiträte der magnetischen Feldinduktion, an der Position der Spule, kann infolge des schwingenden Magnetes, analytisch aus der Gleichung 9 ermittelt werden - da  $dB/dt$  ist:

$$\frac{dB}{dt} = C \frac{-3 A \omega \cos(\omega t + \varphi)}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^4} \quad (10)$$

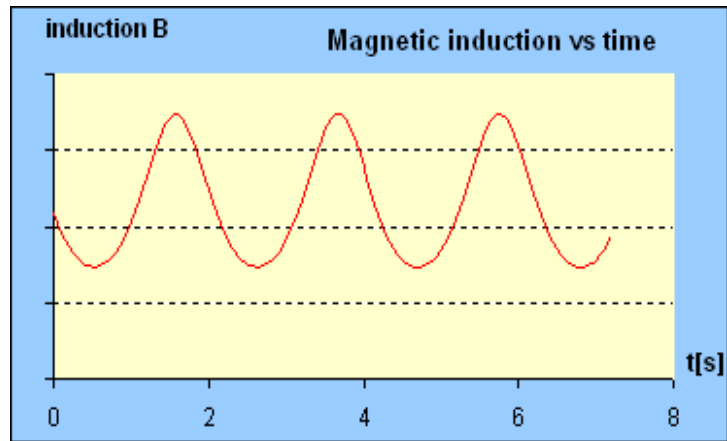


Abb. 5.

Abbildung 6 zeigt die  $dB/dt$  vs Zeit-Abhängigkeit.

Wir gehen davon aus, dass die Anordnung und geometrischen Parameter der Spule in der Beobachtungszeit nicht wechseln. Der magnetische Feldfluss durch die Spule wird in dieser Situation mit der Gleichung beschrieben:

$$\Phi = NS * C \frac{1}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^3} \quad (11)$$

wobei:

**N** - ist die Anzahl der Windungen;

**S** - ist der Kreuzungsbereich bei einer einzigen Windung der Spule.

**Anmerkung:**

Die Gleichung 11 basiert auf der einfachen Annahme, dass das magnetische Feld für alle Spulenwicklungen dasselbe ist.

Daher ist die Zeiträte der Wechsel des magnetischen Feldflusses durch die Spule wie folgt:

$$\frac{d\Phi}{dt} = NS * C \frac{-3 A \omega \cos(\omega t + \varphi)}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^4} \quad (12)$$

und die Grafik  $\frac{d\Phi}{dt}$  vs Zeit ist ähnlich zu der in Abbildung 6 vorgestellten.

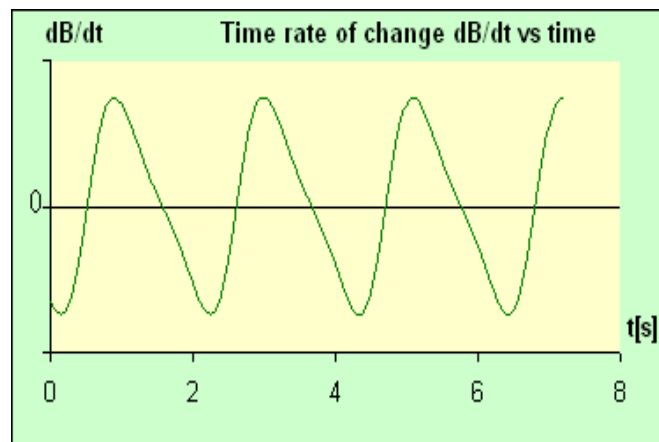


Abb. 6.

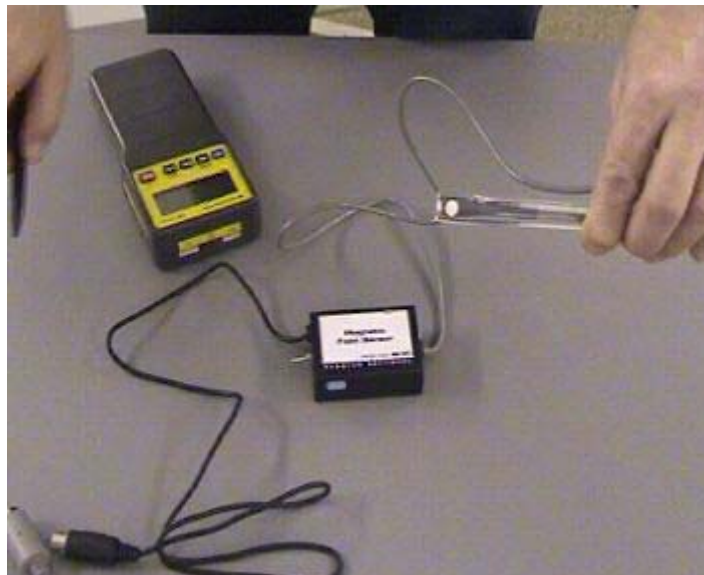
## Versuchsanordnung für die Untersuchung von Faradays Gesetz



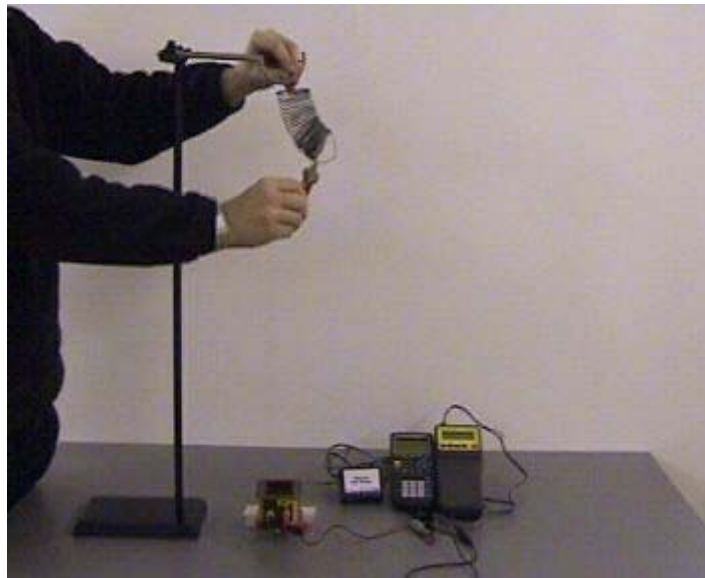
Die Untersuchung des elektromagnetischen Induktions-Phänomens kann mit einem einfachen Versuchsaufbau durchgeführt werden. Er besteht aus:

- Spule , z.B. 6500 Windungen (Drahtdurchmesser = 0,2 mm), Spulendurchmesser 5 cm
- Labor-Magnetstab (10 cm lang)
- Feder (30 cm lang – im Gleichgewicht), die zusammen mit dem Magneten einen Oszillator (Schwinger) mit einer Periode von ungefähr 1 Sek bildet.
- Labor-Stativ (ca. 1 m hoch).
- Laborrechner CBL oder CBL2 (siehe Foto)

Magnetischer Feldsensor für CBL™ (Vernier MG-DIN or MG-BTA)



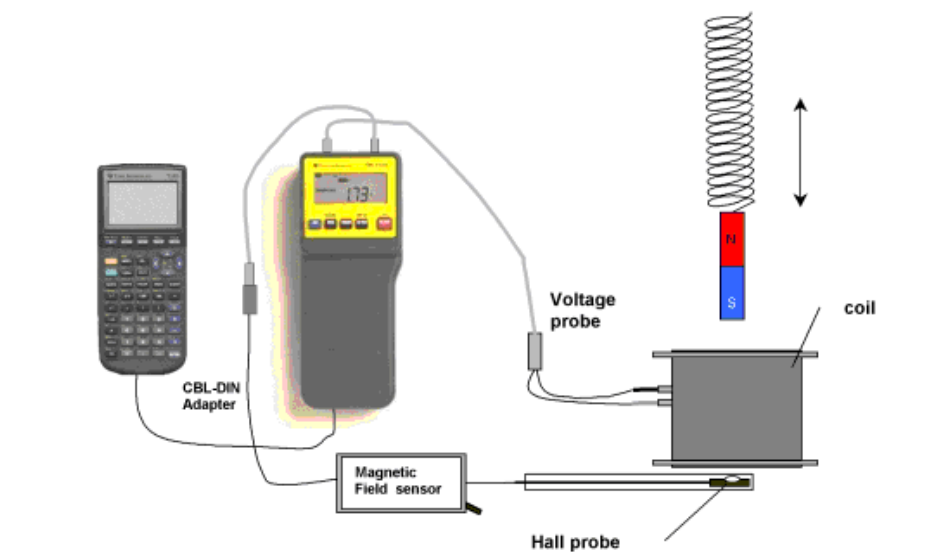
- CBL - DIN Adapter (nur für MG-DIN ) - Bild
- Spannungssonde (Standard CBL) - Bild oder Film



- Grafikrechner TI83, TI83 Plus, TI 83 Plus SE, TI89, TI92, TI92 Plus, TI Voyage 200
- Verbindungs-Kabel (Standard)
- Programm: Physik (die rechnerrelevante Version ):

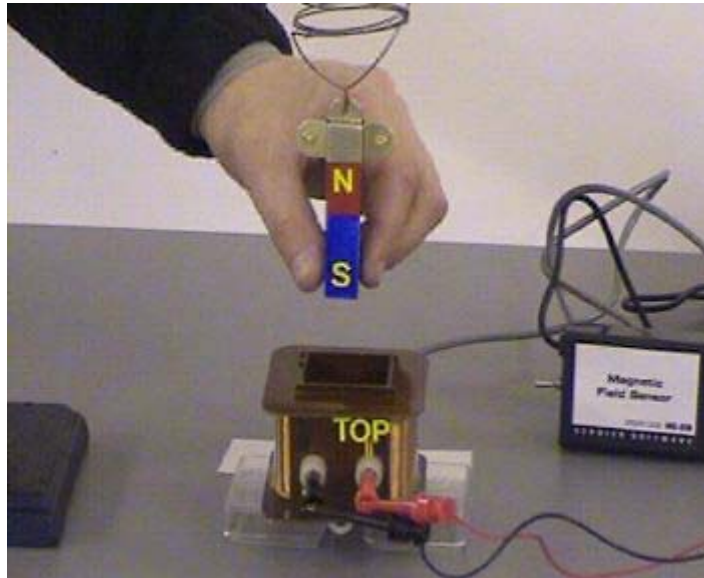
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/83/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/83plus/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/89/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/92/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/92plus/>

- TI-GRAPH LINK TM (optional) Kabel und Software
- PC mit der TI Connect™ -Software (optional) - Beschreibung:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/software.html> und  
 Download:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/download.html>



## Praktische Anmerkungen zum Versuchsaufbau

- Der an einer Feder hängende Stabmagnet schwingt entlang seiner Längsachse frei auf und ab. Sie sollte mit der Achse der Laborspule übereinstimmen. Der südliche Magnetpol des Magneten zeigt in Richtung der Spule. Der minimale Abstand von dem oberen Ende der Spule zu dem Magneten sollte während der Bewegung 3 cm nicht unterschreiten, die Amplitude ungefähr 10 - 15 cm und die Periode etwa 1-3 Sek betragen.



- Die magnetische Feldsonde wird unterhalb des Zentrums der Spule fest angebracht (z.B. mit einem Klebeband). Die Aufschrift zeigt nach oben in Richtung des südlichen Magnetpols.
- Der Schalter der magnetischen Feldsonde wird auf "Low" gestellt.
- Die magnetische Feldsonde ist über den CBL-DIN-Adapter mit dem Kanal CH1 der CBL-Einheit verbunden.
- Die Spannungssonde wird an Kanal CH2 der CBL-Einheit angeschlossen.

## Datenerfassung (TI 83, Programm PHYSIK)

In dem Experiment durchdringen die Kraftlinien des magnetischen Feldes des Stabmagneten die Spule. Damit wird dort eine Spannung induziert. Beide Größen, das magnetische Feld und die Spannung, werden simultan als Funktionen der Zeit erfasst und gespeichert.

Das Experiment wird von dem vorher installierten Programm PHYSIK gesteuert. Es teilt sich auf in einen vorbereitenden Teil und die Datenerfassung.

### Vorbereitung:

Das Programm PHYSIK kann entweder aufgerufen werden, indem sein Name aus dem [PRGM] -Menü gewählt wird (TI83) oder durch Aufruf aus dem Anwendungsmenü [APPS]

Aus dem Hauptmenü wird die **1:SET UP PROBES** ([Abb.1.](#))- Option gewählt und die Anzahl der Sonden in Option **2:TWO** ([Abb. 2](#)) . Anschließend werden die **2: MAGNETIC FIELD** -Sonde ([Abb. 3](#)) und die **3: VOLTAGE**-Sonde gewählt..



Vor den Hauptmessungen müssen die Sonden kalibriert werden (magnetisches Feld und Spannung).

In diesem Experiment, das nur qualitative Untersuchungen voraussetzt, können die gespeicherten Kalibrationseinstellungen benutzt werden. Wählen Sie dann die Einstellungen : **1:USE STORED** (Abb. 4.) und **4: LOW (MTESLA)** (Abb.5) . Beide Sonden sollten in weiter Entfernung des Stabmagneten auf Null gestellt werden. Das vermeidet den Einfluss des elektromagnetischen Feldes auf die Einstellungen. Also legen Sie den Stabmagneten weit weg von der Spule und der Sonde. Wählen Sie dann Option **5: ZERO PROBES** (Abb. 6.) und dann **5: ALL CHANNELS** (Abb.7). Wenn die auf dem CBL angezeigten Werte konstant werden, drücken Sie den schwarzen Knopf **TRIGGER**, der sich unterhalb des Displays befindet.

Die beschriebene Kalibrierung muss nur einmal zu Beginn des Experimentes durchgeführt werden.

```
***MAIN MENU***
1:SET UP PROBES
2:COLLECT DATA
3:ANALYZE
4:TRIGGERING
5:ZERO PROBES
6:RETRIEVE DATA
7:QUIT
```

Abb. 1.

```
NUMBER OF PROBES
1:ONE
2:TWO
3:THREE
```

Abb. 2.

```
SELECT PROBE
1:LIGHT
2:MAGNETIC FIELD
3:VOLTAGE
4:C-V CURRENT
5:C-V VOLTAGE
6:THERMOCOUPLE
7:MORE
```

Abb. 3.

```
**CALIBRATION**
1:USE STORED
2:PERFORM NEW
3:MANUAL ENTRY
```

Abb. 4.

```
MG FIELD SETTING
1:HIGH(GAUSS)
2:HIGH(MTESLA)
3:LOW(GAUSS)
4:LOW(MTESLA)
```

Abb. 5.

```
***MAIN MENU***
1:SET UP PROBES
2:COLLECT DATA
3:ANALYZE
4:TRIGGERING
5:ZERO PROBES
6:RETRIEVE DATA
7:QUIT
```

Abb. 6.

### Die Messung einrichten

Aus dem Hauptmenü des Programms wählen Sie Option **2:COLLECT DATA** (Abb. 8) und **2:TIME GRAPH** (Abb. 9) , um die Messungen der Kanäle vs der Zeit vorzubereiten. Das Zeitintervall beträgt z.B. 0,04 s und die Anzahl der zu erfassenden Daten z.B. 50 (Abb. 9).

Bevor Sie die Messung starten (Abb. 10), überprüfen Sie die Einstellungen der Versuchsanordnung und versetzen den Stabmagneten in Schwingung (auf und ab).

Der [Filmclip](#) zeigt, wie das Experiment aussieht.

```
SELECT CHANNEL
1:CHANNEL 1
2:CHANNEL 2
3:CHANNEL 3
4:MOTION
5:ALL CHANNELS
6:RETURN TO MAIN
```

Abb. 7.

```
DATA COLLECTION
1:MONITOR INPUT
2:TIME GRAPH
3:TRIGGER/PROMPT
4:TRIGGER
5:RETURN TO MAIN
```

Abb. 8.

```
ENTER TIME
BETWEEN SAMPLES
IN SECONDS:.04
ENTER NUMBER
OF SAMPLES:50
```

Abb. 9.



Die Messungen werden automatisch vervollständigt und die relevanten Informationen werden auf dem Rechnerbildschirm angezeigt (Abb. 11).

Die Zeitwerte werden in Liste  $L_1$ , die magnetische Induktion in Liste  $L_2$  und die in der Spule induzierte Spannung in Liste  $L_3$  gespeichert.

```
READY EQUIPMENT.
PRESS [ENTER] TO
BEGIN COLLECTING
DATA.
```

Abb. 10.

```
TIME IN L1
CHANNEL 1 IN L2
CHANNEL 2 IN L3

[ENTER]
```

Abb. 11.

```
SELECT GRAPH
1: CHANNEL 1
2: CHANNEL 2
3: NEXT
```

Abb. 12.

Sie können den Graphen der magnetischen Induktion vs Zeit konstruieren, indem Sie aus dem Menü (Abb. 12)

1: CHANNEL 1 wählen - (Abb. 13) oder zeichnen Sie die Spannung (induzierte EMK) vs Zeit, indem Sie 2: CHANNEL 2 wählen (Abb. 14).

Wenn Sie mit den erhaltenen Daten nicht zufrieden sind, können Sie das Experiment wiederholen, indem Sie dieselben oder andere Einstellungen benutzen (eine neue Kalibrierung ist nicht notwendig) (Abb. 15).

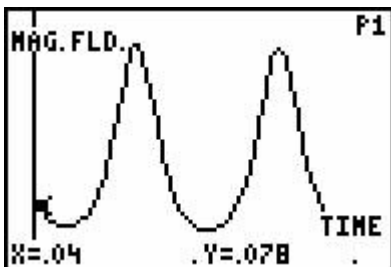


Abb.13

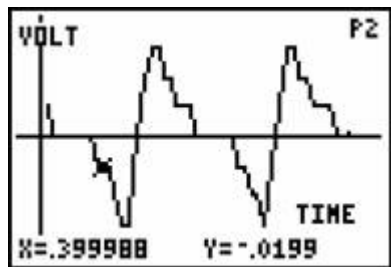


Abb.14

```
***REPEAT?***
1: NO
2: YES
```

Abb.15

Weitere Analysen können nach dem Verlassen des Physik-Programms ausgeführt werden.

## Beispieldaten (TI 83)

Die vorgestellte Messung wurde mit einem Versuchsaufbau durchgeführt, der aus folgenden Komponenten besteht:

- Spule 6500 turns (DNE  $d = 0,2$  mm), Diameter 5 cm
- Labor-Magnetstab (7.5 cm lang)
- Feder (30 cm lang – im Gleichgewicht), die zusammen mit dem Magneten einen Oszillator (Schwinger) mit einer Periode von ungefähr 1 Sek bildet.
- Laborrechnereinheit (CBL)
- Magnetischer Feldsensor für CBL™ (Vernier MG-DIN) , verbunden mit CH1
- CBL - DIN Adapter

- Spannungskabel (Standard CBL), verbunden mit CH2
- Graphikrechner TI83Plus
- Einheit - zu - Einheit-Kabel (Standard)
- Programm Vernier Software Physik (Version 09/09/02 für TI-83Plus)
- TI-GRAPH LINK TM (optional)
- PC mit der TI Connect<sup>TM</sup> Software (optional) Download TI Connect

### **Parameter der Datensammlung:**

- Kalibrierungseinrichtung:
  - Benutzen Sie die gespeicherten Kalibrierungen
  - Setzen Sie alle Kanäle auf Null
- Modus der Datensammlung :
  - Zeitgraph
  - Sammelzeit: 0,04 Sec
  - Anzahl der Proben: 50
- Datenspeicherung:
  - Zeit - Liste L1
  - magnetische Induktion - Liste L2
  - Spannung (induzierte emf) - Liste L3

### Originaldateien (TI 83 ):

- Zeit
- magnetische Induktion
- Spannung

### Originaldateien (MS Excel):

- Zeit
- magnetische Induktion
- Spannung

### Umgeformte Dateien - TI83 Listen (für die Analyse) siehe Analyse:

- Umgeformte Zeitdaten
- Umgeformte Spannungsdaten
- Ableitung nach der Zeit des magnetischen Flusses

### Umgeformte Dateien - MS Excel (für die Analyse) siehe Analyse:

- Umgeformte Zeitdaten
- Umgeformte Spannungsdaten
- Ableitung nach der Zeit des magnetischen Flusses

## Datenanalyse (TI 83)

Die Gesetzmäßigkeiten der Induktion können durch weiterführende Analysen überprüft werden. Dazu werden die auf dem Rechner vorhandenen Hilfsmittel oder eine andere Software wie z.B. wie MS Excel-Tabellenblätter benutzt.

Die erfassten Daten sind in Listen im Rechner gespeichert:

- Zeit in Sekunden - Liste  $L_1$
- magnetische Flussdichte in mTesla - Liste  $L_2$
- Spannung (induzierte EMK) in Volt - Liste  $L_3$

Beispieldaten erhalten Sie [hier](#).

### Analyse der Grafiken

Der magnetische Feldfluss durchdringt die Spule. Seine Stärke ist proportional zu der gemessenen magnetischen Flussdichte (siehe theoretisches Modell). Da die Ursache des magnetischen Feldes ( der Stabmagnet) sich relativ zur Spule bewegt, verändert sich die Feldflussdichte pro Zeiteinheit.

Die Bewegung des Stabmagnetens induziert eine elektromotorische Kraft EMK in Form einer Spannung in der Spule. Die Zeitabhängigkeit und die wechselseitige Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte und der induzierten Spannung kann mit Hilfe von Graphen untersucht werden.

### Magnetische Feldinduktion (und magnetischer Feldfluss) und induzierte EMK vs. Zeit

Bestimmen Sie Diagramm1 als  $L_2$  vs.  $L_1$ , erhalten wir ein  $B(t)$ -Diagramm, während die Definition des Diagramm2 als  $L_3$  vs.  $L_1$  in dem Diagramm:  $EMK(t)$  resultiert (Abb.1.). Nach der Anpassung des Fensters können beide Diagramme untersucht werden. (Abb.2.).

Die in V1 dargestellte magnetische Flussdichte zeigt das Zeitraster, das der harmonischen Bewegung des Magneten entspricht. Die Spannung in Diagramm2 zeigt ähnliche Zeitraster mit Phasenverlagerungen. Der Wechsel der Steigung der  $B(t)$ -Kurve zeigt sich in der Form des **EMK (t)-Diagramms**. Die beobachteten Wechsel im Vorzeichen entsprechen dem Charakter der Änderungen im magnetischen Feld und werden durch das Lenz'sche Gesetz erklärt.

Ein Vergleich mit dem theoretischen Modell zeigt, dass die experimentellen Daten gut zu dem Modell passen.

Allerdings lässt sich die Gültigkeit des Lenz'schen Gesetzes nur überprüfen , wenn die Wicklungsrichtung der Spule und die Polarität der Spannungssonden-Verbindung in Betracht gezogen wird.

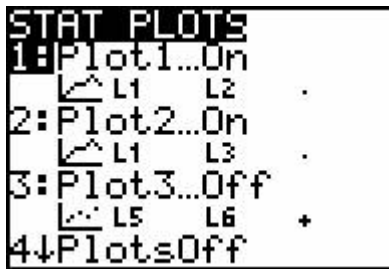


Abb.1.

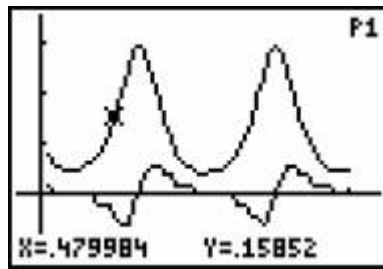


Abb.2.

## Wir überprüfen Faradays Gesetz

Die gesammelten Daten ermöglichen es, Faradays Gesetz der Induktion zu überprüfen, indem die Proportionalität der Zeitraten, in denen sich das Magnetfeld verändert, gemessen werden. Die induzierte Spannung muss mit dem der Ableitung des magnetischen Feldes nach der Zeit, die von der magnetischen Feldsonde aufgenommen wurde, verglichen werden.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise der numerischen Differenzierung wurde von G. Adie [in 'Using the TI89 in Physics' Bk Techware, 2000] übernommen. Sie basiert auf der Berechnung der Differenzquotienten aus den Originaldaten des magnetischen Feldes. Die Vorgehensweise unterteilt sich in folgende Schritte:

1. Definieren Sie eine neue Liste L5 mit den Differenzquotienten der nachfolgenden Werte aus Liste L2, berechnet für die benutzten Zeitintervalle (z.B. 0.04 s) und
2. Definieren Sie neue Listen L4 und L6 mit den jeweiligen Zeit- und Spannungsdaten, in der Größe um Eins reduziert (dieser Schritt folgt der vorangehenden Reduktion der Größe der Liste L5, der durch den Ablauf in Schritt 1 notwendig wird).

Zwei spezielle Funktionen **List()** und **cumSum()**, die in dem beschriebenen Vorgehen verwendet werden, werden von dem **STAT OPS**-Menü aus aufgerufen - Abb.3. Die Befehlssyntax ist in Abb.4 ersichtlich.

Als Ergebnis werden drei neue Listen angelegt. Sie enthalten:

- modifizierte Zeit - Liste L<sub>4</sub>,
- Die Ableitung der magnetischen Flussdichte nach der Zeit - Liste L<sub>5</sub>
- modifizierte induzierte EMK (Spannung) - Liste L<sub>6</sub>

Zur Untersuchung von Faradays Gesetz brauchen wir eine neue Grafik (Graph3), die die induzierte EMK vs Zeitderivate der magnetischen Induktion anzeigt (L5 vs.L6) Abb.5.

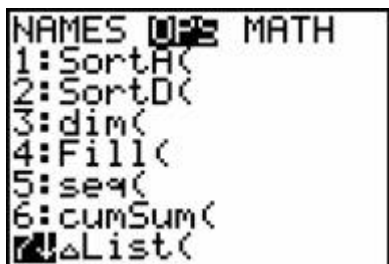


Abb.3.

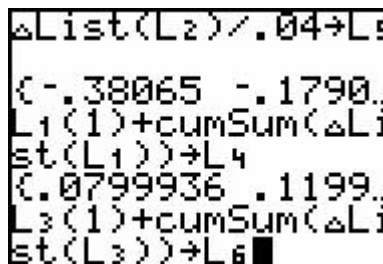


Abb.4.



Abb.5.

Anhand des untersuchten Diagramms (Abb.6) kann man die Hypothese einer quasi linearen

Abhängigkeit zwischen den betroffenen Größen aufstellen. Diese Linearität kann mit dem Ziel geprüft werden, die lineare Regressions-Funktion **LinReg(ax+b)** für die Listen  $L_5$  und  $L_6$  (aus dem **STAT CALC** Menü – Abb. 7 und Abb. 8) zu erstellen. .

Die abgeleitete lineare Annäherung (Abb. 9) kann jetzt mit den realen Daten verglichen werden. Abb.10

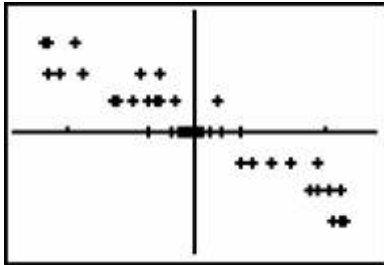


Abb. 6

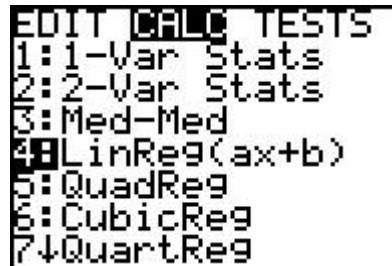


Abb. 7

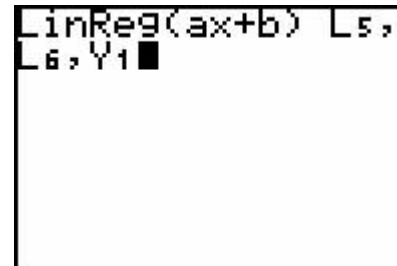


Abb. 8

Die Steigung der Linie stellt Parameter der Spule dar und kann verglichen werden mit dem theoretischen Modell

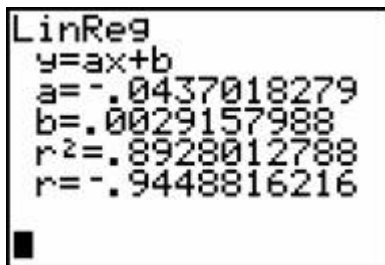


Abb. 9

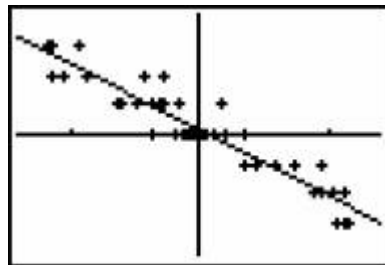


Abb. 10

### Schlussfolgerung:

Der lineare Charakter der festgestellten  $U(dB/dt)$  - Abhängigkeit bestätigt die Vorhersagen des theoretischen Modells und damit die Gültigkeit von Faradays Gesetz der Induktion.

### Erweiterung:

Man kann die Zeitabhängigkeit der Spannung (Listen  $L_4, L_6$ ) und die Zeitabhängigkeit des Differenzquotienten  $dB/dt$  (Listen  $L_4, L_5$ ) getrennt untersuchen. Der Vergleich wird die Zusammenhänge dieser beiden Funktionen zeigen.


Die berechnete Steigung der linearen Abhängigkeit könnte positiv sein, wenn die Polarität der Leitungsverbindungen der Spannungssonden unbekannt ist. Aber auch dann kann die gesamte Analyse bis auf die Untersuchung des Lenz'schen Gesetzes durchgeführt werden.

### **Datenanalyse (mit MS Excel-Dateien )**

Weiterführende Analysen können unter den Bedingungen von Faradays Gesetz der Induktion durchgeführt werden, Nutzen Sie dazu die auf dem Rechner und PC implementierten Hilfsmittel, wie die MS Excel-Software.

## Übertragung der experimentellen Daten auf den PC

Am Ende des Experiments können die Daten vom Grafikrechner auf den PC übertragen werden.

Das TI GRAPH LINK Kabel unterstützt von der TI Connect Software  bietet Hilfsmittel an, die es ermöglichen den Inhalt des Rechners (TI DEVICE EXPLORER) und der Datensammlung (TI DATA EDITOR) zu untersuchen.

Die im Experiment gesammelten Daten werden in den Rechnerlisten gespeichert:

- Zeit in Sekunden - Liste  $L_1$
- magnetische Induktion in mTesla - Liste  $L_2$
- Spannung (induzierte emf) in Volt - Liste  $L_3$

Innerhalb des TI Connect<sup>TM</sup>-Programms können Sie mit dem TI DEVICE EXPLORER die Rechnerlisten auf der Festplatte des Computers speichern und anschließend im TI DATA EDITOR öffnen. Die Option **Special Lists Export** gibt die Möglichkeit, die ausgewählten Listen als Dateityp: \*.CSV file zu sichern. Ein solcher Datentyp kann mit der MS Excel Software geöffnet und untersucht werden.

### Analyse der Grafiken

Der magnetische Feldfluss durchdringt die Spule. Er verhält sich proportional zu der gemessenen magnetischen Induktion. Da sich die Quelle des Feldes im Verhältnis zur Spule bewegt, verändert sich der Feldfluss in der Zeit.

Durch die Bewegung des Stabmagneten, kann die induzierte elektromotorische Kraft emf als Spannung in der Spule gemessen werden. Die Zeitabhängigkeit und die wechselseitige Abhängigkeit der magnetischen Induktion und induzierten Spannung kann mit Hilfe von Graphen untersucht werden.

Magnetische Feldinduktion (und magnetischer Feldfluss) und induzierte emf vs Zeit.

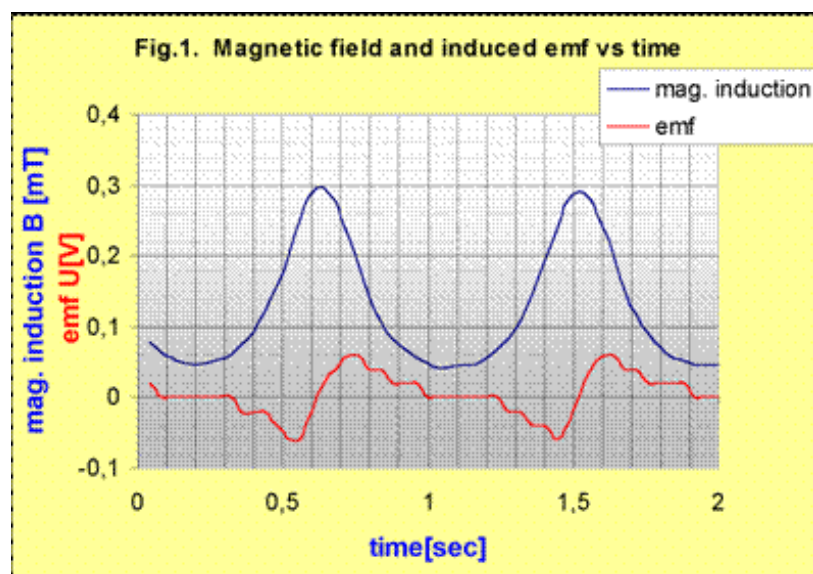


Abb. 1. zeigt beides:  $B(t)$  und  $emf(t)$  Graph.



Die magnetische Induktion zeigt das Zeitraster, das der harmonischen Bewegung des Magneten entspricht. Der Emf - Graph zeigt ähnliche Zeitraster mit Phasenverlagerungen. Der Wechsel der Steigung der  $B(t)$ -Kurve zeigt sich in der Form des **emf(t)-Graph**. Die beobachteten Wechsel im Vorzeichen entsprechen dem Charakter der Änderungen im magnetischen Feld und können in den Begriffen von Lenz Gesetz diskutiert werden.

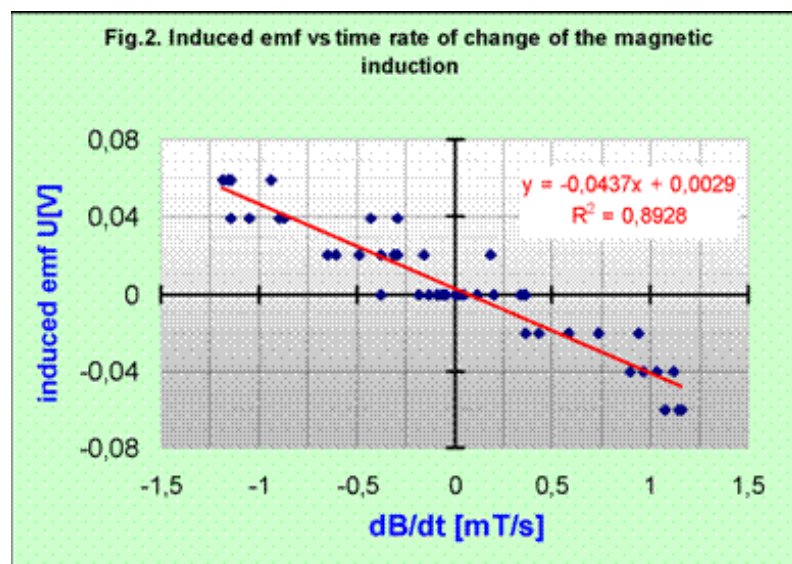
Ein Vergleich mit dem theoretischen Modell zeigt, dass die experimentellen Daten in das Modell passen.

## Wir überprüfen Faradays Gesetz

Die gesammelten Daten ermöglichen es, Faradays Gesetz der Induktion zu überprüfen. Wir messen die Proportionalität der Zeitraten, in denen sich das Magnetfeld verändert. Die Analyse verlangt es, die induzierte Spannung mit dem Zeitderivat des magnetischen Feldes, das von der magnetischen Feldsonde aufgenommen wurde, zu vergleichen.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise der numerischen Differenzierung basiert auf der Berechnung der Differenzenquotienten aus den Originaldaten des magnetischen Feldes. Sie enthalten:

- modifizierte Zeit -Spalte Zeit 1
- Ableitung der magnetischen Flusses nach der Zeit - Spalte dB/dt - Datei: Zeitderivate
- modifizierte induzierte emf (Spannung) - emf1 - Datei: Spannung1



Zur Untersuchung von Faradays Gesetz benötigt man eine neue Grafik, welche die induzierte EMK gegen die Ableitung des magnetischen Flusses anzeigt Abb.2

Anhand des untersuchten Graphs kann man die Hypothese der quasi linearen Abhängigkeit zwischen den betroffenen Mengen aufstellen. Diese Linearität wird mit dem Ziel geprüft, die lineare Regressions-Funktion zu erstellen. .

Die Steigung der Linie stellt Parameter der Spule dar. Wir vergleichen sie mit dem theoretischen Modell

### Schlussfolgerung:

Der lineare Charakter der festgestellten  $U(dB/dt)$  - Abhängigkeit bestätigt die Vorhersagen des theoretischen Modells und gleichzeitig die Gültigkeit von Faradays Gesetz der Induktion.

### Erweiterung:

Man kann die Zeitabhängigkeit der Spannung (Listen L4,L6) und die Zeitabhängigkeit des Differenzenquotienten  $dB/dt$  (Listen L<sub>4</sub>, L<sub>5</sub>) getrennt untersuchen. Der Vergleich wird die Zusammenhänge dieser beiden Funktionen zeigen.

Die berechnete Steigung der linearen Abhängigkeit könnte positiv sein, wenn die Polarität der Leitungsverbindungen der Spannungssonden belegt ist. Aber auch dann kann die gesamte Analyse durchgeführt werden, bis auf die Untersuchung des Lenzschen Gesetzes.