

Spannungsbegriff und Induktion

U. Backhaus
Universität Duisburg-Essen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Zitate	2
1.2	Ziele	3
1.3	Experimente	3
2	Experiment zum Vorzeichen der Spannung bei Selbstinduktion	4
3	Gesetzmäßigkeiten der Induktion	5
4	Probleme bei der Anwendung der Gesetzmäßigkeiten	7
4.1	Zwischenbilanz	8
5	Das Induktionsgesetz mit Vorzeichen	8
6	Maschenregel und Induktionsspannung	10
7	Fazit	11
8	Anhang	11
8.1	Die Vorzeichen von Stromstärke, Spannung und magnetischem Fluss	11
8.2	Ein (nicht mehr so) überraschendes Experiment	11
8.3	Was messen Voltmeter?	12
	Literatur	14

1 Einleitung

Ich möchte heute über das Induktionsgesetz sprechen, insbesondere über die Probleme, die bei seiner Anwendung mit den Vorzeichen auftreten, und ich möchte Vorschläge machen, wie diese Probleme zu vermeiden – oder zumindest zu verringern sind. Dazu werde ich zunächst ein Experiment vorführen, dass viele von Ihnen sicher kennen werden, und daran die Problematik bewusst machen, die ich anschließend auf die nicht eindeutige oder sogar widersprüchliche Formulierung der zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten in Fach- und Schulbüchern zurückführen werde.

Nachdem ich auf diese Weise die Probleme konkretisiert habe, werde ich alternative Formulierungen und Herangehensweisen vorstellen, durch die diese Probleme weitgehend vermieden werden können. Beschreibung und Vorhersage des einführenden Experimentes wird dadurch sehr einfach.

Wenn noch Zeit übrig bleibt, werde ich ein weiteres Experiment beschreiben, das umfangreiche Diskussionen in der fachdidaktischen Literatur hervorgerufen hat, dessen Interpretation am Ende des Vortrages aber (hoffentlich) selbstverständlich geworden ist.

1.1 Zitate

- „Das Minuszeichen im Induktionsgesetz“ (Momm 2012 [18])

Ein problematisches Beispiel (dafür, dass die in einer Formel auftretenden Größen nicht richtig definiert worden sind) stellt das Induktionsgesetz dar. Gefühlt ist diese Vorzeichenmystik offensichtlich. Jeder, der sich mit Physik in der Kursstufe befasst, müsste sich ihrer bewusst sein. Dem ist aber nicht so.

...

Auch gibt es keine natürliche Wahl des Vorzeichens von U_{ind} und von Φ .

...

Diese Gleichung ($U_{ind} = -L \frac{dI}{dt}$) findet man unabhängig davon, ob die technische Stromrichtung zugrunde gelegt wird oder die ... Richtung des Elektronenstroms.

...

Was wir klar machen wollen ist, dass eine mit einem Vorzeichen (welches auch immer) behaftete Gleichung für Größen, deren Vorzeichen nicht wohldefiniert sind, sinnlos ist.

- 3 Blöcke von Diskussionen:

1. Die 1980er Jahre. Typische Beispiele:

- Experimental "paradox" in electrodynamics (W. Klein 1981 [14])
- What do "voltmeters" measure? Faraday's law in a multiply connected region (R. H. Romer 1982 [25])

- Zur Induktionsspannung. Eine kritische Betrachtung (U. Manthei 1986 [15])
 - Anmerkungen zur Spannungsmessung am Ringstrom (W. Jung 1989 [12])
2. Die **1990er** Jahre Typische Beispiele:
- Spannung und EMK (elektromotorische Kraft). Zwei notwendige, unterschiedliche Begriffe (F. Bauer 1993 [3])
 - Das verzwickte Vorzeichen im Induktionsgesetz (C. Christoph et al. 1993 [5])
 - Induktion, Wirbelströme und Lenzsche Regel (E. Marhenke 1996 [16])
 - Das Vorzeichen der Induktionsspannung (H. Schwarze 1997 [28])
3. Die **2000er** Jahre Typische Beispiele:
- Challenges to Faraday’s flux rule (F. Munley 200 [21])
 - Verblüffende Spannungsmessungen: Experimente zu einem elektrodynamischen Paradoxon (R. Pelster et al. 2004 [23])
 - Induktionsspannung und Induktionsstrom (H. Schwarze 2004 [29])
 - Der Begriff der elektrischen Spannung und seine Messung in Gegenwart von zeitlich veränderlichen Magnetfeldern (U. Backhaus et al. 2006 [1])

1.2 Ziele

- Ich werde mich weitgehend auf einen phänomenologischen Zugang beschränken. Die Maxwell’schen Gleichungen kommen deshalb nur am Rand, die Beziehung zwischen Elektrodynamik und Relativitätstheorie gar nicht vor.
- Ich möchte bei Ihnen, so noch nicht vorhanden, ein Bewusstsein für die Probleme wecken, die mit dem Induktionsgesetz, mit dem darin auftretenden Vorzeichen und mit der Erweiterung des Spannungsbegriffs auf Stromkreise, in denen Induktion stattfindet, zusammenhängen.
- Ich werde Ihnen Lösungsvorschläge anbieten. Diese werden zwar unterrichtsnah sein, aber ich werde Ihnen keinen konkreten Unterrichtsgang vorschlagen. Dazu verweise ich auf den nachfolgenden Vortrag von Frau Erfmann.

1.3 Experimente

Ich werde über drei Experimente mit Ihnen sprechen, von denen die meisten von Ihnen wahrscheinlich die ersten beiden kennen werden.

1. Das Vorzeichen der Selbstinduktionsspannung an einer Spule

Dieses Experiment kann die Probleme mit dem Induktionsgesetz, der Lenz’schen Regel und dem Vorzeichen der Induktionsspannung exemplarisch deutlich machen.

2. Grundversuch zur Induktion

Dieser Versuch steht stellvertretend für eine ganze Reihe von Grundversuchen, die Sie wahrscheinlich alle bei der Behandlung der elektromagnetischen Induktion durchführen.

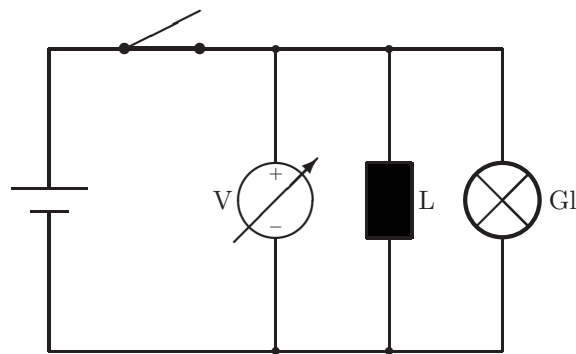
3. Ringspannung in einem Stromkreis mit Induktion

Dieses Experiment wurde in den 1980er Jahren intensiv diskutiert, insbesondere im American Journal of Physics, und 2004 in Deutschland wieder aufgegriffen – zunächst in einer missverständlichen und die Probleme eher akzentuierenden Weise.

Das Experiment ist nicht ganz einfach durchzuführen. Ich werde es hier nur beschreiben und auf die Literatur verweisen. Ich hoffe, dass es am Ende meines Vortrages nur noch wenig überraschend ist und nur noch weniger Erläuterungen bedarf.

2 Experiment zum Vorzeichen der Spannung bei Selbstinduktion

- Vorstellung des Versuches am Experimentalaufbau und an **Schaltskizze** (an Tafel?)



Zum Vorzeichen der Induktionsspannung U_L

- *Zunächst wird das Experiment nicht durchgeführt!*
- **Fragen:**
 1. Wie wird sich das Lämpchen nach Öffnen des Schalters verhalten?
 2. Was wird das Voltmeter anzeigen?
 3. Ist die Richtung des Ausschlages vom Windungssinn der Spule abhängig? Wenn ja, wie?
 4. Begründen Sie Ihre Vorhersage!
- **Zeit zum Nachdenken!**
- **Durchführung** Ergebnisse:

- Das Voltmeter schlägt kurzzeitig zu negativen Werten aus.
- Das Lämpchen leuchtet kurz nach, leuchtet aber nicht hell auf.
- Für den Fall, dass das Experiment mit zwei entgegengesetzt geschalteten LEDs durchgeführt werden muss: Es leuchtet die andere LED auf.

3 Gesetzmäßigkeiten der Induktion

- **Induktionsgesetz** (z. B. Cornelsen [7])

In einer Spule mit N Windungen wird eine Spannung induziert, wenn sich der magnetische Fluss Φ ändert. Es gilt:

$$U_{ind} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{bzw.} \quad U_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Das Vorzeichen gibt einen Hinweis auf die Polung der induzierten Spannung.

- **Lenz'sche Regel**

- **Cornelsen** [7]

Der Induktionsstrom (!) ist stets so gerichtet, dass er der Ursache seiner Entstehung entgegen wirkt.

- **wikipedia**

Die Lenzsche Regel (auch: Lenzsches Gesetz oder Regel von Lenz) ist eine Aussage über die Richtung des elektrischen Stromes bei elektromagnetischer Induktion, ...

Nach der Lenzschen Regel wird durch eine Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife eine Spannung induziert, so dass der dadurch fließende Strom ein Magnetfeld erzeugt, welches der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirkt, ...

- **Tipler** [32]

Die von einer Zustandsänderung verursachte Induktionsspannung ist stets so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenzuwirken versucht.

oder

Ändert sich der magnetische Fluss durch eine Fläche, so wird ein Strom induziert, der seinerseits ein Magnetfeld und damit einen magnetischen Fluss durch dieselbe Fläche hervorruft, der seiner Ursache entgegengesetzt gerichtet ist.

- **Selbstinduktionsspannung**

- **Cornelsen** [7]

- * Für die Spannung, die in N Spulenwindungen induziert wird, folgt dann (S. 142):

$$U_{ind} = \mu_0 \mu_r \frac{N^2}{l} \frac{dI}{dt} A \quad \text{also: } U_{ind} = L \frac{dI}{dt}$$

- * Mit der Induktivität L folgt schließlich für die induzierte Spannung mit Beachtung des Vorzeichens:

$$U_{ind} = -L \frac{dI}{dt}$$

Die Polung der induzierten Spannung ergibt sich dabei aus dem Induktionsgesetz bzw. der Lenz'schen Regel. (S. 144)

- * Daher kann man mit Gl. (5.20) (d. i. $U_{ind} = -L \frac{dI}{dt}$!!) schreiben (S. 153):

$$\dots U_{ind} = L \frac{dI}{dt} \dots$$

– wikipedia

Die Selbstinduktivität eines Stromkreises setzt die Änderungsrate des elektrischen Stroms i mit der elektrischen Spannung u in Beziehung

$$u = L \frac{di}{dt}$$

... *Das Vorzeichen in obiger Gleichung ist abhängig von der Zählrichtung von Strom und Spannung.* (Hervorhebung von mir)

– Metzler, Schwarze [17]

Über einer Spule wird bei einem sich zeitlich ändernden Spulenstrom I die Spannung U_L gemessen:

$$U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

– Tipler [32]

Ändert sich die Stromstärke in einem Stromkreis, so ändert sich auch der magnetische Fluss, und es wird eine Spannung induziert. ... Gemeinsam mit dem Faraday'schen Gesetz ergibt sich dann: (S. 913)

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi_{mag}}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (28.12)$$

• Maschenregel

– Tipler [32]

Beim Durchlaufen einer geschlossenen Schleife (einer „Masche“) eines Stromkreises ist die Summe aller Spannungen gleich null. (S. 800)

– **Metzler, Schwarze** [17]

In einem elektrischen Stromkreis, in dem keine Induktionsspannung auftritt, ist die Summe aller Teilspannungen einer Masche $U_1 + U_2 + U_3 + \dots = 0$. Dieser Zusammenhang wird Maschenregel (für die Spannungen in einem Stromkreis) genannt. ... Für den Stromkreis mit Induktion in Abb. 83.2 gilt die Maschenregel nicht: *Die Summe der Spannungen ist*

$$U_0 + U_1 + U_2 + U_3 \neq 0$$

(Hervorhebung von mir)

– **wikipedia**

Alle Teilspannungen eines Umlaufs bzw. einer Masche in einem elektrischen Netzwerk addieren sich zu null. Die Richtung des Umlaufes kann beliebig gewählt werden; sie legt dann aber die Vorzeichen der Teilspannungen fest. Soweit Pfeile entgegen der Umlaufrichtung zeigen, sind die Spannungen mit umgekehrten Vorzeichen einzusetzen.

Die Maschenregel ist ein Spezialfall des Induktionsgesetzes und darf nur bei Abwesenheit zeitlich sich ändernder magnetischer Flüsse angewandt werden.

(Hervorhebung von mir)

– In **Schulbüchern** wird meistens so formuliert (z. B. [8]):

In der Reihenschaltung ist die Spannung an der Quelle gleich der Summe der Spannungen an den Verbrauchern:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

4 Probleme bei der Anwendung der Gesetzmäßigkeiten

- Frage eines Mitarbeiters:

Ich betreue einen LK in Physik und habe ein Vorzeichenproblem beim elektrischen Schwingkreis. Wenn man die DGL der ungedämpften Schwingung über die Maschenregel ableiten will ($U_C + U_L = 0$) führt das Induktionsgesetz mit ($U_L = -L \frac{dI}{dt}$) auf die Gleichung:

$$\frac{I}{C} - L \frac{dI}{dt} = 0$$

Es muss aber heißen

$$\frac{I}{C} + L \frac{dI}{dt} = 0.$$

In vielen Büchern, u.a. Tipler, wird beim Ansatz einfach $U_L = +L \frac{dI}{dt}$ gesetzt. Dann kommt natürlich das richtige heraus, aber darf man das? und falls ja warum?

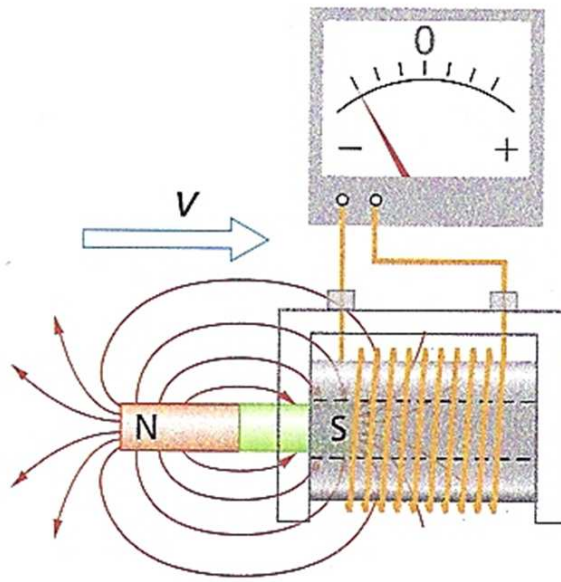
- Versuche, das obige Experiment vorherzusagen bzw. zu erklären:
 1. Die Spannung an der Spule nimmt ab. Die Induktionsspannung versucht, diese Abnahme zu verringern, muss also so gepolt sein, wie die ursprüngliche Spannung.
 2. Die Stromstärke in der Spule nimmt ab. Der Induktionsstrom verringert diese Abnahme, hat also das Vorzeichen des ursprünglichen Stromes (von oben nach unten). Die Induktionsspannung, die diesen Strom erzeugt, muss also wie die ursprüngliche gepolt sein (oben + und unten -).
 3. Wenn $I > 0$, muss $\dot{I} < 0$ und damit $U_{ind} > 0$ sein, also wieder oben + und unten -.
 4. Angenommen, der Windungssinn der Spule ist so, dass \vec{B} nach oben zeigt, dann ist \vec{B} nach unten gerichtet. Bei naheliegender Wahl des Umlaufsinn (Finger der rechten Hand) sind dann $I > 0$ und $\Phi > 0$. Damit ergeben sich $\dot{\Phi} < 0$ und $\dot{I}_{ind} > 0$, der Induktionsstrom fließt also von oben nach unten. Heißt das nicht: Die induzierte Spannung hat ihren positiven Pol oben?
- Es ergeben sich also Widersprüche zum Experiment und mit der Maschenregel (angewendet auf den RL-Kreis).

4.1 Zwischenbilanz

- Keines der Gesetze ermöglicht (ohne Weiteres) Vorhersage.
- Die Vorzeichen von magnetischem Fluss, Stromstärke und Spannung sind problematisch.
- In Fachbüchern und Schulbüchern wird mit der Vorzeichenproblematik sehr lax umgegangen. Die Vorzeichen werden so „hingemogelt“, dass das Richtige herauskommt. Damit haben Menschen, die bereits Physik können, kaum Probleme. Aber Lernende ...
- Möglichkeiten des Umgangs mit den Problemen:
 - Man formuliert die Gesetze „vorzeichenfrei“ (s. Momm) und klärt Vorzeichen und Richtungen jeweils am konkreten Problem, z. B. mit der energetisch formulierten Lenz’schen Regel.
 - Man gibt allen Vorzeichen einen konkreten wohl definierten Sinn. Das will ich im Folgenden andeuten.

5 Das Induktionsgesetz mit Vorzeichen

- Ein Grundversuch zur Induktion in einer Spule durch Bewegung eines Magneten, stellvertretend für alle weiteren



- Alle diese Experimente lassen sich durch die folgendes Gesetz zusammenfassen:

Ändert sich der magnetische Fluss Φ durch eine von einer Leiterschleife aufgespannte Fläche, dann wird in der Leiterschleife ein elektrischer Strom induziert. Seine Stromstärke ist gegeben durch

$$RI_{ind} = -\dot{\Phi}.$$

Dabei ist R der Widerstand des Leiters und Φ der magnetische Fluss durch die von ihm aufgespannte Fläche. Das Vorzeichen der Stromstärke bezieht sich auf denselben Umlaufsinn wie die Flächennormale.¹

- Der Begriff der induzierten Spannung wird vermieden, weil die Summe der in diesem Stromkreis zu messenden Spannungen nicht null ist. Der Potentialbegriff, mit dessen Hilfe die Spannung oft eingeführt wird, ist nicht anwendbar, und die Spannung zwischen zwei Punkten hängt *nicht* nur von den Punkten ab, sondern auch vom Weg, entlang dem gemessen wird.
- Anwendung des Gesetzes auf den Grundversuch
 - Das magnetische Feld in der Spule und seine zeitliche Änderung sind nach rechts gerichtet.
 - Zur Festlegung von Umlaufsinn und Flächennormale wird die Spule so mit den Fingern der rechten Hand umfasst, dass der Daumen nach links zeigt.

¹Die Probleme Richtung der elektrischen Stromdichte, Umlaufsinn und Vorzeichen der elektrischen Stromstärke, Umlaufsinn und Flächennormale und Vorzeichen des magnetischen Flusses werden erläutert in Backhaus, Braun 2006 [1].

- Dann zeigt die Flächennormale wie das magnetische Feld nach links, und der magnetische Fluss und seine zeitliche Änderung sind positiv.
- Nach dem Induktionsgesetz ist dann die elektrische Stromstärke negativ, die Stromdichte also entgegengesetzt zu den Fingern der rechten Hand gerichtet.
- *Der elektrische Strom fließt also von der linken zur rechten Buchse durch das Messgerät. Es wird deshalb einen negativen Wert anzeigen, wenn die rechte Buchse den positiv gekennzeichneten Eingang darstellt.*

- Anwendung des Gesetzes auf das Selbstinduktionsexperiment:

Wenn der Masche aus Spule und Lämpchen ein Umlaufsinn entgegen dem Uhrzeigersinn zugeordnet wird, dann ist $I_L > 0$. Sei der Windungssinn so, dass sich der Nordpol der Spule oben befindet. Dann ist $\Phi > 0$ und damit $\dot{\Phi} < 0$. Dadurch wird $I_{ind} > 0$; der induzierte Strom fließt also in der Spule auch von oben nach unten, im Lämpchen allerdings von unten nach oben.

Aber: Was bedeutet das für das Vorzeichen der Spannung?

6 Maschenregel und Induktionsspannung

(genauer in [1])

- Der Spannungsbegriff ist problematisch, weil die Maschenregel ungültig ist. Stattdessen gilt:

$$U_1 + U_2 + \dots = -\dot{\Phi}$$

- Führt man gemäß $U_{ind} = +\dot{\Phi}$ formal den Begriff der Induktionsspannung ein – und daraus folgt sofort $U_L = +L\dot{I}$! –, dann gilt die Maschenregel wieder:

$$U_1 + U_2 + \dots + U_{ind} = 0$$

- Daraus ergeben sich allerdings gewisse Schwierigkeiten:
 - Die Induktionsspannung ist im Allgemeinen im Stromkreis nicht lokalisierbar. Sie ist vielmehr eine Eigenschaft des gesamten Kreises. Besonders deutlich wird das bei einer einfachen Leiterschleife.
 - Da die Induktionsspannung nicht mit der Stromstärke selbst sondern mit ihrer zeitlichen Änderung zusammenhängt, ist eine Ursache-Wirkung-Argumentation noch schwieriger als sonst bei Stromstärke und Spannung (siehe obige Schwierigkeiten beim Versuch, das Vorzeichen der Spannung an der Spule vorherzusagen!).
- Vorhersage der Spannungspolung beim Selbstinduktionsexperiment:

Wenn der Masche aus Spule und Lämpchen ein Umlaufsinn entgegen dem Uhrzeigersinn zugeordnet wird, dann ist $I_L > 0$. Da die Stromstärke nach dem Öffnen des Schalters (betragsmäßig) sicher abnehmen wird, ist $\dot{I}_L < 0$ und damit $U_L < 0$. Fertig!

Aus dem umgekehrten Umlaufsinn folgt natürlich dasselbe Ergebnis.

7 Fazit

- Beim Vorliegen von Induktion gilt die Maschenregel nicht. Damit sind die Grundlagen des in der Mittelstufe eingeführten Spannungsbegriffs nicht mehr gültig.
 - Die Spannung ist nicht mehr die Eigenschaft zweier Punkte in einer Schaltung, sondern zusätzlich vom Weg zwischen diesen Punkten abhängig.
 - Die Spannungsanzeige von Voltmetern lässt nicht immer auf Eigenschaften der zu untersuchenden Schaltung schließen.

Der Spannungsbegriff kann nicht mehr verwendet werden – oder er muss geeignet erweitert werden. Insbesondere muss diese Problematik besprochen werden.

- Die Schwierigkeiten bei der Anwendung des Induktionsgesetzes – und auch der unter Benutzung des Spannungsbegriffs formulierten Lenz'schen Regel – beruhen zusätzlich auf nicht klar formulierten Vorzeichenregeln.
- Die Schwierigkeiten lassen zum größten Teil vermeiden, indem statt mit der *Induktionsspannung* mit der *Induktionsstromstärke* argumentiert wird.
- Man kann die Gesetze vorzeichenfrei formulieren (Momm) und Richtung oder Vorzeichen von Effekten anhand konkreter Probleme diskutieren. Implizit tun das viele Fach- und Schulbücher, in denen die Vorzeichen jeweils *zielorientiert angepasst* werden. Wenn das nicht explizit geschieht, sind Lernprobleme unausweichlich.
- Es ist möglich, Richtungen und Vorzeichen definitiv einzuführen und konsequent zu verwenden. Damit wird die Beschreibung und Vorhersage von Induktionsexperimenten einfach.

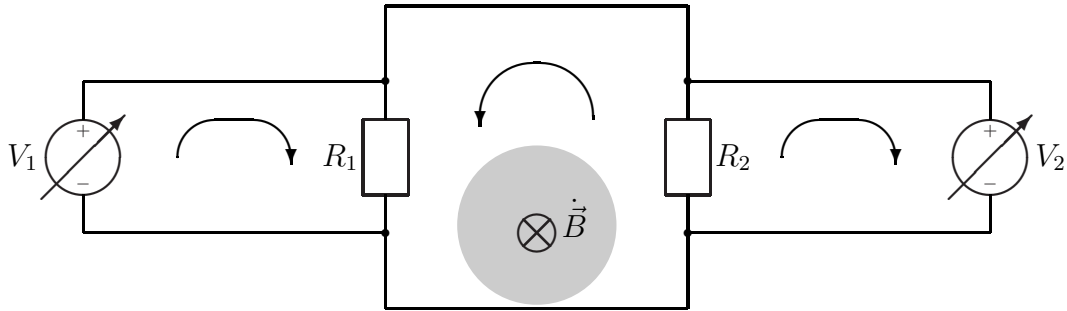
Dieser Weg ist aber so anspruchsvoll, dass er für die Schule kaum geeignet elementarisiert und umgesetzt werden kann.

8 Anhang

8.1 Die Vorzeichen von Stromstärke, Spannung und magnetischem Fluss

8.2 Ein (nicht mehr so) überraschendes Experiment

- Beschreibung des Versuchsaufbaus mit **Foto** und **Schaltskizze**



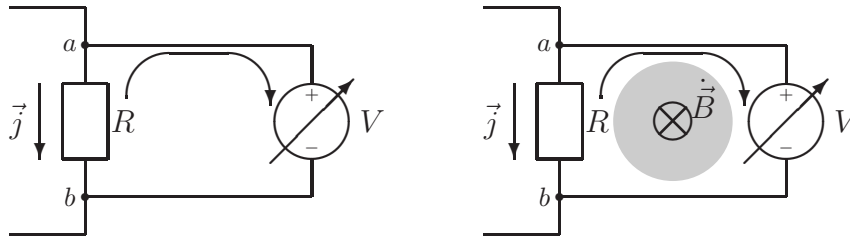
- Beobachtungen:
 - Die Voltmeter zeigen unterschiedliche Messwerte an, obwohl sie an dieselben Punkte des Stromkreises angeschlossen sind.
 - Bei geeigneter Abänderung des Versuches oder bei Verwendung von Oszilloskopen statt der Voltmeter ist erkennbar, dass die Messwerte der beiden Voltmeter unterschiedliche Vorzeichen haben.
 - Die Messwerte der Voltmeter hängen bei nicht sorgfältiger Versuchsdurchführung stark von der Kabelführung ab.
- Erklärung:
 - In der Leiterschleife wird gemäß dem Induktionsgesetz ein Ringstrom induziert.
 - Wenn die Voltmeter einen ausreichend großen Innenwiderstand besitzen, ist die Stromstärke an allen Stellen der Leiterschleife gleich groß.
 - Die Spannungen an den Widerständen, *gemessen entlang der Widerstände*, verhalten sich deshalb wie die Widerstände.
 - Werden die Messkabel nicht so geführt, dass von ihnen keine Fläche aufgespannt wird, kann auch in den Messkreisen Induktion stattfinden. Die Spannung entlang des Innenwiderstandes des Messgerätes (das ist der Anzeigewert!) stimmt dann nicht mit der Spannung entlang des zu untersuchenden Widerstandes der Schaltung überein.

8.3 Was messen Voltmeter?

Romers Antwort ist einfach und lehrreich:

A little thought convinces one that the voltmeter reading (call it V^2) is equal to the line integral of \vec{E} , $\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$, where the path of integration passes through the meter, beginning at the red (or “+”) lead and ending at the black (or “-”) lead.

²Wir werden diese Größe mit U_M bezeichnen.



Zur Messung mit einem Voltmeter ohne Induktion (links) und mit Induktion

Folgerung: Der Schluss von der Anzeige eines Voltmeters auf die Schaltung, an die es angeschlossen ist, wird erschwert bzw. unmöglich gemacht, wenn ein sich änderndes Magnetfeld durch die Messmasche greift. Das kann zum Anlass genommen werden, den Messprozess gründlicher zu analysieren. Jedoch wird pragmatisch daraus der Schluss gezogen, einen magnetischen Fluss durch die Messmasche möglichst zu vermeiden. Das ist am einfachsten dadurch zu erreichen, dass die Kabel so geführt werden, dass durch den Messkreis keine Fläche aufgespannt wird. *Bei so geführten Kabeln ist immer klar, entlang welchen Weges die Spannung gemessen wird.*

Bei geschlossenem Schalter leuchtet das Lämpchen, und das Voltmeter zeigt einen positiven Ausschlag (nach rechts).

1. *Was wird das Voltmeter nach Öffnen des Schalters anzeigen?*
2. *Ist die Richtung des Ausschlages vom Windungssinn der Spule abhängig?*
Wenn ja, wie?
3. *Begründen Sie Ihre Vorhersage!*

Literatur

- [1] Backhaus, U., Braun, T., *Der Begriff der elektrischen Spannung und seine Messung in Gegenwart von zeitlich veränderlichen Magnetfeldern*, PhyDid 1/5, 45 (2006)
- [2] Backhaus, U., Berger, R. *Moment mal ... Warum wird der Thomson'sche Ring abgestoßen?*, wird veröffentlicht in PdN
- [3] F. Bauer, *Spannung und EMK (elektromotorische Kraft). Zwei notwendige, unterschiedliche Begriffe.*, Praxis der Naturwissenschaften/Physik 42/4, 28 (1993)
- [4] Buchholz, Ingo; Baer, Norman, *Der Ringversuch von E. Thompson. Messungen und Berechnungen*, PdN/Physik 46/1, 18 (1997)
- [5] Christoph, Claus; Wiznerowicz, Fred, *Das verzwickte Vorzeichen im Induktionsgesetz*, PdN/Physik 42/4, 22 (1993)
- [6] Cornelsen. Oberstufe Physik, Ausgabe E, Cornelsen: Berlin 2001
- [7] Cornelsen. Physik, Oberstufe. Gesamtband, Cornelsen: Berlin 2009
- [8] Backhaus, U. et al., *Fokus Physik, Gymnasium 7-9, Nordrhein-Westfalen*, Cornelsen: Berlin 2010
- [9] F. Herrmann, *Altlasten der Physik*, Aulis: Köln 2002
- [10] I. Hüttl, R. Pelster, *Wie „eigensinnig“ können Voltmeter sein?*, MNU 57/8, 474 (2004)
- [11] Jackson: *Klassische Elektrodynamik*, de Gruyter: 2002
- [12] W. Jung, *Anmerkungen zur Spannungsmessung am Ringstrom.*, Physik und Didaktik 17/4, 331 (1989)
- [13] Klecker, J.; Hauptmann, H.; Herrmann, F., *Zwei Grundversuche zur Induktion - oder doch nur einer*, Vorträge der DPG 1998, 156 (1999)
- [14] Klein, W., *Experimental "paradox in electrodynamics*, Am.J.Phys. 46/6, 603 (1981)
- [15] U. Manthei, P. Täubert, *Zur Induktionsspannung. Eine krit. Betrachtung.*, Praxis der Naturwissenschaften. Physik, 35/6, 24 (1986)
- [16] Marhenke, E., *Induktion, Wirbelströme und Lenzsche Regel*, NiU/Physik 7/44, 32 (1996)
- [17] Texte und Abbildungen aus Metzler und H. Schwarze (private Mitteilung)
- [18] Momm, S., *Das Minuszeichen im Induktionsgesetz*, MNU 65/3, 153 (2012)
- [19] D. R. Moorcroft: *Faraday's Law – Demonstration of a Teaser*, AmJPhys37, 221 (1969)

- [20] Muckenfuß, H., *Vom Induktionsgesetz zum Transformator. Unterrichtsgang zur Bedeutung des Transformators für die elektrische Energieübertragung*, NiU 18/102, 25 (2007)
- [21] Munley, F., *Challenges to Faraday's flux rule*, AmJPhys 72/12, 1478 (2004)
<http://dx.doi.org/10.1119/1.1789163>
- [22] Nicklin, R. C.; Graham, Andrew; Miller, Robert, *Lenz's Law Demonstration for a Large Class*, The Physics Teacher 35/1, 46 (1997)
- [23] R. Pelster, I. Hüttl: *Verblüffende Spannungsmessungen: Experimente zu einem elektrodynamischen Paradoxon*, PhyDid 1/3 (2004), 30
- [24] Pientka, H., *Zur Behandlung des Induktionsgesetzes im Sekundarbereich II des Gymnasiums*, PdN/Physik 38/1, 6 (1989)
- [25] R. H. Romer: *What do „voltmeters“ measure? Faraday's law in a multiply connected region*, AmJPjys 50/12, 1089 (1982)
- [26] Sawicki, Charles A., *A Dynamic Demonstration of Lenz's Law*, The Physics Teacher 35/1, 47 (1997)
- [27] H. Schwarze, *Vorzeichen im Stromkreis*, Praxis der Naturwissenschaften/Physik 46/1, 8 (1997)
- [28] Schwarze, H., *Das Vorzeichen der Induktionsspannung*, PdN/Physik 46/1, 26 (1997)
- [29] H. Schwarze, *Induktionsspannung und Induktionsstrom*, Praxis der Naturwissenschaften/Physik 53/5, 14 (2004)
- [30] Stratmann, B., *Didaktische Ueberlegungen zur Einfuehrung des Induktionsgesetzes auf der Grundlage des Flussbegriffes*, Physik und Didaktik 19/2, 93 (1991)
- [31] Suedbeck, W., *Induktionsspannung - Verschiebungsstrom. Zwei grundlegende Versuche zur Elektrodynamik*, PdN/Physik 42/4, 2, (1993)
- [32] Tipler, P. A., *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Spektrum Verlag: München 2004