

Moment mal ... (8): Warum wird der Thomson'sche Ring abgestoßen?

U. Backhaus u. R. Berger

Der Thomson'sche Ringversuch ist ein bekanntes Experiment, bei dem eine Spule einen auf ihr liegenden Metallring abstößt. Führt man den Versuch mit Wechselstrom durch, so lässt sich die Abstoßung des Rings entgegen weit verbreiteter Auffassung nicht erklären, ohne die Selbstinduktion des Rings zu berücksichtigen. Um den Versuch auf elementare Weise dennoch im Schulunterricht behandeln zu können, wird ein Erklärungsvorschlag unterbreitet, der mit dem Prinzip der Lenz'schen Regel auskommt und dabei die Selbstinduktivität des Rings auf anschauliche Weise berücksichtigt.

1 Einleitung

Ein bekanntes Experiment der Schulphysik besteht darin, dass ein leichter Metallring (häufig aus Aluminium) auf einem Eisenkern in einer Spule nach oben schießt, wenn die Spule an eine Wechselspannung (in der Regel die 230 Volt der Netzspannung) angeschlossen wird (siehe Abb. 1).

Häufig wird zur Erklärung die Lenz'sche Regel herangezogen, nicht selten allerdings in einer nicht zutreffenden Weise etwa in der Form: „Das Magnetfeld des im Ring induzierten Stroms ist so gerichtet, dass es seiner Ursache, also dem Magnetfeld der Spule, entgegenwirkt.“ Diese Erklärung ist so nicht richtig, da die Ursache des Ringstroms nicht das Magnetfeld selbst ist, sondern dessen zeitliche Änderung.

Ein häufig verwendetes Argument ist, dass die Abstoßung während der ersten Viertelperiode dafür verantwortlich sei, dass der Ring den Eisenkern verlässt. Dass sie falsch ist, kann man experimentell einfach demonstrieren: Der Ring wird nicht nur während des Einschaltens abgestoßen, sondern permanent. Wie Jeffery und Amiri [1] experimentell gezeigt haben, umfasst die Zeitspanne, die der Ring zum Verlassen des Eisenkerns benötigt, in aller Regel mehrere Perioden, sodass dieses Argument nicht ausreicht. Wir haben den Versuch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (300 Bilder pro Sekunde) durchgeführt. Abb. 1 zeigt, dass der Ring nach 80 ms den Eisenkern verlässt. Das ist die Länge von vier Perioden des Wechselstroms.

2 Das Problem

Um die Wechselwirkung zwischen Spule und Ring zu verstehen, müssen wir uns

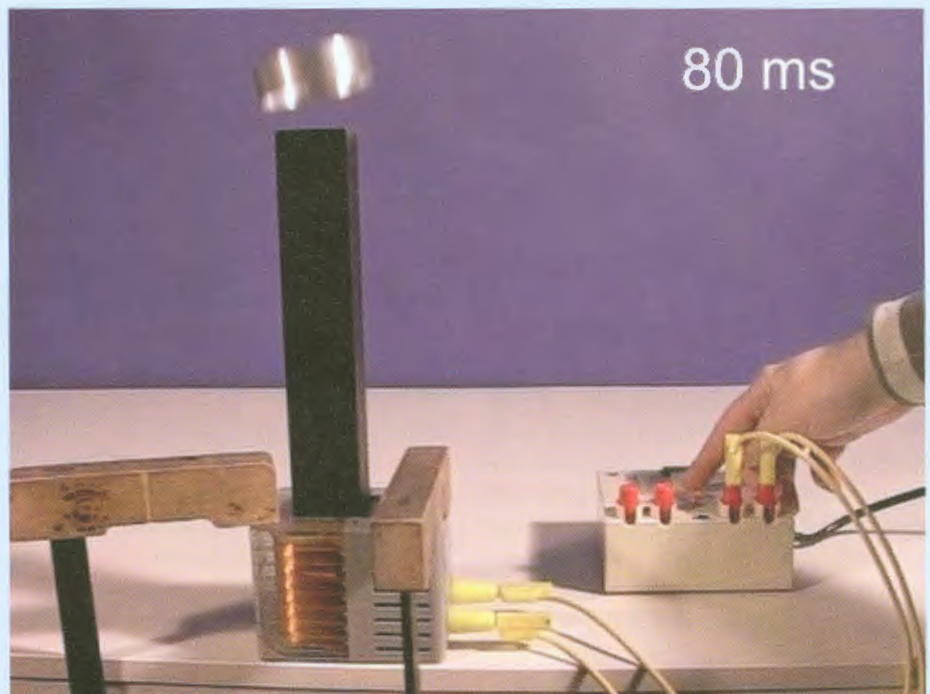


Abb. 1: Thomson'scher Ringversuch mit Wechselspannung. Nach dem Schließen des Schalters wird der Ring nach oben geschossen. Der Versuch wurde mit 300 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Dargestellt ist die Situation nach 80 ms.

überlegen, wie das Magnetfeld B_R gerichtet ist, das durch den im Ring induzierten Strom entsteht. In Abb. 2 ist dazu der zeitliche Verlauf des Stroms I_S in der Spule und damit des Magnetfelds B_S der Spule dargestellt. Dem Diagramm und den folgenden Argumentationen liegt folgende Vorzeichenvereinbarung zugrunde:

In Spule und Ring erzeugen Ströme mit $I > 0$ ein nach oben gerichtetes Magnetfeld, für das wir $B > 0$ schreiben.

Da es sich um Wechselstrom handelt, müssen die vier Phasen jeder Periode ge-

trennt betrachtet werden. In Phase 1 nimmt das Magnetfeld B_S der Spule zu, seine Änderung dB_S/dt ist positiv. Nach der Lenz'schen Regel fließt der im Ring induzierte Strom I_R so, dass das von ihm erzeugte Magnetfeld seiner Ursache, also der zeitlichen Änderung des Spulenmagnetfeldes, entgegen gerichtet ist. Deshalb ist der im Ring induzierte Strom I_R und somit auch sein Magnetfeld B_R negativ. Daher haben die Magnetfelder von Ring und Spule entgegengesetzte Richtung: Die Spule hat ihren Nordpol oben, der Ring unten (siehe Abb. 2, Phase 1). Ring und

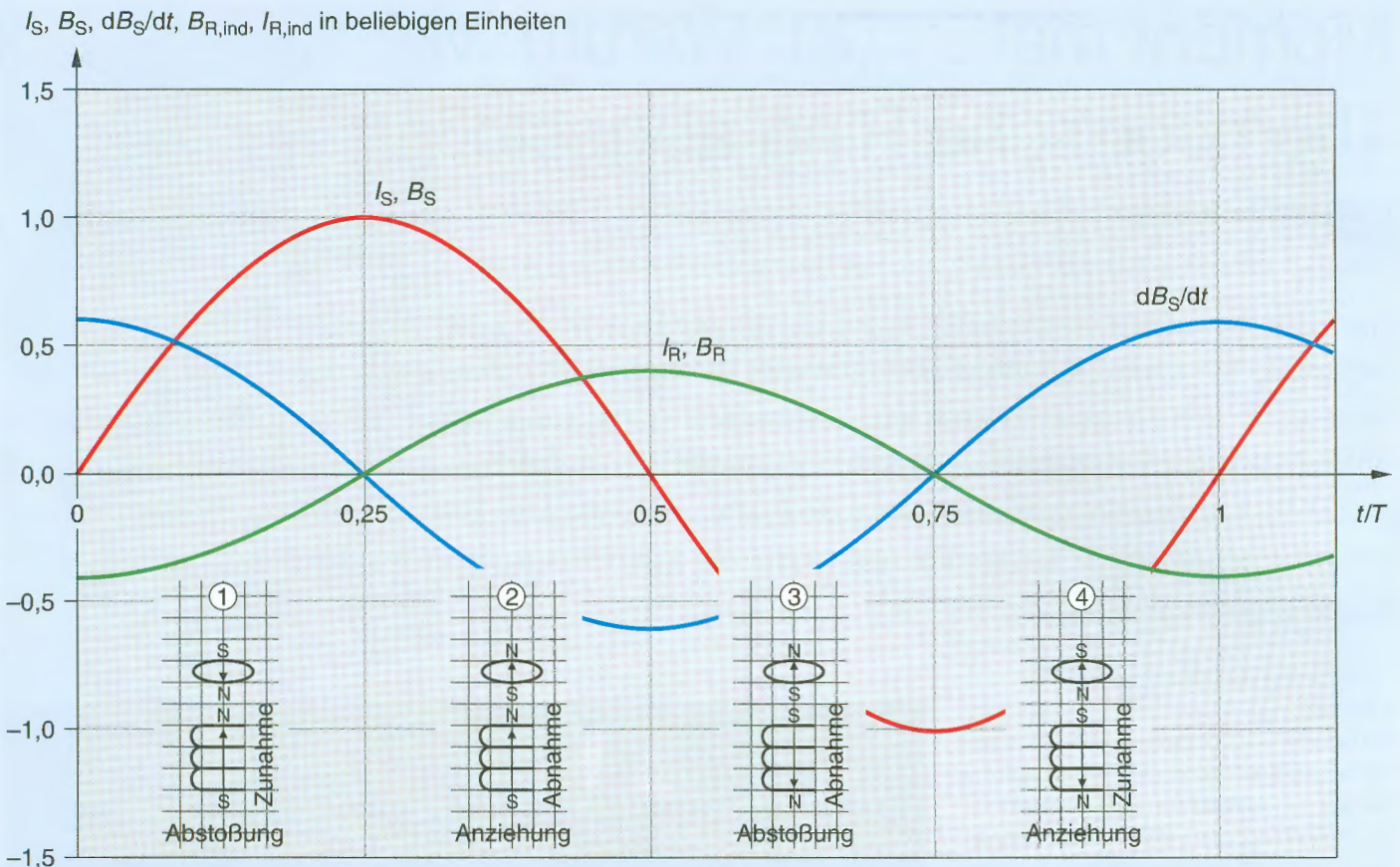


Abb. 2: Darstellung der vier Phasen einer Periode des elektrischen Stroms I_S in der Spule bzw. ihres Magnetfelds B_S (Rot), Die zeitliche Änderung des Spulenmagnetfeldes dB_S/dt ist blau gezeichnet. Die grüne Linie zeigt den im Ring induzierten Strom I_R und sein Magnetfeld B_R . Zur Verdeutlichung sind die Polungen der Magnetfelder in den vier Phasen angedeutet.

Spule stoßen sich deshalb nach der „Polregel“ für Magnetpole ab.

In Phase 2 der Abbildung 2 ist das Magnetfeld B_S der Spule nach wie vor nach oben gerichtet. Es nimmt nun aber ab, seine Änderung dB_S/dt ist also negativ. Aufgrund der Lenz'schen Regel ist nun das Magnetfeld B_R des Ringes so gerichtet, dass es dieser Abnahme entgegen wirkt. B_R und I_R sind also positiv. Die beiden Magnetfelder B_S und B_R sind somit gleich gerichtet, sodass sich Spule und Ring anziehen (siehe Abb. 2, Phase 2).

Analog kann begründet werden, dass sich Spule und Ring in Phase 3 wieder abstoßen und in Phase 4 wieder anziehen.

Insgesamt kommt es innerhalb einer Periode des Wechselstroms in der Spule in zwei Viertelperioden zur Anziehung und in den beiden anderen zur Abstoßung zwischen Spule und Ring. Über eine Periode gemittelt wird daher keine Kraft auf den Ring ausgeübt. Aufgrund des bisher behandelten Induktionseffektes wird der Ring überhaupt nicht abgestoßen.

3 Erklärung der Abstoßung

Warum wird der Ring trotzdem abgestoßen? Zur Klärung dieser Frage müssen wir unsere bisherige Argumentation lediglich

einen Schritt weiterführen: Auch das vom Ringstrom erzeugte Magnetfeld B_R ist ein Wechselfeld. Durch seine Änderung wird ein zusätzlicher Strom $I_{R,ind}$ im Ring erzeugt. Diesen Vorgang nennt man Selbstinduktion.

Wir wollen jetzt die Wechselwirkung untersuchen, die durch diesen zusätzlichen Ringstrom hervorgerufen wird.

In Abb. 3 sind der Spulenstrom I_S und das durch ihn induzierte Magnetfeld B_R des Ringes in gleicher Weise wie in Abb. 2 dargestellt. Durch die zeitliche Änderung des Ringmagnetfeldes dB_R/dt (gelb dargestellt) werden nun ein zusätzlicher Strom $I_{R,ind}$ und damit ein zusätzliches Magnetfeld $B_{R,ind}$ induziert. Ihren zeitlichen Verlauf kann man sich mit denselben Argumenten wie in Abschnitt 2 überlegen: $B_{R,ind}$ und dB_R/dt haben nach der Lenz'schen Regel über die gesamte Periode verschiedene Vorzeichen. Daraus ergibt sich, dass das durch Selbstinduktion erzeugte Ringmagnetfeld $B_{R,ind}$ und das Magnetfeld B_S der Spule während der ganzen Periode entgegengesetzt gepolt sind. Spule und Ring stoßen sich deshalb aufgrund der Polregel in allen vier Phasen ab. Damit ist die Ursache für die permanente Abstoßung zwischen Spule und Ring gefunden.

4 Schlussfolgerung

Der im Ring induzierte Strom besteht aus zwei Anteilen: Der durch die Änderung des Magnetfeldes der Spule hervorgerufene Anteil I_R führt zu einem periodischen Wechsel zwischen Anziehung und Abstoßung mit doppelter Netzfrequenz. Dieser Wechsel führt im zeitlichen Mittel zu keiner Wechselwirkung zwischen Spule und Ring. Der zweite Anteil $I_{R,ind}$ wird durch die zeitliche Änderung des Ringmagnetfeldes selbst erzeugt. Dieser Anteil hat immer ein vom Spulenstrom verschiedenes Vorzeichen. Das von ihm erzeugte Magnetfeld ist daher so gerichtet, das sich Spule und Ring permanent, allerdings mit periodisch wechselnder Stärke, abstoßen. Je kleiner der ohmsche Widerstand des Ringes ist, desto größer sind die durch Selbstinduktion hervorgerufenen Effekte, desto stärker wird deshalb auch der Ring abgestoßen.

5 Ergänzung: Induktivität und Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke

Wenn Wechselstromwiderstände und die bei ihnen auftretenden Phasenverschiebungen zwischen Stromstärke und Spannung bekannt sind, kann eine andere Argumentation verwendet werden, um die

$I_S, B_S, dB_R/dt, B_{R,ind}, I_{R,ind}$ in beliebigen Einheiten

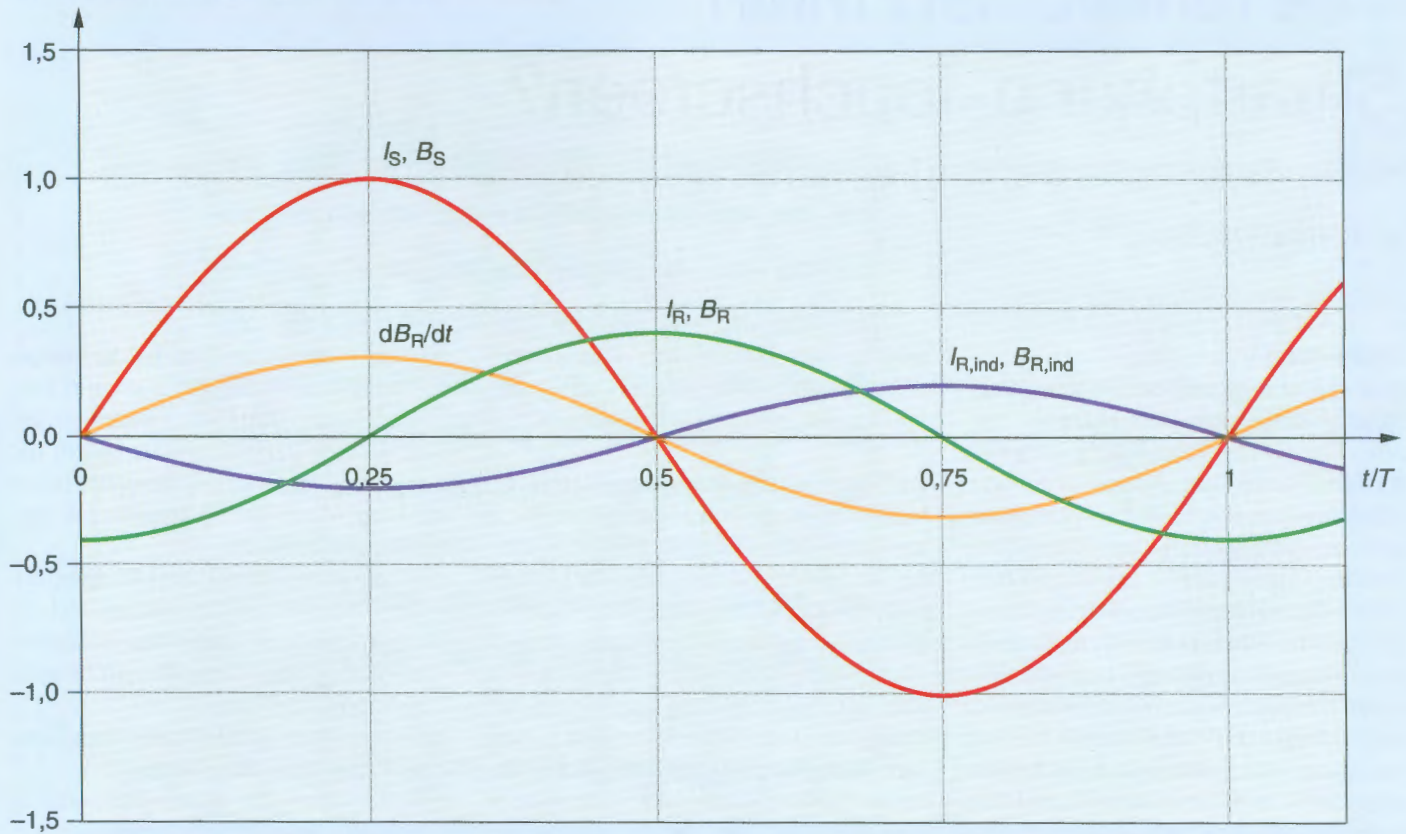


Abb. 3: Die Magnetfelder und Ströme von Spule und Ring sind wie in Abbildung 2 gezeichnet. Durch die zeitliche Änderung des Ringmagnetfeldes (Gelb) wird ein zusätzlicher Strom $I_{R,ind}$ im Ring induziert, der ein zusätzliches Magnetfeld $B_{R,ind}$ erzeugt (violette Linie).

Abstoßung zwischen Spule und Ring zu erklären:

Der Ring stellt eine „Spule“ mit einer Windung dar; er hat deshalb nicht nur einen ohmschen, sondern auch einen induktiven Widerstand. Das führt dazu, dass der Wechsel der Stromstärke gegenüber dem der Spannung zeitlich verzögert ist. Der zeitliche Verlauf des Ringstroms in Abb. 2 muss auf der Zeitachse also nach rechts verschoben werden – im Extremfall eines vernachlässigbaren ohmschen Widerstandes um eine Viertelperiode. Mithilfe von Abbildung 2 kann man sich klar machen, dass in diesem Extremfall der Ringstrom dazu führt, dass sich Spule und Ring ständig abstoßen.

Realistisch sind Phasenverschiebungen von einigen zehn Grad [2+3]. Weder der ohmsche, noch der induktive Widerstand des Rings ist also vernachlässigbar. Eine Berechnung der beiden Anteile findet sich in Saslow [3].

Der Zusammenhang zwischen den beiden Argumentationen in den Abschnitten 3 bzw. 5 kann folgendermaßen hergestellt werden: In Abb. 3 ist $I_R \sim -\cos(\omega t)$ und $I_{R,ind} \sim -\sin(\omega t)$. Einen um den Winkel α phasenverschobenen Strom im Ring kann man wegen

$$\begin{aligned} &-\cos(\omega t - \alpha) \\ &= -\cos\alpha \cos(\omega t) - \sin\alpha \sin(\omega t) \\ &\sim I_R + I_{R,ind} \end{aligned}$$

entsprechend der Argumentation in Abschnitt 3 als Überlagerung der beiden im Ring erzeugten Ströme interpretieren, deren Amplituden sich wie $\sin\alpha/\cos\alpha$ verhalten. Der Selbstinduktionsstrom $I_{R,ind}$ ist also um den Tangens der Phasenverschiebung kleiner als der durch die Änderung des Magnetfeldes der Spule erzeugte Ringstrom I_R , im Falle einer Phasenverschiebung von z. B. 30° um den Faktor 0,58.

6 Fazit

Wir können festhalten, dass der Thomson'sche Ringversuch allein mit der Lenz'schen Regel bzw. dem Induktionsgesetz verstanden werden kann. Dazu muss allerdings die Argumentation, die die Entstehung des Ringstroms durch die zeitliche Änderung des Spulenstroms erklärt und zunächst zu einem Widerspruch zum Experiment führt, ein weiteres Mal angewendet und um den Effekt der Selbstinduktion erweitert werden. Wenn die Schülerinnen und Schüler die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom bei

induktiven Widerständen aus dem Vorunterricht bereits kennen, stellt der Ringversuch eine eindrucksvolle Anwendung dar. ■

Literatur

- [1] Jeffery, R. N. u. Amiri, F.: *The phase shift in the jumping ring*. *The Physics Teacher*, 46 (2008), S. 350-357.
 [2] Quinton, A. R.: *The ac repulsion demonstration of Elihu Thomson*. *The Physics Teacher* (1979), S. 40-42.
 [3] Saslow, W. M.: *Electromechanical implications of Faraday's law: A problem collection*. *American Journal of Physics* 55 (11) (1987), S. 986-993.

Danksagung

Wir danken Daniel Schwarz für die Durchführung und Dokumentation des Experiments.

Anschrift der Verfasser

Prof. i.R. Dr. Udo Backhaus, Fakultät für Physik der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, Didaktik der Physik, 45117 Essen
 E-Mail: udo.backhaus@uni-due.de
 Prof. Dr. Roland Berger, Universität Osnabrück, Fachbereich Physik / Didaktik der Physik, Barbarastraße 7, 49076 Osnabrück
 E-Mail: r.berger@uni-osnabrueck.de