

Thomsonscher Ringversuch mit berührungssicherer Spannung

Felix Waschke *, Andreas Strunz * und Jan-Peter Meyn *

*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

Kurzfassung

Der Thomsonsche Ringversuch wird gern zur Veranschaulichung der Regel von Lenz durchgeführt, und zwar mit lebensgefährlicher Netz- bzw. Hochspannung, um imposante Abschusshöhen zu erreichen. Da es nur auf die zeitliche Änderung der Magnetisierung des Transformator-kerns ankommt, haben wir das Experiment für berührungssichere Spannung mit großer Stromstärke optimiert. Mit einem Elektrolytkondensator, der über einen Thyristor geschaltet wird, liegt die maximale Stromstärke in der Spule bei 25,8kA. Mit 15V Kondensatorspannung erreichten wir die Decke in 2,6m Höhe, bei 60V fliegt der Ring bis zu 11 Meter hoch.

1. Einleitung

Der Thomson'sche Ringversuch ist schon lange Gegenstand didaktischer Überlegungen [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Ursprünglich wurde das Experiment von seinem Erfinder Thomson gezeigt, um die Anwendbarkeit von Wechselstrom zu zeigen; seinerzeit war Gleichstrom für technische Anwendungen vorherrschend. Heute wird das Experiment vor allem zur Demonstration genutzt, dass ein veränderliches Magnetfeld einen Strom im Ring induziert, dessen Magnetfeld dem ursprünglichen Feld entgegengerichtet ist. Es gibt sicher Experimente aus dem Umfeld der Lenz'schen Regel, die leichter und eindeutiger zu interpretieren sind. Der Ringversuch wird vor allem gezeigt, um das Gemüt zu erregen. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 1 skizziert.

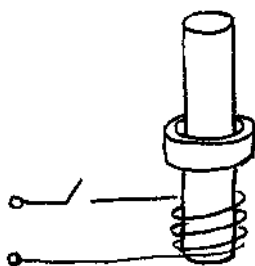


Abb. 1: Thomson'scher Ringversuch. Ein zeitlich veränderlicher Strom durch die Spule magnetisiert den zylindrischen Eisenkern und induziert einen Strom im Aluminiumring, welcher nach oben geschleudert wird.

Eines der technischen Probleme des Versuches ist die Schwierigkeit, eine beeindruckende Flughöhe zu erreichen, ein anderes die Sicherheit. Die Verwen-

dung von Netzspannung ist die Regel, es gibt aber noch gefährlichere Versuche mit Hochspannungskondensatoren. Wir kombinieren mehrere, teilweise schon bekannte Optimierungen und nutzen aus, dass die Gesamtverbesserung das Produkt der einzelnen Beiträge ist. Die elektrische Sicherheit wird dadurch gewährleistet, dass die Spannung auf einen berührungssicheren Wert begrenzt bleibt und statt dessen die Magnetisierung des Eisenkerns durch Vergrößerung der Stromstärke erhöht wird.

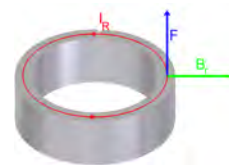


Abb. 2: Resultierende Kraft auf Ring

2. Funktionsprinzip

Beim Einschalten steigt der Spulenstrom schnell an. Der zunehmende magnetische Fluss Φ induziert im Ring einen Strom I_R . Die Radialkomponente B_r des Feldes um den Eisenkern führt zu einer Lorentzkraft in axialer Richtung. Diese Kraft ist monoton wachsend mit $I_R \cdot B_r$. Das Feld B_r ist proportional zum Spulenstrom I und der induzierte Ringstrom ist proportional zur Änderung des magnetischen Flusses, also zur Änderung des Spulenstroms, \dot{I} . Die Kraft steigt also mit dem Produkt $I \cdot \dot{I}$.

3. Berührungssichere Spannung

Fragen zur elektrischen Sicherheit sind in der Norm DIN EN 61010-1 geregelt. Demnach gilt eine Gleichspannung bis 70V und eine Wechselspannung bis $33V_{eff}$ noch als berührungssicher. Damit ist die Spannung U festgelegt. Die Stromstärke I kann durch

Verringerung des Spulenwiderstand R erhöht werden, denn

$$U = RI. \quad (1)$$

4. Elektrizitätsquelle

Als Elektrizitätsquelle wird ein geladener Elektrolyt-Kondensator 450mF/63V [11] verwendet. Elektrolyt-kondensatoren dieser Größe vertragen Stromstärken im Bereich 10^4 A, sie sind also bei gegebener Spannung die leistungsfähigste Lösung. Wie unten ausgeführt wird, muss der Magnetisierungsstrom nur für einen kurzen Zeitraum fließen, weil die Beschleunigungsphase des Ringes nach etwa 0,01s beendet ist.

Bei der Entladung des Kondensators ist eine Überhitzung der Spule ist ausgeschlossen. Darin unterscheidet sich dieser Aufbau von den Vorschlägen mit Wechselspannung, die oft über einen mechanischen Schalter am Netz realisiert sind und auf die Netzsicherung zurückgreifen, die für die üblichen Spulen aber viel zu groß dimensioniert ist.

5. Optimierung

Es ist das Ziel, bei gegebener Maximalspannung eine möglichst große Höhe beim Abschuss des Ringes zu erreichen. Das Ziel ist im Einklang damit, dass man für eine moderate Höhe, z.B. Zimmerdecke, die Spannung möglichst klein haben möchte. Siebzig Volt sind zwar berührungssicher, aber nicht berührungsgenehm. Die Optimierung des Versuches besteht aus mehreren Einzelschritten, deren Gesamtgewinn als Produkt der Einzelgewinne erscheint. Daher lohnen sich auch unscheinbare Verbesserung im Bereich 10%-20%.

Als Ausgangspunkt für die Skalierung des Experiments wird der Durchmesser des Eisenkerns nach ästhetischen Gesichtspunkten gewählt. Der Durchmesser 30mm ist einerseits in der Schule leicht handzuhaben und andererseits in großen Hörsälen gut sichtbar.

5.1. Magnetfeld

Die Magnetisierung des Eisenkerns erfolgt über das Feld H der Spule der Länge l mit N Windungen gemäß

$$H = \frac{NI}{l}. \quad (2)$$

Diese Formel wird oft so gelesen, dass viele Windungen vorteilhaft seien, aber damit steigt auch der Widerstand. Es macht für das Produkt NI keinen Unterschied, ob die einzelnen Wicklungen in Reihe oder parallel geschaltet sind. Zur Minimierung des Widerstands ist die Parallelschaltung viel günstiger, also nimmt man bei gegebener Spannung eine Spule mit wenigen Windungen und dickem Draht. Das kann man nicht beliebig weit treiben, weil bei sehr kleiner

Windungszahl die parasitären Widerstände im Stromkreis dominant werden. Dazu zählen der Innenwiderstand der Elektrizitätsquelle, der Schalter, die Zuleitungen und die Kontakte bei Schraubverbindungen.

Nachdem der prinzipielle Weg physikalisch erfasst ist, erfolgt die eigentliche Optimierung durch Probieren. Als Ergebnis erhalten wir eine Spule aus 4mm Kupferrunddraht mit 10 Windungen.

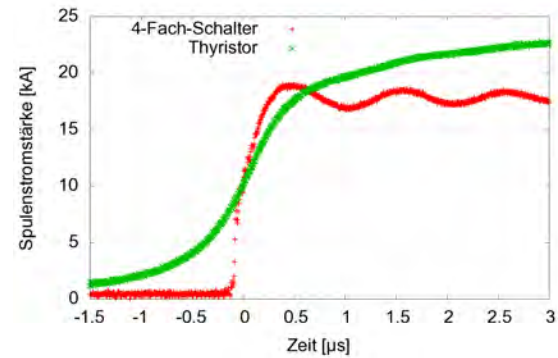


Abb. 3: Vergleich der Schaltflanken eines mechanischen 4-fach-Schalters mit Thyristor.

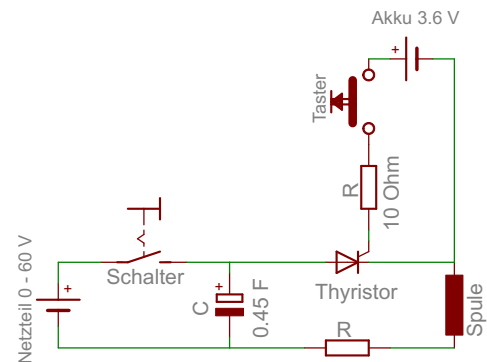


Abb. 4: Stromkreis aus Spule und Kondensator; mit Thyristor-Schalter und Stromquelle für dessen Gate.

5.2. Schalter

Die Stromstärke kann kurzzeitig auf 30kA anwachsen. Normale Schalter werden zerstört; das ist der Preis für die geringe Spannung, die den Kontaktwiderstand stärker ins Gewicht fallen lässt. Es gibt mechanische Schalter, die solche Stromspitzen aushalten, z.B. Drehstromschalter, deren vier Pole parallel geschaltet werden. Besser ist ein Halbleiterschalter. Der Thyristor wirkt wie eine Diode, dessen Widerstand in Durchlassrichtung durch Strominjektion in das sogenannte Gate gesteuert wird. Für Leistungsanwendungen gibt es Thyristoren, die kurzzeitig eine Stromstärke im Bereich 10kA bis 100kA schalten

können. Wir verwenden den Typ SKET 330/12 von Semikron [12]. Der Thyristor ist nicht nur dauerhaft, sondern hat auch elektrische Vorteile. Die ansteigende Schaltflanke ist langsamer, aber gleichmäßiger und die Maximalstromstärke ist höher, siehe Abbildung 3. Dadurch ist der Impulsübertrag auf den Ring um 80% größer. Für Einzelheiten vgl. [13].

5.3. Widerstand

Der Widerstand der Spule wird aus der Leitfähigkeit des Kupferrunddrahtes berechnet zu $1,3\text{m}\Omega$. Aus der Spannung über der Spule wird der parasitäre Widerstand außerhalb der Spule zu $1\text{m}\Omega$ abgeschätzt. Dieser Wert ist deutlich niedriger als die Summe der Spezifikationen für Thyristor und Innenwiderstand des Kondensators, weil Spezifikationen immer Maximalwerte angeben. Der Beitrag der Zuleitungen zum parasitären Widerstand beträgt etwa $0,25\text{m}\Omega$, der Rest teilt sich auf Thyristor, Kondensator und Schraubverbindungen auf.

5.4. Schwingkreis

Der Kondensator und die Spule bilden einen Schwingkreis. Normalerweise sind Kombinationen von sehr großen Kapazitäten mit schulüblichen Spulen überkritisch gedämpft. Im vorliegenden Fall führt die konsequente Reduzierung des Widerstands jedoch dazu, dass Schwingungen möglich sind. Der Kondensator ist aber empfindlich gegen Verpolung, so dass die Schwingung unterbunden werden muss. Da der Thyristor in durchgeschaltetem Zustand eine Diode ist, wird das Durchschwingen wirkungsvoll unterbunden.

5.5. Mechanische Stabilität

Die Spule aus 4mm Runddraht scheint auf den ersten Blick mechanisch stabil zu sein. Tatsächlich wird sie aber aufgrund des starken, veränderlichen Magnetfeldes erheblich verformt. Der Impulsübertrag von der Apparatur auf den Ring wird dadurch vermindert. Durch die Kompression der Spule mit einer Plexiglasplatte und Messingschrauben wird die Schußhöhe um etwa 35% gesteigert.

5.6. Ringdimension

Auf den ersten Blick ist die Dimension des Ringes unkritisch, denn der Querschnitt ist proportional zur Masse und zur Stromstärke. Zu groß darf der Querschnitt natürlich nicht werden, weil dann der Ring als Sekundärspule auf dem Eisenkern den Strom in der Primärspule hemmt, oder anders betrachtet: Die Energie im Kondensator hat einen festen Wert, und riesige Ringe können aufgrund des Energieerhaltungssatzes nicht sehr hoch fliegen. Auf der anderen Seite wird der Luftwiderstand bei sehr leichten Ringen dominant. Neben diesen grundsätzlichen Grenzen gibt es noch technische Aspekte. Der Innendurchmesser soll für eine gute induktive Kopplung möglichst klein sein, aber der Ring darf während der

Beschleunigungsphase nicht auf dem Kern verankert. Empirisch hat sich der Innendurchmesser 35mm bei 30mm Kerndurchmesser als optimal erwiesen. Die beste Wandstärke ist 5mm; dünnere Ringe geraten leicht in Rotation und steigen dann nicht senkrecht auf. Die Höhe hat nur wenig Einfluss, wobei 15mm ein guter Wert ist. Die Masse eines Ringes mit den optimalen Dimensionen ist 27g. Der Gewinn an Flughöhe des besten Ringes zu Ringen mit geratenen Dimensionen ist etwa ein Faktor 2.

5.7. Leitfähigkeit des Rings

Aluminium ist das beste Material für den Ring, da der Quotient aus Leitfähigkeit σ und Dichte ρ am größten ist. Die Ringe wurden aus homogenem Rundmaterial gedreht, nicht aus Rohr, da letzteres möglicherweise erhöhten Widerstand an einer Schweißnaht haben könnte. Aluminium für technische Anwendung hat aufgrund der Legierungsbestandteile eine kleinere Leitfähigkeit. Die von uns verwendete Legierung EN-AW 2007 hat $\sigma = 22 \cdot 10^6 \Omega\text{m}^{-1}$ gegenüber $\sigma = 37 \cdot 10^6 \Omega\text{m}^{-1}$ für reines Aluminium, aber der Quotient ρ/σ bleibt größer als bei Kupfer und Silber.

Die Leitfähigkeit kann durch Tempern vergrößert werden. Wird das Material längere Zeit auf 350°C erwärmt, so bilden sich größere Al_2Cu Kristalle in einer relativ reinen Aluminium-Matrix. Die mechanischen Eigenschaften leiden darunter, aber das ist für unsere Anwendung unwichtig. Ringe gleicher Dimension wurden bei unterschiedlichen Temperaturen für 6 Stunden getempert und dann im ausgeschalteten Ofen abgekühlt. Die besten Resultate erhalten wir bei 350°C , höhere Temperaturen bringen keinen Vorteil. Der Gewinn an Schusshöhe ist 53%.

5.8. Eisenkern

Der Durchmesser des Eisenkerns war, wie schon in der Einleitung gesagt, Ausgangspunkt der Dimensionierung des gesamten Experiments. Ändern kann man die Länge, die Legierung und ggf. die innere Struktur. Die Länge des Kerns muss zur Dauer der Beschleunigungsphase passen, welche wiederum durch die Entladungsdauer des Kondensators bestimmt wird. Bei großer Flughöhe ist die Beschleunigungsphase kürzer. Es gibt insofern keinen festen Wert für die Kernlänge, so dass ein brauchbarer Wert, nämlich 300mm, durch Probieren gefunden wurde. Auf der Höhe 5mm bis 40mm befindet sich die Spule, darüber 3mm für die Ringauflage, so dass der überstehende Teil des Kerns 257mm beträgt.

Unser Kern ist aus dem leicht verfügbaren Baustahl St37 (S235JR+AR) gefertigt. Die Sättigungsmagnetisierung beträgt 2,1T. Die Aufgabe des Kerns ist weniger die Erhöhung der Maximalfeldstärke, sondern primär die Formung des Feldes. Außerhalb des Kerns ist das Feld fast radial, was für die Beschleunigung durch Lorenz-Kraft optimal ist. Ein leichtes Anspitzen erhöht die Feldstärke im

oberen Bereich, aber der Gewinn von 5% rechtfertigt nicht die Fertigung eines speziellen Drehteils an Stelle des abgeschnittenen Rundmaterials.

Verschieden Autoren haben vorgeschlagen, den Kern zur Minimierung von Wirbelströmen aus isolierten Eisendrähten zu fertigen. Dabei wird allerdings die mittlere Dichte des Eisens stark reduziert. In unserem Aufbau überwiegt der Vorteil des massiven Eisens bei Weitem.

Auch das Eisen verändert seine mechanischen und magnetischen Eigenschaften bei Temperaturbehandlung. Schon das Tempern bei moderaten Temperaturen um 450°C verbessert die Schusshöhe um 20%, eine weitere Temperaturerhöhung auf 750°C bringt nur noch wenige Prozent zusätzlich. Bei Neubau eines Experiments kann der Eisenkern zusammen mit dem Aluminiumring bei 350 °C bis 450°C getempert werden.

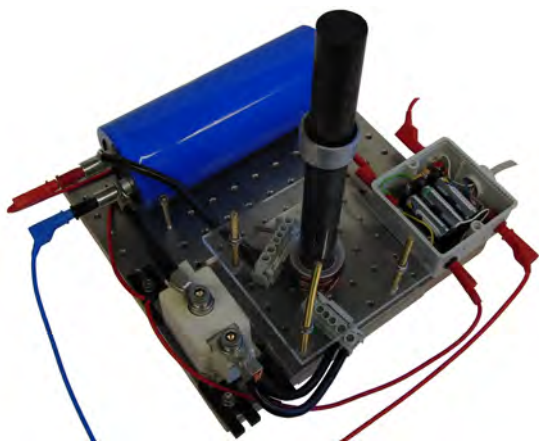


Abb. 5: Thomson'scher Ringversuch. Der Elektrolytkondensator 450mF/63 V ist der blaue Zylinder, das Ladegerät ist nicht im Bild. Der Thyristor links unten ist nicht größer als die Batterie für den Gate-Strom, rechts.

6. Zusammenfassung

Der Thomson'sche Ringversuch kann mit berührungssicherer Spannung betrieben werden, in dem der elektrische Widerstand der Spule minimiert wird. Ein Kondensator wird über die Magnetspule entladen. Als Schalter dient ein Thyristor, der bis zu 30kA Stromstärke schalten kann und zudem die Oszillation des Schwingkreises unterbindet. Der Strom kann aufgefasst werden als erste Halbwelle des Wechselstroms eines Schwingkreises; weitere Oszillationen sind unnötig, weil der Ring den Kern bereits verlassen hat. Die Kombination einer Vielzahl von kleineren Optimierungsschritten ergibt eine Steigerung der Schusshöhe um mindestens eine Größenordnung gegenüber einem Standardaufbau. Bei 60V Spannung wird eine Schusshöhe von zehn Metern zuverlässig erreicht. Für Demonstrationen im Klassenzimmer

reicht eine Spannung von weniger als 20V, um die Zimmerdecke zu erreichen. Der Versuchsaufbau passt auf eine kleine Grundplatte 30cm×45cm, siehe Abbildung 5.

7. Literatur

- [1] E. J. Churchill and J. D. Noble. A demonstration of lenz' law? *American Journal of Physics*, 39(3):285–287, 1971.
- [2] D J Sumner and A K Thakkrar. Experiments with a 'jumping ring' apparatus (undergraduate exercise). *Physics Education*, 7(4):238, 1972.
- [3] J M Bostock-Smith. The jumping ring and lenz's law – an analysis. *Physics Education*, 43(3):265, 2008.
- [4] P J Ford and R A L Sullivan. The jumping ring experiment revisited. *Physics Education*, 26(6):380, 1991.
- [5] Carl S. Schneider and John P. Ertel. A classroom jumping ring. *American Journal of Physics*, 66(8):686–692, 1998.
- [6] Paul J. H. Tjossem and Victor Cornejo. Measurements and mechanisms of thomson's jumping ring. *American Journal of Physics*, 68(3):238–244, 2000.
- [7] Paul Tanner, Jeff Loebach, James Cook, and H. D. Hallen. A pulsed jumping ring apparatus for demonstration of lenz's law. *American Journal of Physics*, 69(8):911–916, 2001.
- [8] Rondo N. Jeffery and Farhang Amiri. The phase shift in the jumping ring. *The Physics Teacher*, 46(6):350–357, 2008.
- [9] M Baylie, P J Ford, G P Mathlin, and C Palmer. The jumping ring experiment. *Physics Education*, 44(1):27, 2009.
- [10] Paul J. H. Tjossem and Elizabeth C. Brost. Optimizing thomson's jumping ring. *American Journal of Physics*, 79(4):353–358, 2011.
- [11] Elektrolytkondensator Typ GM, hergestellt von FTCAP GmbH, Nedderweg 10, 25813 Husum, Germany. www.ftcap.de.
- [12] Semikron, 2012. Thyristor SKET 330/12, hergestellt von SEMIKRON Elektronik GmbH & Co. KG, Sigmundstrasse 200, 90431 Nürnberg. www.semikron.de.
- [13] Felix Bruno Waschke. *Aufbau und Optimierung des Thomsonschen Ringversuchs mit berührungssicherer Spannung*. Zulassungsarbeit für das erste Staatsexamen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2012.