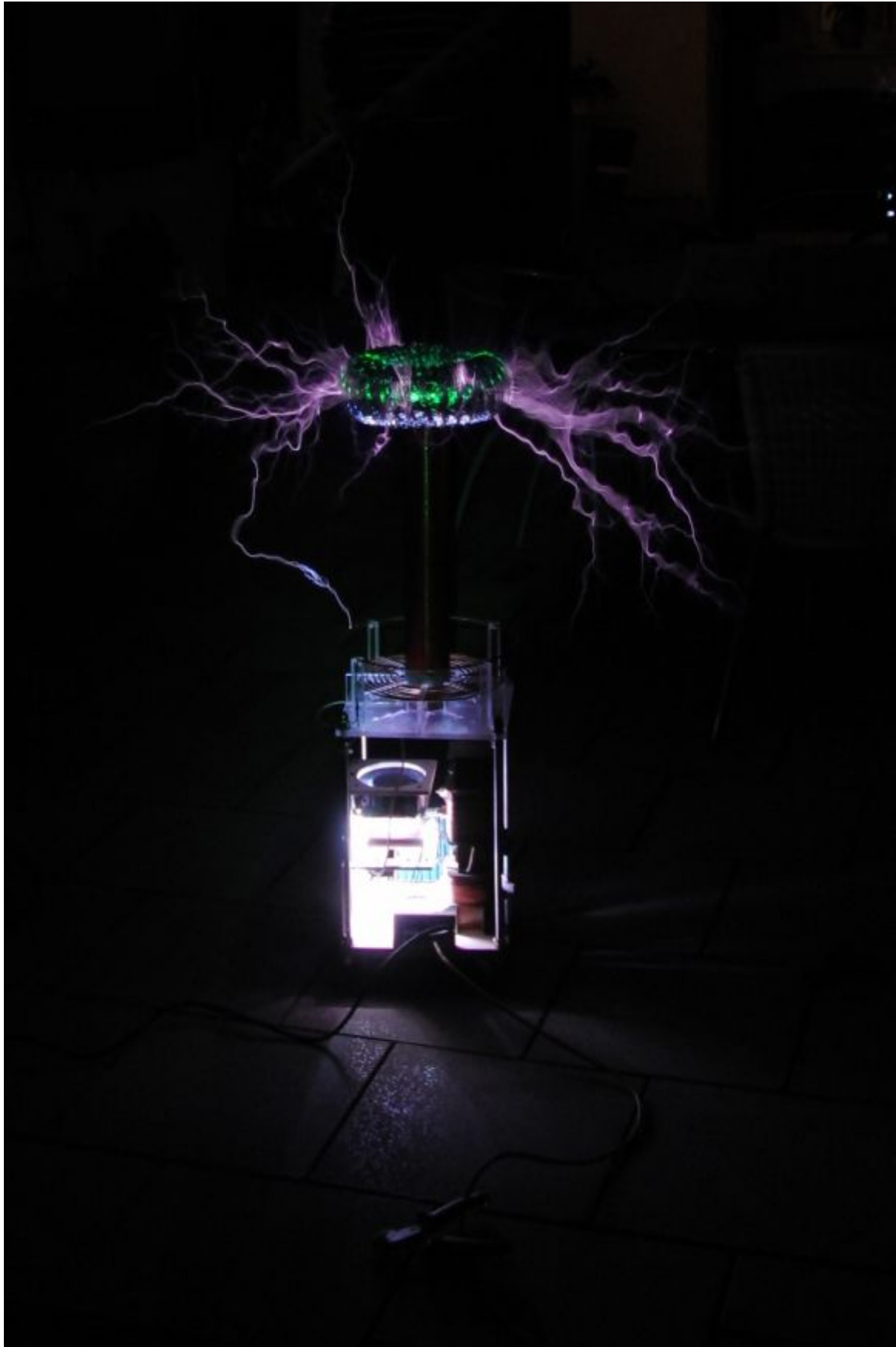


Tesla-Transformator



Jochen Rohm, Berufliches Gymnasium Elektrotechnik
Projektbericht, 20.11.10

Inhaltsverzeichnis:

1. Was ist eine Teslaspule
 - 1.1 Sinn und Zweck einer Teslaspule

2. Theorie einer Teslaspule
 - 2.1 Was ist ein Schwingkreis
 - 2.2 Resonanz
 - 2.3 Der Teslatrafo
 - 2.4 Sekundärkreis
 - 2.5 Primärkreis
 - 2.6 Funktionsprinzip
 - 2.7 Leistungsanpassung
 - 2.8 Entladungen
 - 2.9 Warum in Resonanz?
 - 2.10 Ausgangsspannung

3. Bau einer Teslaspule
 - 3.1 Grundlegende Bearbeitung von Holz und Plexiglas
 - 3.1.1 Holz
 - 3.1.2 Plexiglas
 - 3.2 Werkzeug
 - 3.3 Bauanleitung
 - 3.4 Vorbereitung
 - 3.5 Planung der Grundplatte
 - 3.6 Bohrungen
 - 3.7 Funkenstrecke
 - 3.8 Primärkondensator
 - 3.9 Trafo
 - 3.10 Gewindestangen
 - 3.11 Primärspule
 - 3.12 Sekundärspule
 - 3.13 Topload
 - 3.14 Verkabelung

4. "Pimp my Teslacoil"
 - 4.1 LC - Tuning
 - 4.2 Funkenstrecken - Tuning

5. Versuche
 - 5.1 Energieübertragung
 - 5.2 Plasma
 - 5.3 Gasentladungslampen

6. Gefahren
 - 6.1 Lichtbögen
 - 6.2 Teslatrafos

7. Quellen

1. Was ist eine Teslaspule

Eine Teslaspule ist ein Impulshochspannungstransformator, der nach seinem Erfinder Nikola Tesla (* 10. Juli 1856; † 7. Januar 1943) benannt ist. Er dient zur Erzeugung hochfrequenter Wechselspannung.

Eine Teslaspule besteht grundlegend aus 2 Kreisen, sogenannten Schwingkreisen. Diese beiden Schwingkreise sollten im Optimalfall auf der selben Eigenfrequenz schwingen.

1.1 Sinn und Zweck einer Teslaspule

Nikola Tesla wollte mit diesem "Transformator" zwei Dinge erreichen.

1.) Im Laufe seines Lebens von Nikola Tesla entwickelte sich zwischen ihm und Thomas Alva Edison der sogenannte "Stromkrieg". Edison wollte seinen Gleichstrom verbreiten, der in seinen Augen auch weniger gefährlich war als Teslas Wechselstrom. Edison lies, im Laufe des "Krieges", mehrere Tiere durch Wechselstrom hinrichten. Der bekannteste Fall ist die grausame Hinrichtung des Elefanten "Topsy".

Tesla und seinen Forschungen standen so kurz vor dem Aus. Doch das Blatt wendete sich zu Gunsten Teslas. Durch seine öffentlichen Vorführungen konnte er die Bevölkerung Amerikas davon überzeugen, dass sein Wechselstrom ungefährlich ist.

Des Weiteren ist so auch sein Zweitnamen "Magier der Elektrizität" zustande gekommen, denn er hat Glühbirnen nur durch "bloßes" Anfassen zum leuchten gebracht.

2.) Tesla wollte Energie drahtlos übertragen. Dies ist im auch in gewissen Grenzen gelungen. Es gibt Berichte darüber, dass in 10Km Entfernung ein ganzes Feld voller Glühbirnen geleuchtet hat. Allerdings war bei diesem Versuch die Energieaufnahme seiner Anlage so groß, dass die Stadtwerke von Colorado Springs, die ihn mit Strom versorgten, abgebrannt sind.

2. Theorie einer Teslaspule

Um die Funktion eines Teslatrafos verstehen zu können, muss man sich zuerst etwas mit Schwingungen und Schwingkreisen auseinander setzen, da alles Weitere darauf aufbaut.

2.1 Was ist ein Schwingkreis

Bei einem Schwingkreis handelt es sich um die Parallel- oder Serienschaltung eines Kondensators und einer Spule. Er dient meist zum Erzeugen von elektrischen Sinusschwingungen. Um einen Schwingkreis gut erklären zu können, greife ich auf ein kleines analoges Beispiel zurück:

Und zwar auf ein Federpendel oder einen Feder-Masse-Schwinger, wie es ein echter Physiker wahrscheinlich bezeichnen würde.

Wenn wir das Gewicht an der Feder nach unten ziehen und loslassen, fängt das Gespann sehr bald in einer bestimmten Frequenz an zu schwingen, nämlich in seiner *Resonanzfrequenz*. Es ist ohne Kräfte von außen nicht möglich, die Frequenz zu ändern, sie wird von der *Masse* des Gewichts und der *Federkonstante* (= Stärke) der Feder festgelegt.

Eine Schwingung findet immer dort statt, wo Rückstellkräfte wirken. Diese müssen jedoch nicht immer Sinusschwingungen sein. Eine Feder hat die Eigenschaft, dass die Kraft (*Rückstellkraft*), die sie ausübt, proportional zur Strecke ist, die sie auseinander gezogen wird. Für unser Federpendel bedeutet dies, dass sich die Kraft der Feder ebenfalls proportional zur Auslenkung des Pendels verhält (d.h.: Doppelte Auslenkung des Pendels => doppelte Kraft).

Schwingungen, die diese Eigenschaft aufweisen, nennt man *harmonisch*. Harmonische Schwingungen haben immer eine Sinusform. Es gibt aber auch noch nichtharmonische, gedämpfte und erzwungene Schwingung.

Übertragen auf den elektrischen Schwingkreis bedeutet dies: Eine elektrische Spule hat ganz ähnliche Eigenschaften wie ein Gewicht bzw. Masse. Eine Spule "mag" keine schnellen Stromänderungen (Stichwort "*Selbstinduktion*"). Die Spule induziert durch das sich aufbauende Magnetfeld eine Spannung in die entgegengesetzte Richtung, die dem Strom entgegenwirkt, lassen wir z.B. einen Strom durch eine Spule fließen, wird dieser nur langsam ansteigen.

Die Massenträgheit entspricht dieser Eigenschaft: Wenn man z.B. ein Auto anschiebt, wird dieses nicht sofort anfangen zu rollen, sondern es wird erst mal am Platz verharren wollen, bis es langsam Geschwindigkeit aufnimmt (*Trägheit*). Die Arbeit, die wir aufgebracht haben, um das Auto zum Rollen zu bringen, wird als kinetische Energie gespeichert. Hören wir allerdings auf zu schieben, rollt das Auto trotzdem noch ein Stück weiter, bis es die gesamte kinetische Energie "aufgebraucht" bzw. abgegeben hat. Die Bewegung wird also auch ein kurzes Stück aufrecht erhalten.

Analog verhält sich auch eine Spule. Die elektrische Energie wurde im Magnetfeld der Spule gespeichert. Schalten wir den Strom ab, baut die Spule ihr Magnetfeld wieder ab - und induziert damit eine Spannung, die den "alten" Stromfluss noch einen kurzen Moment aufrecht erhält, bis das komplette Magnetfeld wieder abgebaut ist.

Dementsprechend ist das mechanische Äquivalent zum Kondensator die Feder. Ein Kondensator will, sobald er geladen ist, immer den Ladungsunterschied ausgleichen (Ebenfalls eine Rückstellkraft) und in seinen Ausgangszustand zurückkehren. Die in seinem elektrischen Feld gespeicherte Spannung treibt einen Strom. Genauso verhält es sich mit einer Feder: Einmal gespannt, will sie in ihren Ausgangszustand zurückkehren und kann auch die gesamte, in ihr gespeicherte Energie in Bewegung umsetzen.

2.2 Resonanz

Die Resonanzfrequenz ist die Frequenz, mit der man einen Schwingkreis am effektivsten zum Schwingen anregen kann. Bei dieser Frequenz benötigt man nämlich die geringste Energie, um die Schwingungen aufrecht zu erhalten.

Ein recht einfaches Beispiel wäre hier eine Schaukel: Idealerweise stößt man eine Schaukel natürlich am höchsten Punkt an, da man so seine Kraft am sinnvollsten anwendet. Die bereits aufgebrachte Energie ("Kraft") wird dabei in den schwingenden Teilen gespeichert, ist also nicht verloren. Wenn wir jetzt immer weiter anstoßen, steigt die Energiemenge immer weiter an, die Amplitude der Schwingung wird größer. Die Frequenz ändert sich dabei aber nicht! Irgendwann wird die Amplitude so groß geworden sein, dass sich die Schaukel überschlägt. Die Schwingung ist so stark geworden, dass sich das schwingende System selber zerstört, weil irgendein Bauteil der anwachsenden Energie nicht mehr stand halten konnte. Das nennt man Resonanzkatastrophe.

Stößt man die Schaukel allerdings vor dem höchsten Punkt an, bremsen wir die Schwingung aus; um die selbe Höhe zu erreichen, müssten wir eine größere Kraft aufwenden und gegen die Schwingung arbeiten.

Die Resonanzfrequenz berechnet man folgendermaßen:

$$f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{L \cdot C})$$

Bei L handelt es sich um die Induktivität der Spule, C ist die Kapazität des Kondensators. f_0 ist die Resonanzfrequenz. Diese Formel hört in Fachkreisen auf den Namen "Thompsonsche Schwingungsformel".

Beispielrechnung:

Im Primärkreis sei ein Kondensator mit 100 nF, sowie eine Spule mit 15 µH verbaut. Nun wollen wir die Resonanzfrequenz berechnen (*Eigenfrequenz*).
 $f_0 = 1 / (2 \pi \cdot \sqrt{100 \cdot 10^{-9}} \cdot \sqrt{15 \cdot 10^{-6}}) = 129949,467 \text{ Hz}$, also ca. 130 kHz.

Würden wir nun eine sinusförmige Spannung mit 130 kHz an diesen Schwingkreis anlegen, dann würde die Anordnung in Resonanz schwingen.

Je exakter wir diese Frequenz erreichen, desto effizienter wird der Trafo später arbeiten. Allerdings gibt es noch zusätzliche Effekte, wie zum Beispiel die Bandbreite - diese gibt an, wie weit man von der Resonanzfrequenz abweichen darf.

2.3 Der Teslatrafo

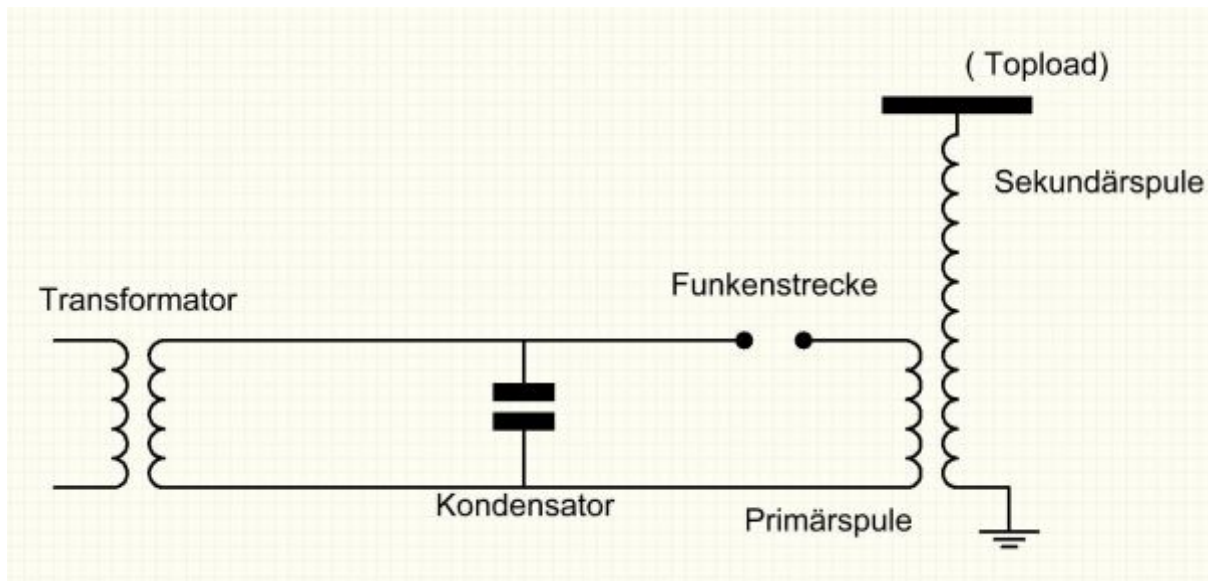


Abbildung 1: Prinzipschaltbild eines Teslatransformators

Wer wie ich, einmal glaubte, ein Teslatrafo würde nach dem klassischen Trafoprinzip arbeiten, hat weit gefehlt. Meine Erklärung für die hohen Spannungen und die hohen Ströme war damals:

Großer Kondensator und hohe Spannung => ein starker kurzer Stromstoß. Sobald die Spannung groß genug ist, zündet die Funkenstrecke, und der Kondensator entlädt sich in die Primärspule - die durch den starken Strom ein starkes Magnetfeld aufbaut. Durch das hohe Windungsverhältnis der beiden Spulen und einer sowieso schon hohen Eingangsspannung musste die Ausgangsspannung nun wirklich astronomisch sein!

Die Funkenstrecke diente meiner Ansicht nach nur als "Zerhacker" (um aus Gleichspannung eine Wechselspannung zu machen) und der Kondensator allein dazu, um einen möglichst starken Strom in die Primärspule zu schicken.

Ich habe es versucht, und glaubt mir, es funktioniert nicht!

Ein Teslatrafo besteht im Grunde genommen nur aus zwei lose gekoppelten Schwingkreisen, dem Primärkreis und dem Sekundärkreis. Damit der Transformator effizient arbeitet, sollten beide Schwingkreise die selbe Resonanzfrequenz aufweisen (Sie befinden sich also dann in *Resonanz*). Wie sich diese Frequenz berechnet, habe ich oben bereits beschrieben. Was ein gekoppelter Schwingkreis ist, erkläre ich im weiteren Verlauf des Textes unter der Überschrift "Funktionsprinzip".

2.4 Sekundärkreis

Da der Sekundärschwingkreis das Verhalten eines Teslatransformators in erster Linie bestimmt, fangen wir hier auch mit ihm an. Der Sekundärschwingkreis besteht aus einer Sekundärspule, einer einlagig gewickelten Luftspule und einer Sekundärkapazität. Viele

Teslatrafos haben eine zusätzliche Kapazität in Form eines Toploads, meist einer Kugel oder einem "Toroid".

Fragt man sich nun, wie denn der Topload ein Kondensator darstellen soll - wenn er nur eine einzige Kondensatorplatte besitzt? Darauf gibt es eine ganz einfache Antwort:

Die andere Platte ist die gesamte Umgebung des Trafos und damit auch der Experimentator selbst! Es gibt sogar Teslatrafos, die keinen Topload besitzen. Laut der Thompsonschen Schwingungsformel müsste die Resonanzfrequenz dann allerdings unendlich groß sein, da keine Kapazität vorhanden ist?

Ist sie aber nicht!

Eine Spule besitzt nämlich auch eine Kapazität! Und diese ist sogar relativ groß! Und zwar bilden sich zwischen den einzelnen Windungen der Spule kleine Kapazitäten - und außerdem wieder von der Spulenoberfläche gegen die gesamte Umgebung. Das darf man sich in etwa so vorstellen:

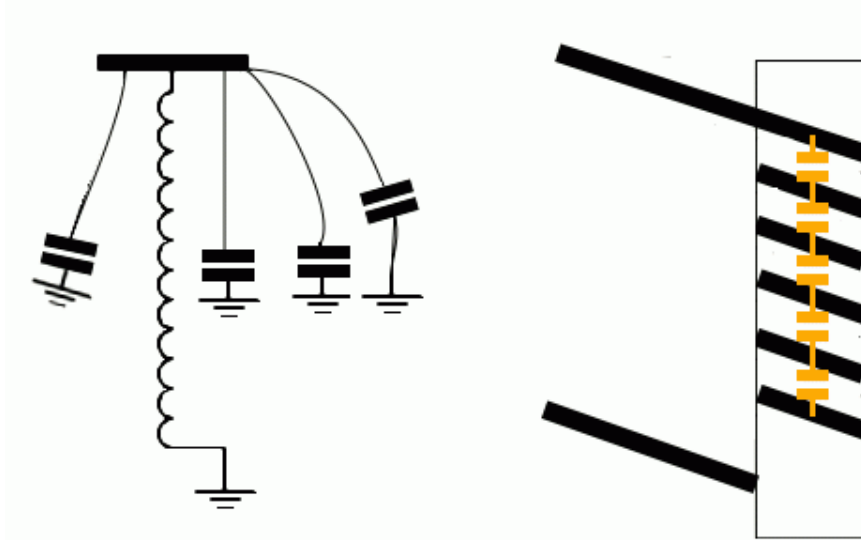


Abbildung 2: Sekundärkapazitäten einer Teslaspule

2.5 Primärkreis

Stellen wir uns vor, wir haben eine Sekundärspule mit einer Resonanzfrequenz von 130 kHz.

Betrachten wir nun die Teslaspule genauer. Wie wir wissen, schwingt das europäische Versorgungsnetz bei 50 Hz. Allerdings sind 50 Hz nicht gerade 130 kHz. Um diese Problemstellung zu lösen, werden wir uns der Funkenstrecke und deren Aufgabe etwas näher widmen.

Wie man sieht, ist der speisende Trafo zum Kondensator parallel geschaltet. Das heißt, dass der Trafo den Kondensator auflädt. Ist die maximale Spannung erreicht, sollte jetzt die Funkenstrecke zünden - diese dient dazu, den Kondensator bei maximaler Ladenspannung über die Primärspule zu entladen. Die Funkenstrecke arbeitet sozusagen als Schalter. Der Abstand der Elektroden sollte so gewählt werden, dass dies auch geschieht. Das macht man am besten experimentell - orientieren kann man sich an einem Abstand von 1 kV/mm.

Nun werden sich einige Leute fragen, warum man dies mit einem so simplen "Schalter" realisiert. Nun, dieser Schalter ist preiswert und leistungsfähig. In dem Moment, in dem die Funkenstrecke zündet, wird die Luft zwischen den Elektroden ionisiert. Das bedeutet, dass ihr Widerstand auf ein Minimum absinkt. Die Luft wird leitfähig.

Der Speisetrafo wird durch den extrem niedrigen Widerstand kurzgeschlossen, also vom weiteren Geschehen ausgeschlossen. Der Kondensator wird mit der Spule parallel geschaltet. Das bedeutet, die Beiden bilden einen Schwingkreis - den Primärschwingkreis.

Wir haben uns für eine Sekundärkreis mit einer Resonanzfrequenz von 130 KHz entschieden - wer nun gut aufgepasst hat, wird sofort wissen, dass die Resonanzfrequenz des Primärschwingkreises auch bei 130KHz liegen muss.

Wir müssen im Primärkreis also einen Schwingkreis mit genau dieser Resonanzfrequenz konstruieren.

Am besten geht man dabei vom verwendeten Primärtrafo aus: Auf diesen muss nämlich der Kondensator angepasst werden. Die Zeit, die der Trafo braucht, um den Kondensator bei vollem Kurzschlussstrom aufzuladen ist nämlich von großer Bedeutung:

Ein zu kleiner Kondensator wird zu schnell geladen, sodass die Funkenstrecke gar nicht mehr erlischt und einfach weiter brennt oder einfach viel zu wenig Energie ins Spiel bringt.

Ein zu großer Kondensator und ein Trafo mit sehr hoher Ausgangsspannung wiederum sorgen dafür, dass der Trafo sehr lange braucht, um den Kondensator aufzuladen. Dadurch wird ein guter Betrieb der Spule unmöglich.

2.6 Funktionsprinzip

Der Schalter (die Funkenstrecke) ist zunächst offen. Damit die Funkenstrecke zündet (d.h.: leitend wird, Schalter schließt), muss an ihm eine bestimmte Spannung anliegen. Diese Spannung beträgt etwa 1kV/mm Abstand der Elektroden. Sobald diese Spannung erreicht wird, schlägt die Funkenstrecke durch. Die Luft zwischen den Elektroden wird ionisiert und damit leitfähig. Deswegen leitet die Funkenstrecke auch weiterhin Strom, auch wenn die Zündspannung schon lange wieder unterschritten wurde.

Während die Funkenstrecke brennt, schließt sie den Trafo kurz und den Kondensator mit der Spule parallel - Die Beiden bilden einen Schwingkreis.

Aus diesem Schwingkreis wird - abhängig vom *Kopplungsfaktor* - immer Energie aus dem Primär in den Sekundärkreis übertragen. Der Kopplungsfaktor bestimmt dabei die Menge an Energie, die bei jeder Schwingung übertragen wird. Diese Energie wird dem Primärkreis natürlich entnommen.

Dieser Vorgang findet solange statt, bis sich die gesamte Energie im Sekundärkreis befindet. Im Idealfall erlischt jetzt die Funkenstrecke ("*quenscht*") - dadurch wird der Kondensator wieder von der Spule getrennt, der Schwingkreis ist unterbrochen. Da es jetzt keine Schwingungen mehr gibt, die mit dem Sekundärkreis gekoppelt sein könnten, gibt es auch keine Energieübertragung mehr - die Energie ist im Sekundärkreis "gefangen".

Dort entlädt sie sich meist in Form eines Streamers, wird in ohmschen Verlusten "verheizt" (Drahtwiderstand) oder wird als HF-Energie abgestrahlt.

Leider erlischt die Funkenstrecke nicht immer im ersten "Nulldurchgang" - der Primärschwingkreis ist also noch offen. Die Ursache liegt häufig darin, dass sich noch ionisierte Gase zwischen der Funkenstrecke befinden. In diesem Fall wird wieder Energie vom Sekundärkreis zurück in den Primärkreis übertragen - das Spiel geht dann solange weiter, bis die ohmschen Verluste die Energie soweit gedämpft hat, dass die Funkenstrecke erlischt.

Das ist natürlich nicht wünschenswert, da auf diese Weise eine Menge an Energie in Wärme umgesetzt wird, die dann im Sekundärkreis nicht mehr zur Verfügung steht. Außerdem dauert so der gesamte Zyklus länger - der Kondensator hätte in der Zeit schon wieder geladen werden können.

Diese "Nulldurchgänge" nennt man "*Notches*" (engl. Kerbe), den Vorgang der Energieübertragung bzw. die daraus resultierende Schwingung "*Schwebung*". Das Ziel eines je-

den "Tesla-Coilers", der eine gute Effizienz und Funkenlänge anstrebt, ist es, dass die Funkenstrecke gleich im ersten Nulldurchgang (*First Notch*) erlischt - denn andernfalls wird die Energie wieder zurück in den Primärkreis und von dort wieder zurück in den Sekundärkreis übertragen.

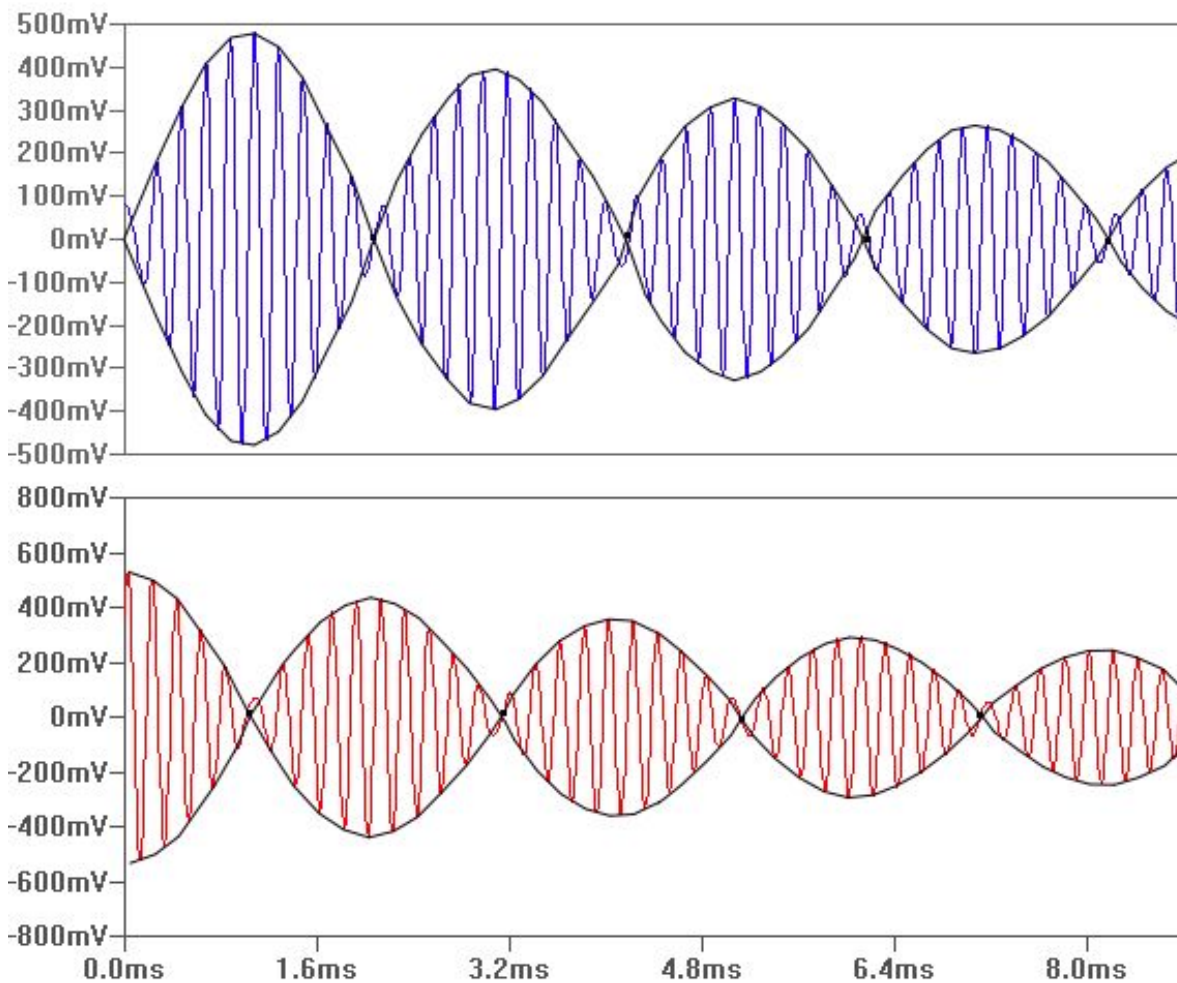


Abbildung 3: Graph einer Schwebung, ohne dass die Funkenstrecke erlischt. Der untere, rote Graph ist die Primär-, der obere, blaue die Sekundärspule.

Deswegen ist die Funkenstrecke auch das kritischste Bauteil eines Teslatrafos, das genau abgestimmt werden muss. Um das "Quenschen" einer Funkenstrecke zu erleichtern, werden auch gerne Lüfter verbaut - zur Kühlung, aber auch um die ionisierten Gase weg zu blasen.

Andere "Tesla-Coiler" schwören auf "Rotary-Sparc-Gaps" - eine Funkenstrecke, die aus einem sich schnell drehendem Rad mit Kontakten besteht. Liegen die Kontakte gegenüber, zündet die Funkenstrecke. Idealerweise hat sich das Rad bis zum ersten Nulldurchgang weiter gedreht, sodass die Funkenstrecke erlischt. Die Berechnung und der Betrieb solcher rotierenden Funkenstrecken bedeutet allerdings auch viel Aufwand. Statische Funkenstrecken, also ohne bewegliche Teile, sind dagegen anfällig gegen Änderungen in der Luftfeuchtigkeit.

2.7 Leistungsanpassung

Wie oben schon erwähnt, arbeiten Teslatrafos sehr effizient. Die Effizienz kann aber abermals gesteigert werden und zwar durch die Anpassung des Primärkondensators an den Hochspannungstrafo. Dadurch kann man die gesamte zur Verfügung stehende Leistung des Trafos nutzen. Diese Kapazität berechnet sich wie folgt:

$$C = I / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot U)$$

"f" steht für die Netzfrequenz, also in Europa 50 Hz. Mit dieser Formel kann man die maximale Kapazität berechnen, die man verwenden kann, aber nicht sollte!

Warum?

Mit dieser Formel erreicht man eine Impedanzanpassung, d.h., es wird die Kapazität ausgerechnet, die nötig ist, um bei 50 Hz den kompletten Blindwiderstand auszugleichen. Dann gibt es nur noch den ohmschen Widerstand.

Hochspannungstrafos begrenzen allerdings mit der Induktivität ihren maximalen Ausgangsstrom. Fällt diese weg, sind um einiges größere Ströme möglich.

Ein 500 W Neontrafo kann dann auch mal 3 kW ziehen, allerdings nicht lange.

Gleichzeitig hat man mit dieser Kapazität einen Schwingkreis mit der Resonanzfrequenz von 50 Hz. Über die Induktivität (Sekundärwicklung des Trafos) des Kreises wird nun genau wie bei einem Teslatrafo immer mehr Energie in den Kreis gepumpt. Die Spannung und der Strom können sich gefährlich aufschaukeln, was zur Zerstörung des Trafos oder des Kondensators führen kann!

2.8 Entladungen

Wieso entladen sich eigentlich Funken in die Luft? Es gibt keinen Erdungspunkt, in den sie "einschlagen" können. Die Spannung, die ein Teslatrafo erzeugt, ist zu gering, um solche großen Entladungen zu erzeugen. Des Weiteren sind die Entladungen noch frequenzabhängig.

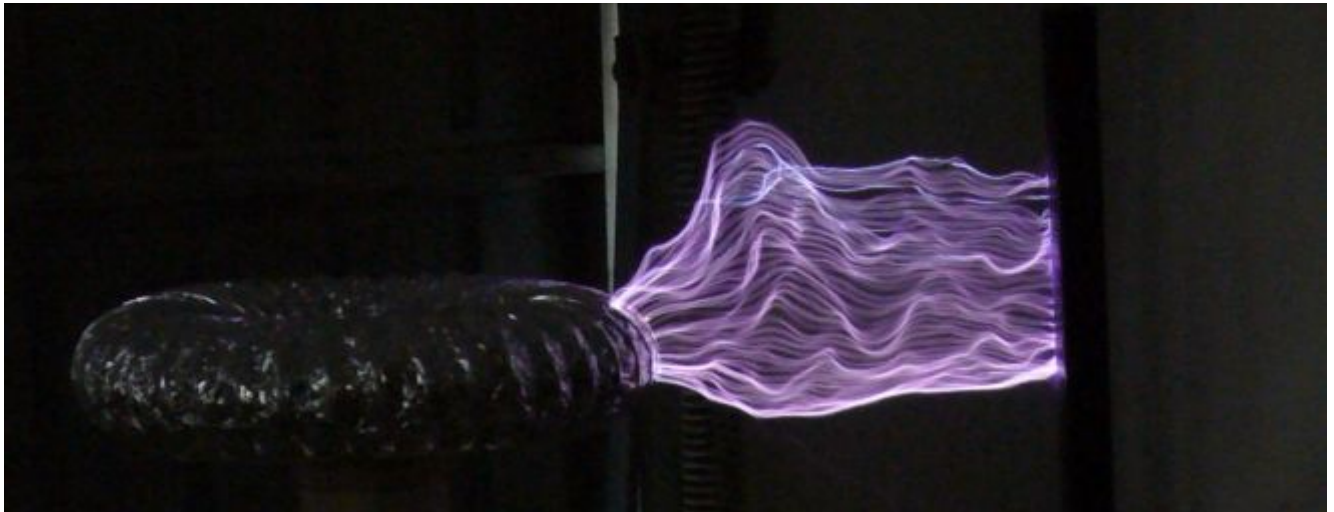


Abbildung 5: Korona Entladungen

Bei den Entladungen handelt es sich um "Korona-Entladungen (Sprühentladung)". Sobald die elektrische Feldstärke groß genug ist, entsteht an einer spitzen Stelle, dem "Breakout-Point", eine Korona-Entladung. Die Korona-Entladung selbst wirkt wie eine Kapazität. Durch die hohe Frequenz, mit der ein Teslatrafo arbeitet, und der Kapazität eines ionisierten Luftkanals kann ein dauerhafter Strom aufrechterhalten werden, der weitere Korona-Entladungen hervor ruft.

Durch diese ionisierte Luft kann nun wieder Strom fließen und eine weitere Korona hervorrufen. Dieser Vorgang hält solange an, bis irgendwann die maximal mögliche Länge des Streamers (Funke) erreicht ist, die nächste Zündung der Funkenstrecke zu lange braucht, oder die ionisierte Luft vom Winde verweht wird. Die ionisierte Luft wird wieder neutral, der Prozess beginnt von vorne.

2.9 Warum in Resonanz?

Die Resonanzfrequenz ist die Frequenz, mit der man einen Schwingkreis am effektivsten zum Schwingen anregen kann. Bei dieser Frequenz benötigt man nämlich die geringste Energie, um die Schwingungen aufrecht zu erhalten.

Warum ist der Energieverbrauch in Resonanz am geringsten ?

In einem Teslatrafo haben wir es tatsächlich mit Parallelschwingkreisen zu tun - der Kondensator wird also parallel zur Spule geschaltet. (siehe Abb. 2) Im Wechselstromkreis weisen eine Spule und ein Kondensator einen Widerstand auf, den sogenannten Blindwiderstand. Dieser ist frequenzabhängig:

Ein Kondensator hat bei hohen Frequenzen einen sehr niedrigen Widerstand, blockt aber niedrige Frequenzen ab. Bei der Spule verhält es sich andersherum:

Sie leitet niedrige Frequenzen besonders gut, blockt aber die hohen Frequenzen.

Dieser Blindwiderstand von Spule und Kondensator ist im Resonanzfall gleich groß, es werden also zwei gleich große Widerstände parallel geschaltet - der Gesamtstrom teilt sich also in zwei gleich große Teilströme auf. Erhöht man jetzt die Frequenz, dann wird der Kondensator niederohmiger und die Spule hochohmiger. Der Strom fließt jetzt durch den Kondensator. Dies hat zur Folge, dass der Gesamtwiderstand kleiner ist als bei Resonanz - und damit wächst der Energiebedarf. Verringert man die Frequenz, dann wird der Kondensator hochohmiger und die Spule niederohmiger - hier fließt der Strom logischerweise durch die Spule. Auch dies hat zur Folge, dass der Gesamtwiderstand kleiner wird als bei Resonanz und damit steigt wiederum der Energiebedarf.

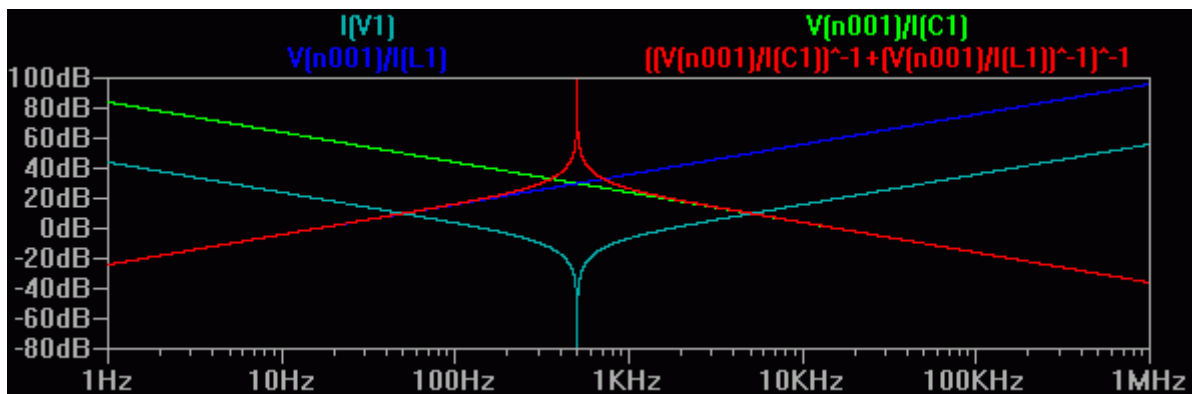


Abbildung 6: Hier sieht man noch mal die Kurve des Widerstandes (Kondensator = Grün, Spule = Blau, Gesamt = Rot, Strom = Türkis). Man sieht deutlich, dass die benötigte Leistung bei Resonanz (~500KHz) am geringsten ist.

2.10 Ausgangsspannung

Immer wieder werde ich gefragt: "Wie hoch ist die Ausgangsspannung deines Teslatrafos?" Darauf kann ich nur antworten: "Tut mir leid, ich kann diese Frage nicht beantworten, da ich die Ausgangsspannung nicht messtechnisch ermitteln kann". Natürlich folgt darauf gleich die Gegenfrage: "Kann man die Ausgangsspannung nicht berechnen?" Meine Antwort dazu: "ja und nein"

Warum gibt ein E-Techniker eine solch unpräzise Antwort? Weil er es nicht weiß!

Natürlich lässt sich die Ausgangsspannung eines Teslatrafos wie folgt berechnen:

Die Energie im Primärkreis wird relativ verlustfrei (Funkenstrecke, Ohmsche Verluste) in den Sekundärkreis übertragen. Man kann also davon ausgehen, dass die Energien fast gleich bleiben. Die Energie eines Kondensators berechnet sich folgendermaßen:

$$W = (C / 2) * U^2 \quad W = \text{Energie; in unserem Falle die des Kondensators}$$

Beispiel:

Kondensator $C = 100 \text{ nF}$; Spannung $U_{\text{ampl}} = 8000 \text{ V}$

$$W = ((100 \cdot 10^{-9}) / 2) \cdot 8000^2 = 3.2 \text{ Joule}$$

Da die Energie fast verlustfrei in den Sekundärkreis übertragen wird, geht wenig Energie verloren. In unserem Sekundärkreis stellt die Eigenkapazität der Sekundärspule und die Kapazität des Topload die gesamte Kapazität da. Da die Gesamtkapazität sehr klein ist, muss die Spannung dementsprechend groß sein, damit die Energie ungefähr gleich bleibt. Durch Umstellen der Formel $W = (C / 2) \cdot U^2$ in:

$$U = \sqrt{(W / (C / 2))}$$

bei einer Sekundärkapazität von $26,67 \text{ pF}$ würde die Ausgangsspannung

$$U = \sqrt{(3.2 / ((26.67 \cdot 10^{-12}) / 2))} = 489\,867,332 \text{ V} \approx 500 \text{ kV} \text{ betragen.}$$

Da dieser Vorgang jedoch nicht ganz verlustfrei stattfinden sollte, sollte man das Endergebnis noch mal mit 0.9 multiplizieren. Dies ist allerdings nur gültig, wenn man beide Schwingkreise sehr gut auf Resonanz abgestimmt hat.

Jetzt kann es allerdings durchaus vorkommen, dass sich das Topload erst nach "X" Ladezyklen entlädt und da wir die Variable "X" nicht berechnen können, können wir auch nicht zuverlässig die Ausgangsspannung einer Teslaspule berechnen. Des Weiteren können Streamer auch schon aus dem Topload brechen, bevor es die 500 kV erreicht hat, was dazu führen würde, dass die Spannung im Topload zusammenbricht. Die einzige sichere Methode wäre, die Ausgangsspannung zu messen, da dies allerdings nicht ohne weiteres realisierbar ist, bleibt die Ausgangsspannung einer Teslaspule ein Mysterium.

3. Bau einer SGTC

3.1 Grundlegende Bearbeitung von Holz und Plexiglas

Wie bearbeite ich die folgenden Materialien?

3.1.1 Holz

Holz zu bearbeiten ist relativ einfach, zumindest was unsere Zwecke anbelangt. Zum Sägen sollte man eine Laubsäge oder Stichsäge, im Optimalfall eine Dekupiersäge sein. Eigen nennen können. Für gröbere Schnitte ist eine Kreissäge von Vorteil. Da man beim Freihand-Sägen immer ein bisschen vom Idealschnitt abweicht, sollte man Holz mit circa $0,5 \text{ mm}$ Übermaß schneiden. Den überstehenden Rest kann man dann entweder mit einem Schleifklotz oder einem Bandschleifer abschleifen. Abschließend die Kanten der Schnittflächen brechen, damit man sich nicht dran verletzen kann.

3.1.2 Plexiglas

Plexiglas zu bearbeiten ist um einiges schwieriger als Holz zu bearbeiten. Hier sollte man als erstes die Dicke der zu zersägenden Platte bestimmen. Ich habe die Erfahrung gemacht, dass sich Plexiglas bis 3 mm Dicke noch einigermaßen gut mit einer Dekupiersäge schneiden lässt. Auch hier gilt mit Übermaß schneiden, vielleicht sogar mit 1 mm , je nachdem, wie viel Erfahrung man schon hat. Danach den überstehenden Rest abschleifen. Bei Plexiglas über 3 mm Dicke sollte die Stichsäge zum Einsatz kommen. Hier ist es wichtig ein Holzsägeblatt zu verwenden. Dieses Blatt holt sehr viel Material heraus, ohne viel Wärme zu produzieren. Diese führt nämlich dazu, dass sich das Sägeblatt im Plexiglas "einsmilzt". Bei mehr als 8 mm dickem Plexiglas empfiehlt es sich, mit Wasser zu kühlen. Dazu einfach alle paar Zentimeter Schnitt das Sägeblatt mit Wasser kühlen. Im Grunde genommen ist auch die Bearbeitung von Plexiglas sehr einfach, wenn man weiß wie!

3.2 Werkzeug

Folgendes Werkzeug sollte man mindestens besitzen:

- Maul/Ring- Schlüssel in den benötigten Größen

- Schraubendreher
- Holz-, sowie Metallbohrer in den benötigten Durchmessern
- Bohrmaschine
- Dickflüssigen Sekundenkleber
- Laubsäge
- Stichsäge
- Schleifklotz
- Schieblehre
- Winkeleisen
- Schleifpapier verschiedener Körnung (120er bis 600er)
- Metallsäge
- Schraubstock

Optionales, aber sehr nützliches Zubehör:

- Dekupiersäge
- Bandschleifer
- Schraubzwinde
- Kreissäge
- Standbohrmaschine

3.3 Bauanleitung

In dieser Rubrik möchte ich euch einige Tricks erklären, die den Bau einer mittel- großen Teslaspule erleichtern und auch zum Erscheinungsbild eurer Teslaspule positiv betragen. Trotzdem steht es natürlich jedem frei, seine eigene Anlage zu bauen.

3.4 Vorbereitung

Also aller erstes sollte man seine geplante Teslaspule immer einmal theoretisch durchrechnen, zum Beispiel mit diesem netten JavaScript (www.raacke.de). ("Online-Rechner" -> "Teslatrafo"). Hat man seinen Teslatrafo erst mal durchgerechnet, dann kann man eigentlich damit beginnen seine benötigten Teile zu bestellen, bzw. einzukaufen. Zum Beispiel:

- Hochspannungstrafo
- MMC (Multi-Mini-Capacitor)
- PVC-Abflussrohr
- Kupferlackdraht
- Kupferdraht
- Plexiglas
- Gewindestangen
- Diverse Schrauben
- 230V Lüfter
- Kupferrohr
- Aluflexrohr
- Kaltgerätebuchse
- 2M0hm Widerstände
- Sperrholz
- Rollen

3.5 Planung der Grundplatte

Hat man alle diese Dinge, dann kann der Bau los gehen. Als erste sollte man hierfür sein MMC nehmen, seinen Hochspannungstrafo, die Gewindestangen und die Rollen. Als erstes platziert man den Trafo und den MMC auf einer Sperrholzplatte so, dass genügend Platz für die spätere Verkabelung zur Verfügung steht und vor allen Dingen, dass die Gewindestangen und Rollen noch an das Brett geschraubt werden können. Am besten zeichnet man hier mit Bleistift die Positionen auf das Holzbrett drauf. Nun schneidet man am besten das eben eingezeichnete Stück Sperrholz heraus. Allerdings empfiehlt es sich, es quadratisch zu schneiden, also alle Seiten gleich lang. Anschließend zeichnet man auf der Rückseite des Brettes die Befestigungslöcher für die Rollen ein. Die Rollen

sollte man immer in den 4 Ecken positionieren. Anschließend zeichnet man die Befestigungslöcher für den Hochspannungstrafo ein. Danach verbindet man die quer gegenüberliegende Ecken des Holzes mit einer Linie. Die Mitte des Holzbrettes ist so gekennzeichnet. Nun kommt der etwas knifflige Teil. Die Gewindestangen, die später die beiden "Stockwerke" von einander trennen, müssen so positioniert werden, dass Sie den Rollen nicht in den Weg kommen, aber dennoch so weit wie möglich in den Ecken entfernt sind. Jetzt kommen die Linien ins Spiel. Diese fährt man mit seiner Gewindestange einfach ab, bis man die Rolle auf der Unterseite nicht mehr "durchbohren" muss.

3.6 Bohrungen

Als erstes bohrt man die Befestigungslöcher für den Trafo, durch die später die Schrauben passen. Hier sollte man keine Holzschrauben verwenden, sondern Schrauben mit metrischem Gewinde, zum Beispiel "M6". Anschließend werden die Löcher für die Rollen gebohrt. Hierzu verwendet man wiederum Holzschrauben. Die Löcher sollte man mit dem Kerndurchmesser der Holzschrauben bohren. Allerdings sollte man hierzu sein Holzbrett nicht völlig durchbohren, sondern nur ein Sackloch bohren. Jetzt kommt der komplizierte Teil, die Gewindestangen. Hierzu sollte man sich Gedanken um sein "Obergeschoss" machen, auf dem später die Primärspule und die Sekundärspule befestigt werden. Das "Obergeschoss" kann, muss aber nicht aus Plexiglas gefertigt werden. Auf jeden Fall sieht Plexiglas im Nachhinein wesentlich schöner aus und es isoliert hervorragend. Wichtig ist, dass Obergeschoss und Untergeschoss die selben Maße haben. Hat man sein Obergeschoss aus Plexiglas oder aus Holz herausgeschnitten, dann legt man die beiden Platten (Ober und Untergeschoss) präzise übereinander und fixiert diese mit Schraubklemmen. Nun bohrt man mit die Löcher für die Gewindestangen durch Ober- und Untergeschoss gleichzeitig, was die Passgenauigkeit erhöht. Es empfiehlt sich für sämtliche Bohrungen eine Standbohrmaschine zu verwenden.

3.7 Funkenstrecke

Die Funkenstrecke zu bauen ist mit Abstand der anspruchsvollste Teil. In der Regel reicht eine Funkenstrecke mit 5 Lücken eine "Middi-SGTC (engl. sparc gab tesla coil)" ausreichend zu "befeuern". Folglich sollte man von einem Kupferrohr also 6 gleichlange Stücke abschneiden. Es empfiehlt sich, die Stücke nicht kürzer als 12 cm abzuschneiden. Das Kupferrohr sollte einen Außendurchmesser von > 12 mm haben. Umso größer das abgeschritten Stück, desto langsamer erhitzt es sich im Betrieb der Teslaspule. Als erstes legt man sein Kupferrohr auf einen möglichst geraden Untergrund. Nun zeichnet man mit einem Stift eine gerade Linie auf das Rohr. Hierfür einfach das Rohr festhalten, den Stift seitlich auf den Boden legen, und anschließend an dem Rohr entlang fahren. Jetzt zeichnet man seine Abschnitte ein. In unserem Beispiel 6 gleich lange und schneidet diese am besten mit einem Rohrschneider oder einer Metallsäge ab. Dabei sollte man darauf achten, dass die Linie auf dem Rohr erhalten bleibt. Anschließend kennzeichnet man von jedem Ende des Abschnittes einen in 1cm entfernten Strich, der die Linie kreuzt. Diese Punkte kennzeichnen Bohrungen. Da die Abschnitte später auf Plexiglas montiert werden sollten, empfiehlt es sich ein Gewinde hinein zu schneiden. M3 reicht in der Regel. Für den Bohrerdurchmesser rechnet man M3, also 3mm Außendurchmesser der Schraube, mal 0.8. Mit 2,4mm müssen wir unser eben gekennzeichnetes Loch also bohren. Danach mit viel Gefühl das Gewinde hinein schneiden. Nun sind unsere Kupferstücke fertig.

Da unsere Funkenstrecke verstellbar sein soll, wird sie auf Schienen montiert. Hierzu sollte man 4 gleich große Plexiglasstreifen anfertigen. Hierfür am besten dickes Plexiglas verwenden, zum Beispiel 4 mm. Den jetzt folgende Abschnitt zu erklären ist ein bisschen kompliziert, daher einfach ein schöne Detailaufnahme:

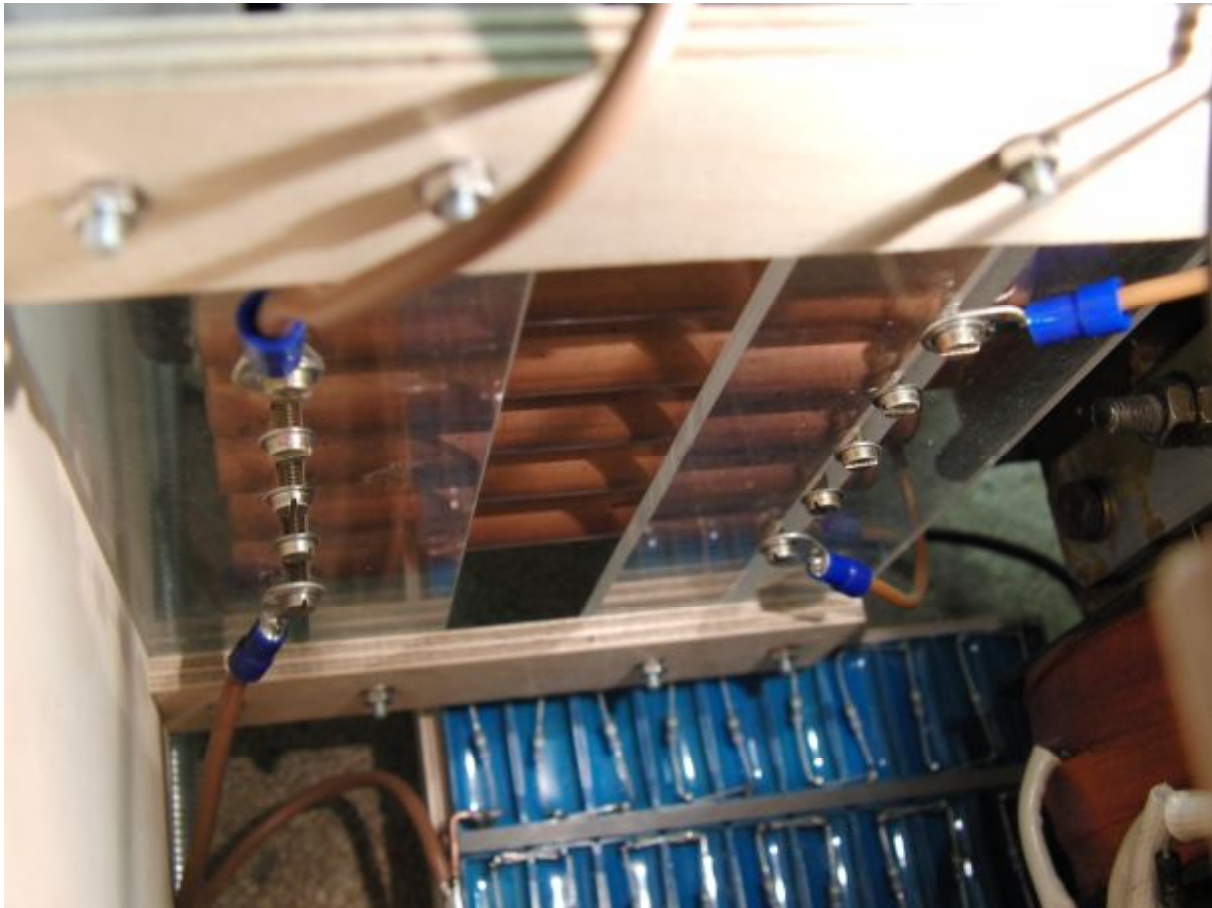


Abbildung 7: Funkenstrecke aus waagrechten Kupferrohren im Detail

Nun ist unsere Funkenstrecke fertig. Allerdings benötigen wir noch einen Lüfter, der unsere Funkenstrecke kühlt, und vor allen Dingen ionisierte Gase wie O_3 oder NO_2 weg bläst, da diese die Funktion der Funkenstrecke negativ beeinflussen. Den Lüfter sollte man über seiner Funkenstrecke montieren. Ein Lüfter mit 230V empfiehlt sich, da hierfür kein Trafo oder Elektronik benötigt wird.

3.8 Primärkondensator

Den MMC kann man in 2 Varianten montieren. Entweder kann man ihn liegend auf der Grundplatte mit Heißkleber befestigen, was allerdings nicht gerade schön aussieht. Man kann aber auch ein passendes Gehäuse bauen.



Abbildung 8: MMC, 10 Stück in Reihe (String), drei Strings parallel

Aus den folgenden Gründe sollte man darauf achten, die Verbindungen in einem Tesla-trafo so kurz wie möglich halten:

- Streukapazitäten und Streuinduktivitäten minimal halten
- umso länger das Kabel, desto höher der ohmsche Widerstand und die Streuanteile

Folgende Sicherheitsmaßnahmen sollten eingebaut werden:

Über jeden Kondensator sollte ein 2 MOhm Widerstand parallel gelötet werden. Dieser Widerstand entlädt die Kondensatoren nach dem Betrieb der Spule. Außerdem stellen die Widerstände auch einen Spannungsteiler dar. Da Kondensatoren relativ große Fertigungstoleranzen haben, könnte es sein, dass ein Kondensator eine höhere Kapazität hat als ein anderer, dass sich wie folgt auswirkt:

Für Kondensatoren in Reihenschaltung gilt: Die Ladung Q (Coulomb) ist auf jedem Kondensator gleich.

Die Kapazität eines Kondensators ist definiert als: $C = Q/U$, also Ladung pro Spannung.

Stellen wir diese Formel um zu: $U = Q/C$

Hat jetzt ein Kondensator eine größere Kapazität als ein Anderer, so ist sein Anteil der Spannung, die er abbekommt, kleiner. Ein anderer Kondensator (mit geringerer Kapazität) wird demnach mehr Spannung abbekommen.

Die Widerstände verhindern in diesem Fall die mögliche Zerstörung diese Kondensators durch Überspannung.

3.9 Trafo

Nun wird der Hochspannungstrafo befestigt. Hierzu sollte man sich auf seiner Grundplatte die letzte freie Kante suchen. Den Trafo auf die gewünschte Position stellen, an der er später verschraubt werden soll. Anschließend die Befestigungsbohrungen des Trafos mit Bleistift auf die Holzplatte übertragen. Abschließend bohren und den Trafo danach befestigen. Hiermit ist die Grundplatte fast fertig.

3.10 Gewindestangen

Nun gilt es die optimale Länge der Gewindestangen zu ermitteln. Dazu sucht man sich auf der Grundplatte die Stelle, die am höchsten heraus ragt und misst die Höhe. Jetzt addiert man noch 7cm dazu, damit das Obergeschoss ein bisschen Abstand zu höchsten Stelle hat. Nun die Gewindestangen mit einer Metallsäge zurecht schneiden. Dazu die Gewindestangen am besten in einen Schraubstock einspannen. Aber Vorsicht, dass ihr die Gewindegänge dabei nicht zerquetscht. Um eine Beschädigung vorzubeugen, sollte man die Gewindestange am besten mit ein paar Lagen Stoff umwickeln und sie dann in den Schraubstock einspannen.

3.11 Primärspule

Die Primärspule zu bauen ist meiner Meinung nach der Teil beim Bau einer Teslaspule, der die größte Sorgfalt erfordert. Hierzu geht man wie folgt vor. Damit man die Spule in einem Zug wickeln kann ohne das Primärspulenkabel zu knicken, um auf die nächst äußere Windung zu gelangen, sind die Führungen für das Kupferkabel auf jedem Halter versetzt, um den Längenunterschied einer vollen Windung auszugleichen.

Dazu ermittelt man vorher den Zwischenraum, der zwischen jeder Windung sein sollte. Eine Richtlinie hier führ gibt es nicht. Man kann also frei entscheiden, wie weit man den Abstand zwischen den Windungen wählt. Ich persönlich lasse mindestens soviel Zwischenraum, wie das Kabel im Durchmesser hat, zum Beispiel 6 mm. Somit ergibt sich dann ein Bohrabstand von 6 mm + 3 mm + 3 mm, also 12 mm insgesamt. Nun weiß man also, dass man bei einer vollen Windung 12 mm Längenunterschied ausgleichen muss, um in die nächst äußere Bohrung zu gelangen. Verwende ich zum Beispiel 8 Halter, so verschieben sich die Löcher nach außen um 1,5 mm pro Halter.

Danach verbindet man die quer gegenüberliegende Ecken des Plexiglasplatte mit einer Linie. Die Mitte der Platte ist so gekennzeichnet. An diese Punkt wird später unsere Primärspule geschraubt oder geklebt.

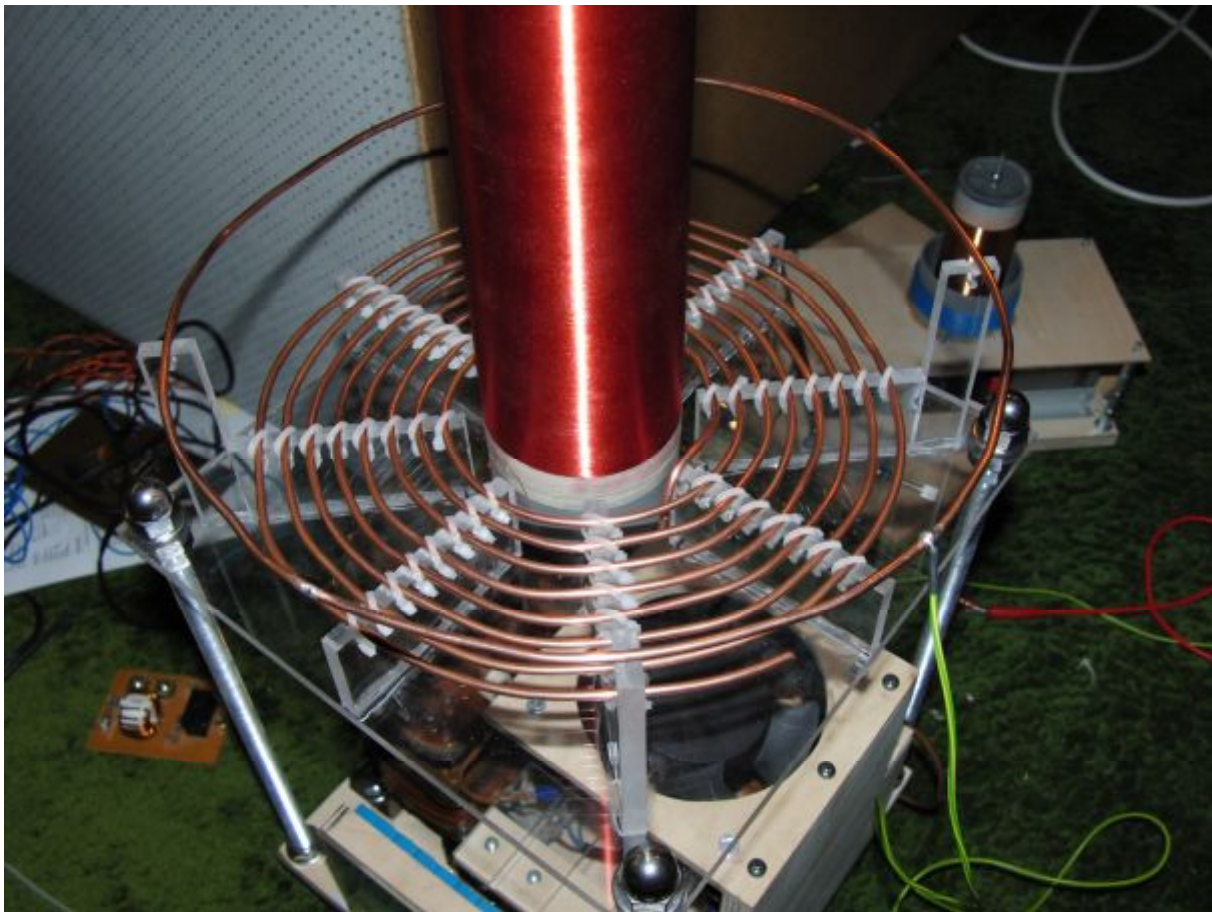


Abbildung 9: Waagrecht liegende Primärspule auf Plexiglas Abstandshalter
3. 12 Sekundärspule



Abbildung 10: "Kunstvolle" Wickelmaschine für Sekundärspulen, funktioniert aber!

Die Sekundärspule sieht nach viel viel Arbeit aus. Hunderte von Windungen müssen präzise gewickelt werden. Allerdings ist das eine Sache von einer halben Stunde, wenn man den Bogen erst einmal heraus hat. Hierfür benötigt man eine Bohrmaschine mit einstellbarer Drehzahl.

Angenommen, man möchte ein PVC-Rohr, das 7.5 cm im Durchmesser misst, bewickeln. Dann schneidet man sich zuerst 2 Kreise aus Speerholz aus, die größer sind als der Durchmesser des zu bewickelnden Rohres, z.B. 8 cm. Anschließend nimmt man eine Gewindestange, am besten M8, und spannt das zu bewickelnde Rohr mit Hilfe der 2 Holzkreise auf die Gewindestange. Diese Anordnung wiederum spannt man in seine Bohrmaschine. Danach sollte man sich eine Aufhängung für seine Drahtrolle basteln. Ist dies getan, dann befestigt man den Draht auf dem Rohr mit circa 10 cm Übermaß, am besten mit Tesafilm. Jetzt beginnt der schwierige Teil:

Die ersten 4 mm der Spule sollte man noch mit Hand wickeln, danach kommt die Bohrmaschine zum Einsatz. Möchte man die Bohrmaschine einsetzen, dann ist es ratsam, den Draht nicht mit bloßen Fingern zu führen, sondern noch ein Stück Küchenrollenpapier dazwischen legen (Zug wird sonst zu hoch). Der Rest ist Gefühlssache. Allerdings macht das Wickeln einer Spule geradezu großen Spaß, wenn man den Bogen einmal raus hat!

Ist die Spule fertig, dann sollte man sie noch gründlichst und zwar SOFORT nach dem Wickeln, mit Polyurethanlack übersprühen. Dieser isoliert den Draht zusätzlich und verhindert vor allen Dingen, dass der Draht durch Temperaturänderungen vom Rohr runter rutscht.

3.13 Topload

Den Topload baut man am besten aus Aluflexrohr. Dieses ist preiswert, einfach zu verformen und sieht auch noch passabel aus. Da Aluflexrohr, wie der Name schon sagt, ein Rohr ist und kein Ring, muss man es noch zu einem Ring formen. Allerdings wie verbindet man die 2 Enden zu einem Ring? Diese 2 Enden kann man einfach mit Nylonfaden zusammen nähen. Damit der Ring seinen Durchmesser behält, sollte man innen noch eine Plexiglasscheibe einarbeiten. Diese lässt sich sehr gut mit Heißkleber an den Aluflexring kleben. In den Mittelpunkt der Scheibe bohrt man, je nach Bedarf, ein Loch, damit man ihn später ordentlich an seine Sekundärspule befestigen kann.

3.14 Verkabelung

Letztendlich muss nur noch alles verkabelt werden. Für die Stromversorgung sollte man 1 mm² Kabel verwenden, für den Primärkreis 2,5 mm². Jetzt kommen wir noch mal zum Thema Erdung der Teslaspule. Den Hochspannungstrafo sollte man über die Netzerde erden. Die Sekundärspule sollte jedoch separat ihre eigene Erde besitzen. Hierfür sollte man sich ein Erdungskabel besorgen, das an einem Ende eine große Krokodilklemme besitzt. Mit dieser kann man sich nämlich ohne weitere Probleme an Zäunen, Toren usw. "anklemmen". Jetzt wäre unsere Teslaspule fertig.

4. "Pimp my Teslacoil"

Hat man seine erste Teslaspule dann endlich gebaut, dann möchte man natürlich auch bestmögliche Resultate erzielen. Jetzt funktioniert die Spule allerdings nur sehr schlecht. Dies ist ein sehr ernüchterndes Erlebnis. Dem kann man aber durch die folgende Maßnahmen vorbeugen:

- "LC - Tuning"
- "Funkenstrecken- Tuning"

4.1 LC - Tuning

Ein Grund, warum die Teslaspule nur sehr ernüchternde Resultate liefert, kann sein, dass die beiden Schwingkreise nicht gut auf einander abgestimmt sind. Um die beiden Schwingkreise aufzubauen, sollte man erst einmal den folgenden Versuchsaufbau nachbauen:

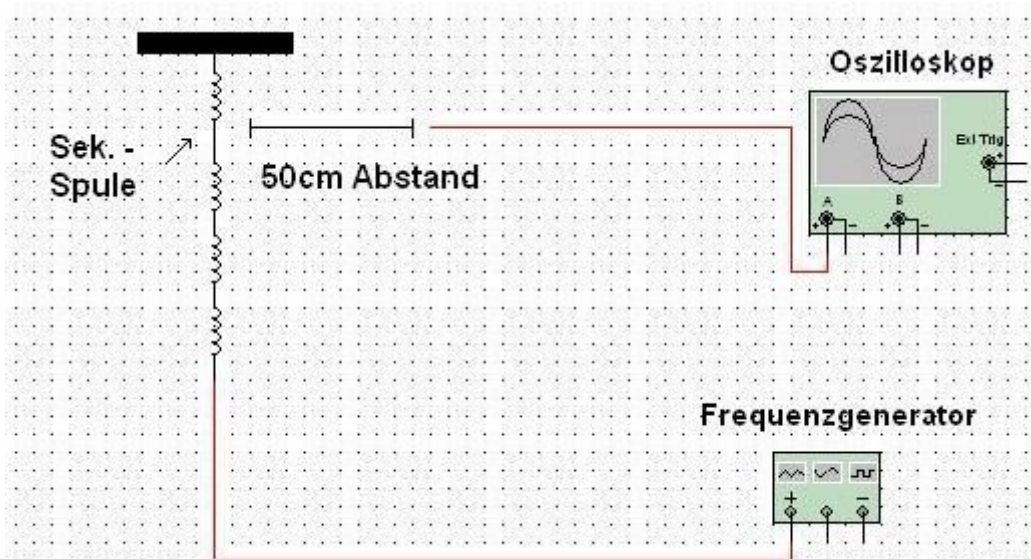


Abbildung 11: Bestimmung der Resonanzfrequenz der Sekundärspule

Hierbei ist zu beachten, dass man diese Messung im Freien durchführen sollte, da Metallgegenstände die Eigenfrequenz der Sekundärspule beeinflussen.

Nun "sweept" man mit dem Frequenzgenerator die Frequenzen durch. Betrachtet man währenddessen das Oszilloskop, dann ist die Amplitude der Sinusschwingung bei einer ganz bestimmten Frequenz am größten. Das ist unsere Resonanzfrequenz!

Jetzt müssen wir nur noch die Frequenz des Primärkreises dem entsprechend ändern. Hierzu messen wir mit einem LC-Meter die Primärkapazität. Jetzt berechnen wir die benötigte Primärinduktivität durch umstellen der Thompsonschen Schwingungsformel. Diese Induktivität messen wir nun erneut aus und greifen sie abschließend auf der Primärspule ab. Fertig!



Abbildung 12: Bestimmung der Resonanzfrequenz der Sekundärspule am lebendem Objekt mit Sinusgenerator und Oszilloskop

4.2 Funkenstrecken - Tuning

Selbst wenn unsere Teslaspule zu 100 % abgestimmt ist, kann die Funktion immer noch negativ durch eine schlecht eingestellte Funkenstrecke beeinflusst werden. Der Ursache liegt im Abstand der Elektroden zu einander. Sind die Elektroden zu nahe beisammen, dann zündet die Funkenstrecke zu früh, so kann der Kondensator nicht zum "Anschlag" voll geladen werden. Der Abstand muss so gewählt werden, dass die Funkenstrecke erst zündet, wenn der Kondensator voll aufgeladen ist. Das heißt, man muss die Elektroden soweit auseinander bringen, bis die Funkenstrecke nicht mehr zündet und dann wieder ein Stückchen zurück. Fertig!

5. Versuche

5.1 Energieübertragung

Der eindrucksvollste Versuch ist sicherlich die drahtlose Energieübertragung - die auch der eigentliche Sinn und Zweck eines Teslatrafos war.

Für diesen Versuch braucht man einen normalen Teslatrafo und eine 2. Sekundärspule, die auch auf die Resonanzfrequenz des Teslatrafos abgestimmt ist. Stellen wir diese Spule irgendwo in die Nähe der Teslaspule und erden sie, werden wir feststellen, dass aus dem Topload des Teslatrafos keine oder kaum Entladungen stattfinden - dafür die 2. Sekundärspule eifrig am Funken sprühen ist.

Ein ähnlicher Versuch kann mit einer Glühbirne durchgeführt werden: An den unteren Kontakt eines Sockels einer normalen Glühbirne wird ein etwa 50 cm bis 1 m langes Stück Kabel gelötet. Wenn man jetzt den anderen Kontakt der Birne festhält, ohne das Kabel zu berühren, leuchtet die Lampe auf.

Was passiert hier?

Zwischen den Spulen besteht eine Kopplung: Ähnlich wie die Energie zwischen der Primär und der Sekundärspule übertragen wird, nämlich über eine *Induktive Kopplung*, wird Energie zwischen den beiden Sekundärspulen übertragen. Allerdings handelt es sich hierbei um eine *kapazitative Kopplung*.

Das starke elektrische Wechselfeld des Trafos verursacht in jedem Kondensator einen geringen Stromfluss, den *Verschiebungsstrom*. Zwischen den beiden Sekundärspulen ist auch ein Kondensator - zwischen den Toploads und der Oberfläche der Spule.

Diese, zugegebenermaßen sehr geringe Kapazität, reicht jedoch aus, um einen kleinen Stromfluss zu erzeugen - und so die 2. Spule zum Schwingen anzuregen. Der Verschiebungsstrom ist es auch, der die Lampe aufleuchten lässt: Das Kabel ist eine Kapazität zum Trafo, man selber stellt die Kapazität gegen Erde dar.

5.2 Plasma



Abbildung 13: Plasma-Entladung in einer Glühbirne ohne Funkenüberschlag zum Teslatrafo

Hält man eine klare Glühbirne in die Nähe eines Teslatrafos gibt es in der Glühbirne Entladungen wie in einer Plasma-Kugel. Diese sind auch gerne etwas stärker als die aus dem Topload - weil in dem Unterdruck der Glühbirne die Feldemission ein leichteres Spiel hat.

Berührt man das Glas, gibt es an der Stelle eine besonders starke Entladung - weil die Kapazität gegen Erde vergrößert wird, des-

wegen kann mehr Strom fließen (Verschiebungsstrom). Auch wenn der Strom nicht durch das Glas fließt, sondern der Verschiebungsstrom für den Stromfluss sorgt, kann es passieren, dass das Plasma im inneren der Lampe in den Glaskolben winzige Löcher brennt. Das merkt man zunächst nicht. Mit der Zeit wird aber Luft einströmen.



Abbildung 14: Plasma-Entladung in einer Glühbirne

5.3 Gasentladungslampen

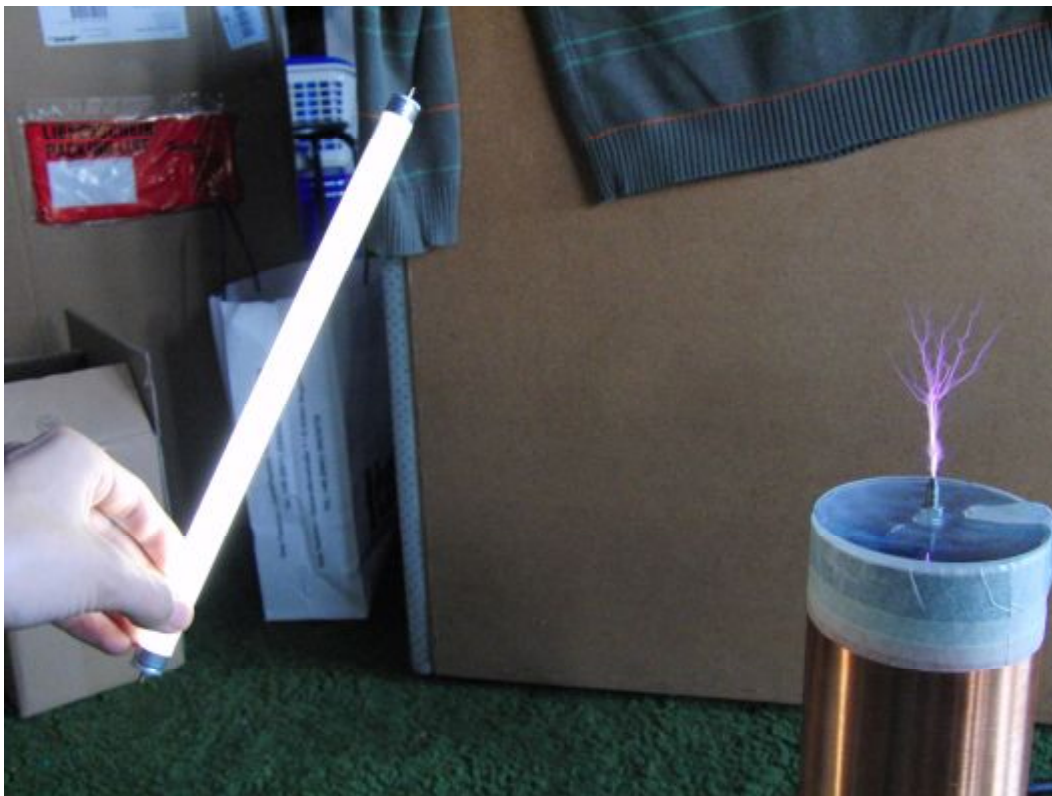


Abbildung 15: Nachweis eines HF-Feldes eines Teslatrafos

Hält man eine Leuchtstoffröhre oder Energiesparlampe in die Nähe eines Teslatrafos, dann leuchtet diese hell auf. Das liegt auch hier wieder am Verschiebungsstrom in der Lampe, welcher eine Gasentladung anregt.

6.1 Gefahren

Hochspannungsexperimente mögen faszinierend sein und Spaß machen, allerdings sind sie auch nicht ungefährlich. Bei falschem Umgang mit Hochspannung kann man schnell sich selbst und auch Mitmenschen in Gefahr bringen. Deswegen hier noch mal die wichtigsten Gefahren und Hinweise im Umgang mit Hochspannung.

Absolute Sicherheit gibt es nicht - wer absolute Sicherheit will, sollte im Bett liegen bleiben und sich die Decke über den Kopf ziehen!

Einige der hier aufgeführten Punkte sind sicherlich etwas übertrieben - am wichtigsten ist es, den gesunden Menschenverstand walten zu lassen! Wer diesen nicht besitzt - Pfoten weg!

6.2 Lichtbögen



Abbildung 16: Lichtbogen mit zwei Neontrafos, Temperatur über 2500 Grad Celsius

Ein brennender Lichtbogen birgt erst mal recht offensichtliche Gefahren. Lichtbögen sind, abgesehen von der Gefahr von Elektroschocks, natürlich erst mal wahnsinnig heiß! Abhängig vom fließenden Strom und dem Gas kann ein Lichtbogen knappe 2500°C erreichen. Das birgt auch Brandgefahren, wenn der Lichtbogen z.B. Holz berührt. Oder die Elektroden heiß werden, und evtl. Holzbefestigungen zum Brennen bringen (Alles schon passiert).

Ein Lichtbogen birgt aber noch andere Gefahren, die nicht auf den ersten Blick erkenntlich sind. Durch die enorme Hitze des Plasmas wird eine nicht unerhebliche Menge Ultraviolette- und Infrarotstrahlung frei. Über längere Zeit direkt in einen Lichtbogen zu sehen kann Augenschäden verursachen.

In einem Lichtbogen wird zudem auch Luft "verbrannt" und zwar zu Stickstoffmonoxid, welches sofort zu Stickstoffdioxid weiter reagiert. Dieses ist hochgiftig. Bereits kleinste Mengen können Kopfschmerzen hervorrufen. In höheren Konzentrationen färbt es sich Braun. In dieser Konzentration ist höchste Vorsicht geboten, da das NO_2 zum Tod durch Lungenödeme führen kann, und krebserregend wirkt (Langzeitwirkung, Lungenkrebs).

Des Weiteren entsteht Ozon (O_3), eine Molekülvariante des Sauerstoffs. Auch das ist hochgiftig. Beide Gase riecht man allerdings schon in den geringsten Konzentrationen sehr deutlich, eine direkte Gefahr besteht also nicht. Trotzdem ist eine gute Lüftung empfehlenswert.

6.3 Teslatrafos



Abbildung 17: Berühren der Streamer eines kleinen Teslatrafos

Oft wird im Zusammenhang mit Streamern der Skineffekt zitiert, und dass dadurch die hochfrequenten Ströme eines Teslatrafos nur auf der Haut eines Menschen fließen können. Das ist so nicht richtig! Die Ströme dringen bei 100 kHz immer noch einige cm tief in das Gewebe ein! Das man dies nicht wahrnehmen kann, liegt an der Tatsache, dass der Strom zu hochfrequent für die Nerven ist. Das heißt, er wechselt schneller die Polarität, als dass die Nerven folgen können. Aber trotzdem gibt es noch eine ohmsche Komponente, die den Körper, und auch die Nerven, aufheizt.

Das direkte Berühren eines Streamers mit der Hand ist auch nur bei wirklich kleinen Trafos zu empfehlen. An dieser Stelle möchte ich an die Temperatur eines Lichtbogens erinnern, da dieser nämlich bei größeren Spulen entstehen kann, wenn man deren Streamer berührt.

Auch wenn die hochfrequenten Wechselströme eines Teslatrafos relativ ungefährlich sind, die primärseitige Hochspannung ist das nicht! Je nach verwendeten Primärtrafos verläuft eine Begegnung höchstwahrscheinlich tödlich.

ACHTUNG!

Eine Gefahr wird bei Teslatrafos, besonders bei SGTCs, gewaltig unterschätzt:

Die Streamer sind leitfähig! Wenn ihr wie auch immer einen Streamer berührt, und ein weiterer schlägt in den Primärkreis ein, dann besteht eine leitfähige Verbindung zwischen euch und dem Primärkreis! Und da die meisten Hochspannungstrafos keine galvanische Trennung besitzen, wird der Strom diese Verbindung auch nutzen!

7. Quellen

Sämtliche Informationen und Abbildungen wurden von mir selbst geschrieben, gezeichnet, bzw. fotografiert.

Ein Großteil des Inhaltes wurde von meiner Homepage „www.fpgames.de“ übernommen.