

Eigenbau eines Tesla-Transformators

Grimmelshausen Gymnasium Gelnhausen

*Projekt des Experimentierclubs / der Physik AG
unter Leitung von Herrn Norbert Großberger und Herrn Erwin Bernhardt*

*von Christoph Böttge
Physik Leistungskurs Y 13.6 (Gb), Schuljahr 2002/2003*

Impressum

Aufgabenbereiche

Christoph Böttge
(christoph@boettge.info)

- Theoretische und mathematische Planung
- Bau der einzelnen Bauteile
(Primärspule, Sekundärspule, Kondensator,
Funkenstrecke, Torus)
- Protokoll, Layout und Druck

Ich wurde bei diesem Projekt weiterhin hilfreich unterstützt von:

Stefan Höflich
(stefan@hoeflich.info)

- Bau der äußeren Halterung für die Primärspule
- Fotos für das Protokoll

Quellennachweise

- „Experimente mit Hochspannung“, Dipl.-Phys. Jochen Kronjäger,
© 2000 Franzis Verlag GmbH, ISBN 3-7723-5414-9
- www.kronjaeger.com
- www.m-niggemann.com
- http://user0815.tripod.com/tesla_FBA_Binder/
- <http://www.hoelscher-hi.de>
- Gerthsen Physik, 21. Auflage (2002), herausgegeben von
Professor Dr. Dieter Meschede; Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg / New York
- Microsoft® Encarta Enzyklopädie Plus 2001

Zitate Dr. Nikola Teslas

Electric power is everywhere present in unlimited quantities and can drive world's machinery without the need of coal, oil, gas, or any other fuels.

**One watt-second of power is not much. As normally thought of, it is just one watt delivered over a period of one second...
... Oh what a vast difference however, can be the manifestation of one billion watts delivered for one billionth of a second.**

Dr. Nikola Tesla

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Historischer Hintergrund	
1.1 Die Person Dr. Nikola Tesla	4
2. Der Tesla-Transformator	
2.1 Sinn und Zweck eines Tesla-Transformators	5
2.2 Der prinzipielle Aufbau	6
2.3 Die einzelnen Bauteile	
2.3.1 Der Primärtransformator	8
2.3.2 Die Primärspule	11
2.3.3 Die Sekundärspule	12
2.3.4 Der Kondensator	13
2.3.5 Die Funkenstrecke	15
2.3.6 Der Torus	18
2.4 Sicherheitshinweise	19
2.5 Der Skineffekt	20
2.6 Theoretische Betrachtung	21
3. Versuchsauswertung	
3.1 Experimente mit dem Tesla-Transformator	23
3.2 Wissenschaftliche Erkenntnisse	27
4. Fehlerbetrachtung	
4.1 Mögliche Fehlerquellen und Optimierungsvorschläge	28
5. Kleine Formelsammlung	29
6. Danksagung	31

1. Historischer Hintergrund

1.1 Die Person Dr. Nikola Tesla

Dr. Nikola Tesla war ein amerikanischer Elektrotechniker und Erfinder, der als Wegbereiter auf dem Gebiet der Elektrotechnik gilt.

Tesla wurde 1856 in Smiljan (Kroatien) geboren. Er studierte an der Technischen Hochschule in Graz und an der Universität Prag. Nachdem er drei Jahre als Elektroingenieur gearbeitet hatte, wanderte Tesla 1884 in die USA aus, wo er später eingebürgert wurde. Für kurze Zeit war er bei Thomas Alva Edison angestellt, gab diese Position aber wieder auf, um sich ausschließlich der experimentellen Forschung und Erfindung zu widmen. Er verstarb 1943.

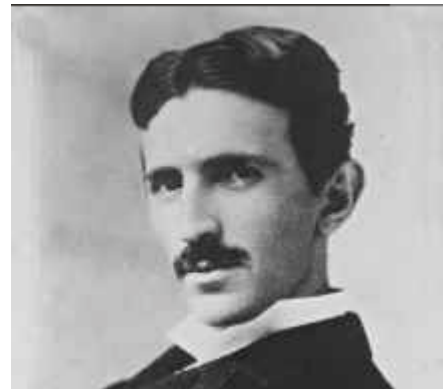


Abb. 1:

Die ersten brauchbaren Drehstrommotoren der Welt entwickelte seit 1881 der amerikanische, in Kroatien geborene Physiker und Elektrotechniker Nikola Tesla.

Tesla entwarf das erste praktische System zur Drehstrom-Kraftübertragung, für das er 1888 ein Patent anmeldete. Die Rechte für diese epochemachende Erfindung kaufte der amerikanische Erfinder George Westinghouse, der das System erstmalig auf der World's Columbian Exposition in Chicago (1893) vorstellte.

Zu Teslas vielen Erfindungen gehört auch der Tesla-Transformator (1891), mit dem die Spannungen hochfrequenter Ströme auf mehrere Millionen Volt gesteigert werden können.

Nach Tesla ist ebenfalls eine Maßeinheit der Physik benannt worden. Hierbei handelt es sich um die SI-Einheit der magnetischen Induktion (magnetischen Flussdichte) Tesla mit der Einheit T.

Aus der Einheitenbetrachtung ergibt sich:

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{Am}} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$$

Typische Werte der magnetischen Induktion sind 10^{-13} Tesla für im Gehirn erzeugte Felder, 10^{-7} Tesla für durch elektrische Beleuchtung und Geräte in Wohnzimmern auftretende Felder, 10^{-5} Tesla für das Erdmagnetfeld. Magnetfelder von etwa einem Tesla führen zur Ausrichtung einzelner Zellen; im Laboratorium können Felder bis zu einigen Hundert Tesla erzeugt werden; die stärksten Magnetfelder von bis zu 10^{11} Tesla treten z. B. in Neutronensternen auf.

2. Der Tesla-Transformator

2.1 Sinn und Zweck eines Tesla-Transformators

Wird ein Kondensator durch eine kreisförmige Kupferschlinge entladen, so klingen die Amplituden des mit der Frequenz $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ schwingenden Entladestromes in der Zeit

$\tau = \frac{2L}{R}$ auf e^{-1} ab [R ist für diese Frequenz infolge der Stromverdrängung, des

Skinneffektes (Kapitel 2.5), etwa 10mal größer als der Gleichstromwiderstand]. Nach sehr kurzer Zeit ist die Schwingung praktisch abgeklungen. Macht man die Drahtschlinge eines solchen Schwingkreises zur Primärspule eines Transformators, in den man als Sekundärspule eine Spule mit vielen Windungen stellt, so wird infolge der hohen Frequenz und der dadurch bedingten großen Änderungsgeschwindigkeit des Induktionsflusses in ihr eine sehr hohe Spannung induziert. Besonders hohe Spannungen, die zu meterlangen Büschelentladungen (Streams) in der freien Atmosphäre Veranlassung geben, erzielt man, wenn die Eigenfrequenz der Spule mit der Frequenz des Primärkreises übereinstimmt (Resonanz). Abbildung 2 zeigt das Schaltschema eines Tesla-Transformators. Der Niederfrequenztransformator (OBIT oder ähnliches) lädt den Kondensator des Schwingkreises auf, der sich über die Primärspule und die Funkenstrecke oszillatorisch entlädt.

Ersetzt man die Sekundärspule durch eine Spule mit wenigen Windungen aus dickem Draht, so werden in ihr starke Ströme niedriger Spannung induziert, in die man z.B. den menschlichen Körper einschalten kann. Diese **Hochfrequenzströme** finden in der medizinischen Therapie als **Diathermieströme** eine wichtige Anwendung. Während Gleichströme oder niederfrequente Wechselströme von 10 bis 100 mA, die durch den menschlichen Körper gehen, tödlich wirken, können Hochfrequenzströme bis über 10 A ohne Schädigung durch ihn hindurchfließen; die untere Grenze der unschädlichen Frequenz liegt bei 10^5 Hz. Während von außen zugeführte Wärme die Temperatur nur einige Millimeter unter der Hautoberfläche erhöht, erwärmt die von den Hochfrequenzströmen entwickelte Joulsche Wärme tief im Innern des Körpers liegende Organe.

2.2 Der prinzipielle Aufbau

Der Aufbau des Tesla-Transformators wurde in Kapitel 2.1 schon teilweise angeschnitten. Der Tesla-Transformator besteht aus zwei Schwingkreisen. Der Primärschwingkreis wird von einer Hochspannungsquelle mit Strom versorgt und besteht aus der Primärspule, dem Kondensator und der Funkenstrecke. Der Sekundärschwingkreis liegt etwas versteckt zwischen dem Torus, der Sekundärspule und der Erdung.

Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau eines Tesla-Transformators und das Schaltdiagramm für seinen Betrieb, wobei anstatt einem Torus eine Metallspitze eingezeichnet ist. Man erkennt einen primären Schwingkreis (Primärspule, Kondensator und Funkenstrecke), der geschlossen ist, wenn die Funkenstrecke leitet. Der sekundäre Schwingkreis ist etwas versteckt, er besteht aus der Induktivität der Sekundärspule sowie deren Streukapazität und der Kapazität des Terminals (hier: metallischer Torus) gegen Erde. Die Kapazitäten werden hier addiert.

Bei zunächst nicht leitender Funkenstrecke lädt die Hochspannungsquelle (z.B. ein Ölbrenner-Trafo, wie er bei diesem Projekt verwendet wurde) den Kondensator im Primärschwingkreis auf, bis die Funkenstrecke zündet und damit leitend wird. Im jetzt geschlossenen Primärschwingkreis beginnt eine hochfrequente Schwingung, die sich durch die induktive Kopplung allmählich auf den Sekundärschwingkreis überträgt. Ist die Energie des Primärkreises vollständig auf den Sekundärkreis übergegangen, wird die Funkenstrecke (idealerweise) wieder nichtleitend. Man sagt dazu „Die Funken werden gelöscht“ (vom englischen „to quench“). Die sekundäre Schwingung klingt nun wieder ab und das Spiel beginnt von vorne. Die Funkenstrecke sollte bei optimaler Einstellung der beiden Schwingkreise 2mal pro 50 Hz-Periode des Wechselstroms zünden, sodass pro Sekunde 2 Ausschläge am Tesla-Transformator auftreten.

Da die Kapazität des Sekundärschwingkreises jedoch wesentlich kleiner ist als die Kapazität des Primärschwingkreises, liegt die gleiche Frequenz hier als wesentlich höhere Spannung vor – aus 10 kV Primärspannung lassen sich leicht mehrere 100 kV machen, die sich in spektakulären Funken entladen. Die Funken bestehen aus ionisierter Luft und werden durch die in der Umgebung herrschende Luftzirkulation und den Auftrieb oft immer etwas weiter getragen, sodass jede Ladung etwas anders aussieht. Tatsächlich werden jedoch schon vorhandene Entladungen durch nachrückende Entladungen weiterverwendet. Irgendwann reißen diese jedoch auch ab und die Entladungen treten an anderen Stellen des Torus auf.

Die zu erwartende Sekundärspannung lässt sich annähernd durch die Formel

$$U_{sek} = U_{prim} \cdot \sqrt{\frac{C_{prim}}{C_{sek}}}$$
 berechnen. Mit den Werten des vorliegenden Tesla-Transformators

ergibt sich für **$U_{sek} \approx 285 \text{ kV}$** . Die zu erwartende Streamerlänge lässt sich mit der Formel $l_{Spark} = 0,8806 \cdot Input[kW]^{0,6052}$ annähernd berechnen. Sie wurde von der Einheit Inch auf Meter angepasst. Demnach ergibt sich für dieses Projekt eine Streamerlänge von **$l_{sprak} \approx 33,25 \text{ cm}$** .

In Wirklichkeit belief sich die Streamerlänge, je nach verwendetem Primärtransformator auf rund 20 cm.

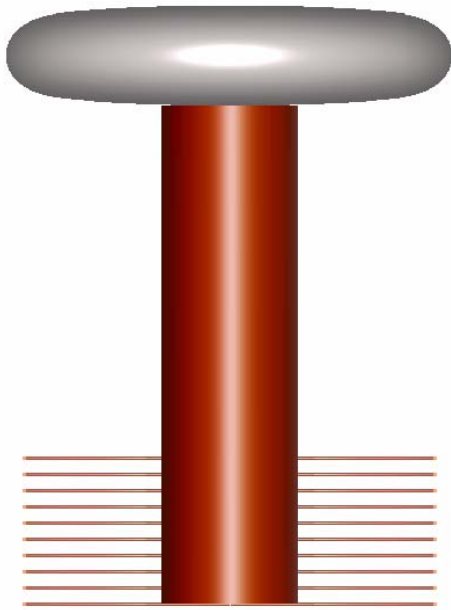
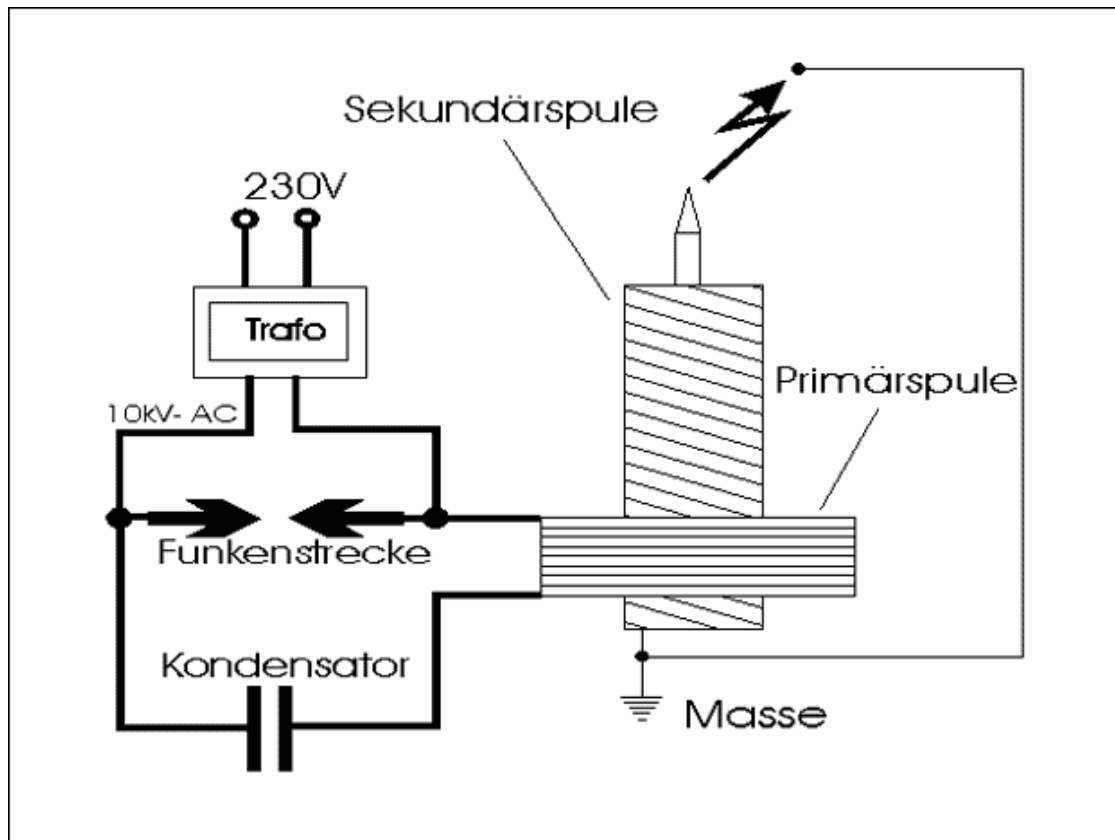


Abb. 2:

Links: Maßstabgetreuer, schematischer Aufbau des Tesla-Transformators (ohne Kondensator, Funkenstrecke und Primär-Trafo).

Unten: Kompletter Schaltplan des Tesla-Transformators (anstatt der eingezeichneten Metallspitze wird bei diesem Projekt ein metallischer Torus verwendet).



2.3 Die einzelnen Bauteile

2.3.1 Der Primärtransformator

Als primäre Spannungsquelle wurde zuerst ein alter, aus einer Ölheizung ausrangierter, Ölbrenner-Transformator benutzt. Die englische Abkürzung für diese Art von Transformator lautet OBIT (Oil Burner Ignition Transformer).

Der Ölbrenner-Trafo wird primär direkt ans Netz angeschlossen, wobei der gelb-grüne Schutzleiter unbedingt mit angeschlossen werden muss. Sekundär liefert er zwischen den beiden Hochspannungsanschlüssen 10 kV_{eff} Leerlaufspannung und 20 mA Kurzschlussstrom. Die Mittelanzapfung der Sekundärwicklung ist geerdet (mit dem Kern und dem Schutzleiter verbunden), sodass zwischen jedem Anschluss und Erde nur 5 kV liegen.

Ölbrenner-Trafos sind intern strombegrenzt und damit kurzschlussfest, jedoch nur für maximal eine Minute; danach müssen sie für 2-3 Minuten abkühlen.

Mehrere Trafos können parallel geschaltet werden, um einen höheren Ausgangsstrom zu erzielen. Dabei sollten nur identische Typen verwendet werden. Weiterhin ist auf korrekte Phasenlage zu achten. Diese prüft man, indem man die Trafos ans Netz anschließt und die zu verbindenden Hochspannungsanschlüsse einander nähert. Bildet sich ein Lichtbogen, muss man einen Trafo primärseitig umpolen oder ein anderes Paar von Anschlüssen verbinden. Bei richtiger Parallelschaltung bleibt die Leerlaufspannung gleich und der Kurzschlussstrom vervielfacht sich mit der Anzahl der Trafos.

Die Trafos können auch zur Erzielung höherer Spannungen „in Reihe“ geschaltet werden, wobei hier auf korrekte Schaltung zu achten ist, sodass die Trafos nicht kurzgeschlossen werden.

Es ist zu beachten, dass zwischen den Hochspannungskabeln neben der Spannung von 10 kV_{eff} eine schon tödliche Stromstärke von 20 mA anliegt, weshalb man den Primärschwingkreis niemals berühren sollte, wenn der Netzstecker angeschlossen ist.

Als zweites wurde ein selbst gebauter Transformator der Schule verwendet. Hierzu wurden zwei Spulen auf einen Metallkern gesteckt, wobei die erste Spule über 500 Windungen und die zweite über 23.000 Windungen verfügt.

Nach

$$\frac{U_{eff,1}}{U_{eff,2}} = \frac{N_1}{N_2} \Leftrightarrow U_{eff,2} = \frac{U_{eff,1} \cdot N_2}{N_1}$$

ergibt sich eine sekundärseitige Effektivspannung von 10.120 Volt.

Dieser Transformator erweist sich als weitaus leistungstärker: In der Funkenstrecke springen die Funken öfter und schneller über. Die Streams am Torus können, im Vergleich zum oben erwähnten OBIT mit ca. 10 cm langen Blitzen, auf Blitze von ungefähr 15-20 cm Länge gesteigert werden. Darüber hinaus sind die Blitze heller und intensiver und die elektromagnetische Strahlung reicht weiter, was durch Experimente mit Glühbirnen (siehe Kapitel 3.1) erwiesen wurde.

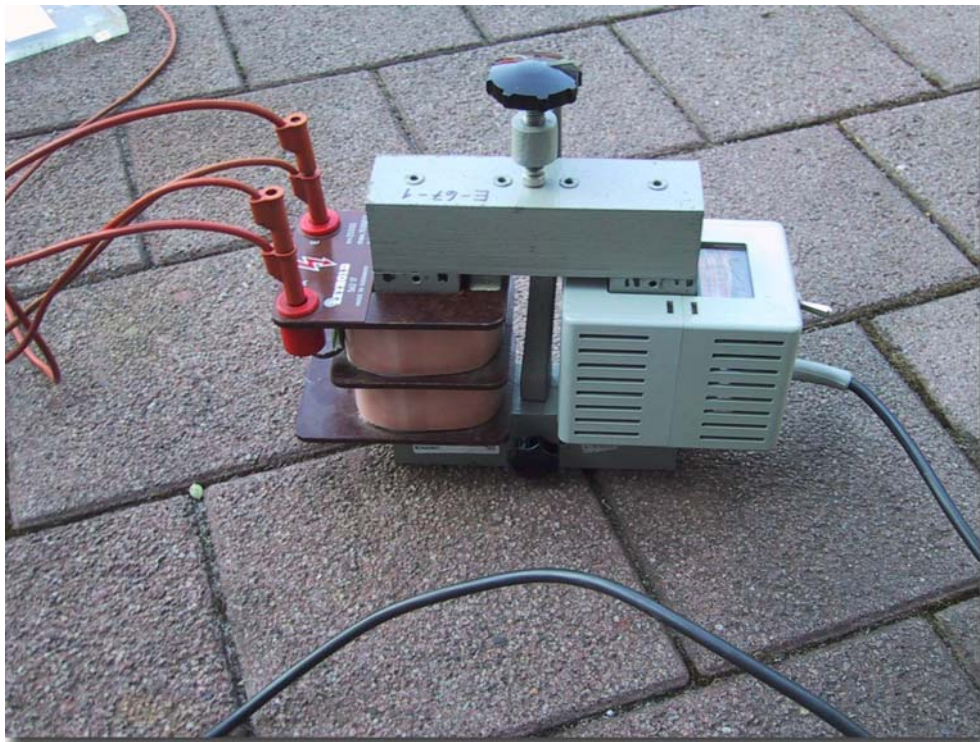


Abb. 3 und 4:
Einzelaufnahmen der beiden
Primärtransformatoren.
Oben der OBIT, unten der
Schultransformator.



Abb. 5 und 6:

Oben: Beide Primärtransformatoren nebeneinander.
Unten: Der komplette Aufbau des Tesla-Transformators.

2.3.2 Die Primärspule

Die Primärspule besteht aus 20 vertikalen Windungen eines 3 mm dicken Eisendrahtes. Der Abstand zwischen den einzelnen Windungen beträgt 1 cm, wodurch die Spule bei einem äußeren Durchmesser von 33 cm eine Höhe von 20 cm erreicht. Sie erhält somit bei 10 abgegriffenen Windungen eine Induktivität von ca. 38,5 μH . Greift man alle 20 Windungen ab, so beträgt die Induktivität ca. 104,95 μH .

Nach Berechnungen sind die Resonanzschwingungen der beiden Schwingkreise gleich, wenn man an der Primärspule 10 Windungen abgreift. Dabei hat er sich experimentell bewährt, wenn man, bei dieser Konstruktion, die oberen 10 Windungen abgreift, da diese auf gleicher Höhe wie die unteren Windungen der Sekundärspule liegen und somit eine bessere induktive Kopplung vorliegt.

Die spiralförmige Spule wird von 4 Holzlatten gehalten, in welche Einkerbungen im Windungsabstand und der entsprechenden Drahtdicke hinein geschnitten wurden, sodass die Spule in einem stabilen Gestell steht und sich die Windungen nicht berühren.

Es ist zu empfehlen einen leicht biegsamen Draht zu benutzen. Stahldraht ist zwar relativ Hitzebeständig, ist jedoch durch die Eigenspannung recht schwer zu einer runden Spirale zu biegen, wenn man keine Drehbank zu Hilfe hat.

Die Spule wird in den Primärschwingkreis eingebracht, indem der untere Anschluss mit einer Seite des OBITs (bzw. des alternativen Transformators) sowie einer Seite der Funkenstrecke verbunden wird. Der andere Anschluss wird mit dem in Serie geschalteten Kondensator verbunden, wobei eine Krokoklemme verwendet wird, um die Windungszahlen variieren und somit die Resonanzfrequenz zwischen Primär- und Sekundärschwingkreis einstellen zu können.

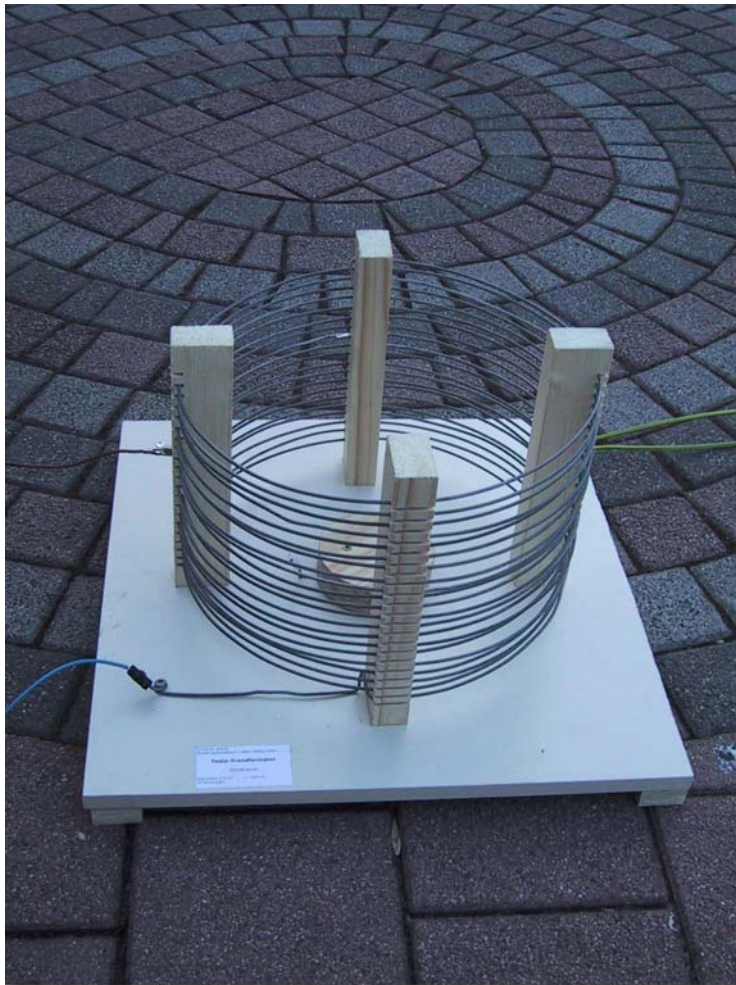


Abb. 7:

Einzelaufnahme der Primärspule.

2.3.3 Die Sekundärspule

Die Sekundärspule stellt zusammen mit dem Torus und der Erdung den (etwas versteckten) Sekundärschwingkreis dar.

Sie besteht aus einem 0,35 mm dicken Kupferlackdraht, welcher auf ein 55 cm langes PVC-Abflussrohr in ca. 1110 Windungen gewickelt ist. Die Spule an sich ist 40 cm lang, da die restlichen 15 cm als „Platzhalter“ eingeplant sind, wobei 10 cm auf den Standfuß und 5 cm auf den Abstand zum Torus entfallen.

Die Sekundärspule erreicht eine Induktivität von ca. 33,12 mH und eine Eigenkapazität von 7,52 pF, welche zu der Kapazität des Torus addiert wird. Ohne den Torus liegt im Sekundärschwingkreis eine Resonanzfrequenz von ca. 318,84 kHz vor. Der DC-Widerstand der Spule beträgt 68,8 Ω , der Widerstand, welcher durch den Skineneffekt (siehe Kapitel 2.5) hervorgerufen wird, beträgt ca. 19,45 Ω .

Beim Wickeln der Spule ist zu beachten, dass die Windungen direkt nebeneinander liegen und sich nicht überlappen, da es sonst zu Corona-Entladungen kommen kann, welche in die Sekundärspule einschlagen und sie beschädigen oder sogar irreparabel zerstören können. Abschließend wurde die gesamte Spule mit Isolator-Plastik-Spray in mehreren Schichten eingesprüht, um die Windungen zu fixieren und Überschläge zu vermeiden.

An die beiden Enden der Spule sind zwei Kabel (1,5 mm²) angelötet, um am unteren Ende ein Erdungskabel und am oberen Ende den Torus anschließen zu können.

Die Sekundärspule steht zentriert in der Primärspule. Um einen stabilen Stand realisieren und eine andauernde Ausrichtung bei jedem Aufbau vermeiden zu können, wird ein runder Holzfuß mit dem Innendurchmesser der Sekundärspule zentriert auf die Holzplatte der Primärspule geschraubt. Nun ist es möglich, die Sekundärspule einfach drauf zustecken und die Apparatur zu betreiben, ohne dass die Gefahr besteht, dass die



Sekundärspule umfällt.

Die Sekundärspule muss an der unteren Seite unbedingt geerdet werden. Dabei sollte man keine Steckdose der Hauselektronik benutzen, da die hochfrequenten Ströme empfindliche Elektrogeräte zerstören können. Besser eignet sich schlichtweg der Blitzableiter oder die Erdung der Heizungsrohre. Bei Leistungen ab 1 kW sollte man eine extra hochspannungssichere Erdung installieren. Hierzu kann man einen langen Metallstab einige Meter vom Haus entfernt in der Erde versenken.

Abb. 8:

Einzelaufnahmen der Sekundärspule mit aufgesetztem Torus.

2.3.4 Der Kondensator

Als Kondensator werden kommerzielle hochspannungs- und impulsfeste MKP-Kondensatoren verwendet. Besser geeignet wären FKP-Kondensatoren, welche, im Vergleich zu MKP-Kondensatoren mit metallbestäubter Folie, eine Metallfolie besitzen, welche durchschlagsicherer ist. Zur Not funktionieren MKP-Kondensatoren jedoch auch sehr gut.

Bei der Wahl des Kondensators ist darauf zu achten, dass die Wechselstrom-Spannungsfestigkeit über der Scheitelspannung \hat{u} des Primärtransformators liegt, welche sich aus $\hat{u} = U_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2}$ berechnen lässt, da der Kondensator ansonsten sehr schnell durchschlagen kann. Die Gleichstrom-Spannungsfestigkeit liegt bei solchen Kondensatoren oft weit über der Wechselstrom-Spannungsfestigkeit. Kondensatoren, bei welcher die Gleichstrom-Spannungsfestigkeit mehr als das doppelte der Wechselstrom-Spannungsfestigkeit beträgt, erweisen sich oft als eher ungeeignet, wobei bei diesem Projekt ohne hohe Kosten zu verursachen leider keine anderen zur Verfügung standen.

Die benötigte Kapazität lässt sich annähernd nach der Formel $\frac{1}{\omega C} = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} \Leftrightarrow C = \frac{I_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}} \cdot \omega}$

berechnen. Für die maximale Leistung sollte somit die Impedanz des Kondensators der Primärtransformatorimpedanz entsprechen.

Mit $U_{\text{eff}} = 10.000 \text{ V}$, $I_{\text{eff}} = 0,02 \text{ A}$ und $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}$ ergibt sich eine Kapazität von ca. 6,37 nF. Eine höhere Kapazität kann jedoch nicht schaden, da sie unter anderem zu längeren Streams aus dem Torus führt.

Zum Bau des MMC (Multi-Mini-Cap) werden Kondensatoren des Typs MMKP-383 mit $0,47 \mu\text{F}$ und Spannungsfestigkeiten von $U_{\text{DC}} = 1000 \text{ V}$ und $U_{\text{AC}} = 350 \text{ V}$ der Firma *BCcomponents* verwendet. Hierzu wird eine Reihenschaltung von 50 Stück auf Lochplatinen gelötet. Von dieser Reihenschaltung werden 2 Schaltungen parallel geschaltet, sodass bei 100 verwendeten Kondensatoren eine Spannungsfestigkeit von $U_{\text{DC}} = 50.000 \text{ V}$ und $U_{\text{AC}} = 17.500 \text{ V}$ bei einer Gesamtkapazität von 18,8 nF entsteht.

Die Lötstellen auf den Lochplatinen sollten zur Sicherheit noch einmal extra mit dem Isolierlackspray, welches auch bei der Sekundärspule zur Versiegelung verwendet wurde, eingesprüht werden, um Überschläge zu vermeiden.

Die Kondensatoren wurden in einem Holzgestell übereinander gestapelt, um so die Form eines „Turms“ zu erreichen. So nehmen sie wenig Platz weg und stehen stabil.

Da kommerzielle Hochspannungs- und Hochfrequenzkondensatoren oft sehr teuer sind und diese Variante eines Kondensators daher sehr kostspielig ist, gibt es natürlich auch andere Möglichkeiten einen Kondensator zu bauen:

Zum einen kann man selbst gebaute Plattenkondensatoren aus abwechselnd aufeinander gelegter Alu- und PE-Folie verwenden. Hierbei wird jede zweite Alufolie verbunden; die PE-Folie stellt das Dielektrikum dar. Nachdem alles verkabelt ist, muss es stark zusammengepresst werden, damit sich keine Luft mehr zwischen den Platten befindet. Das Ganze sollte nun in Öl (Motoröl,...) eingelegt und luftdicht verschlossen werden. Lediglich die beiden Anschlüsse dürfen heraussehen. Das Öl verhindert das Eindringen von Luft und bietet durch seine schlechte Stromleitfähigkeit darüber hinaus einen guten Schutz vor einem Durchschlagen zwischen den Elektroden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Bau eines Flaschenkondensators, auch bekannt als Leydener-Flasche. Hier müssen Flaschen von außen mit Alu-Folie umwickelt werden (eventuell mit Sprühkleber fixieren). In die Flaschen wird eine Salzwasser-Lösung gefüllt und die Flaschen verschlossen.



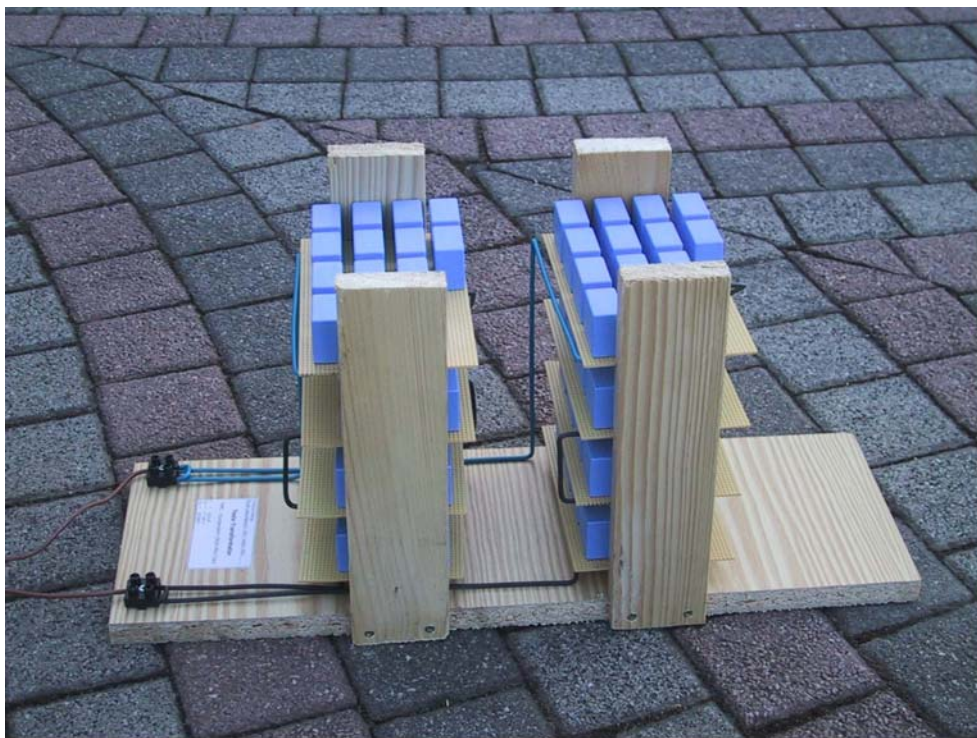
Durch den Deckel wird eine Gewindestange gebohrt, welche mit der Salzwasser-Lösung die eine Elektrode darstellt. Die andere Elektrode wird durch die Alu-Folie geliefert; das Glas der Flasche ist das Dielektrikum.

Eine solche Flasche (1 Liter-Flasche) liefert eine ungefähre Spannungsfestigkeit von 10.000 Volt und eine Kapazität von 1 nF. Eine geschickte Serien- und Parallelschaltung ermöglicht vergleichbare Kapazitäten und Spannungsfestigkeiten wie bei Schaltungen von kommerziellen Kondensatoren.

Der Vorteil dieser Kondensatoren ist die günstige und unkomplizierte Herstellung; der Nachteil besteht in der unhandlichen Größe sowie dem enormen Gewicht.

Abb. 9 und 10:

Einzelaufnahmen des MMC-Kondensators.



2.3.5 Die Funkenstrecke

Die Funkenstrecke stellt das einzige aktive Bauteil im gesamten Tesla-Transformator dar und bedarf deshalb besonderer Beachtung. Abbildung 11 zeigt den schematischen Aufbau einer Serienfunkenstrecke sowie einer rotierenden Funkenstrecke.

Die verwendete Serienfunkenstrecke besteht aus 5 Kupferrohren mit einer Länge von jeweils 7 cm und einem Durchmesser von 2,8 cm. Sie sind in Abständen von 1-2 mm auf eine Plexiglas-Platte geschraubt. Die herausschauenden Schrauben ermöglichen es, den Abgriff an den Rohren mittels Krokoklemme zu variieren und somit den Tesla-Transformator abzustimmen. Generell lässt sich festhalten, dass eine mehrstufige Funkenstrecke mehr Energie und somit längere Streams bringt als nur 2 Elektroden, zwischen denen die Hochspannung nur einmal überspringt. Die Luftleitfähigkeit von Spannung beträgt 1 mm pro 1 kV.

Durch die noch nicht so hohe Eingangsspannung von 10 kV kann man ohne Bedenken eine statische Funkenstrecke verwenden, sollte sie jedoch mit Pressluft oder einem Staubsauger kühlen, damit die Funken immer gut abreißen und das Kupfer kalt bleibt. Denn umso kälter die Elektroden sind, umso besser lassen sie die Funken überspringen, was zur Auf- und Entladung des Kondensators unbedingt nötig ist.

Bei höheren Eingangsspannungen sollte eine rotierende Funkenstrecke verwendet werden, bei welcher die Funken durch die rotierenden Elektroden garantiert abreißen. Darüber hinaus entsteht durch die Rotation eine automatische Kühlung, was einen großen Vorteil bietet.

Die Funkenstrecke übernimmt die Aufgabe des ständigen Auf- und Entladevorgangs des Primärkreis Kondensators. Sie wird leitend, sobald der Kondensator vollkommen aufgeladen ist. Im jetzt geschlossenen Primärkreis beginnt eine hochfrequente Spannung, die sich durch die induktive Kopplung allmählich auf den Sekundärkreis überträgt. Ist die Energie des Primärkreises vollständig auf den Sekundärkreis übergegangen, wird die Funkenstrecke (idealerweise) wieder nichtleitend und der ganze Vorgang beginnt von Vorne. Die Funkenstrecke sollte bei optimaler Einstellung der beiden Schwingkreise 2mal pro 50 Hz-Periode des Wechselstroms zünden, sodass pro Sekunde 2 Ausschläge am Tesla-Transformator auftreten.

Während des Betriebs darf die Funkenstrecke, wie jedes andere Bauteil, nicht berührt werden, da tödliche Spannungen und Ströme anliegen! Man sollte für eine gute Belüftung des Raumes sorgen, da neben Stickoxiden auch Ozon entsteht, was zu Müdigkeit, Kopfschmerzen und Atemproblemen führen kann. Des Weiteren bleibt noch zu erwähnen, dass beim Betrieb UV-Strahlung sowie Röntgenstrahlung (durch das Auftreffen beschleunigter Elektronen auf Metall) entsteht. Wegen der UV-Strahlung sollte man daher nicht direkt in die Funken sehen, auch wenn es eindrucksvoll aussieht.

Bei längerem Betrieb ist es zu empfehlen, einen Gehörschutz zu tragen, da die Funkenstrecke durch die überspringenden Funken einen riesigen Lärm erzeugt.

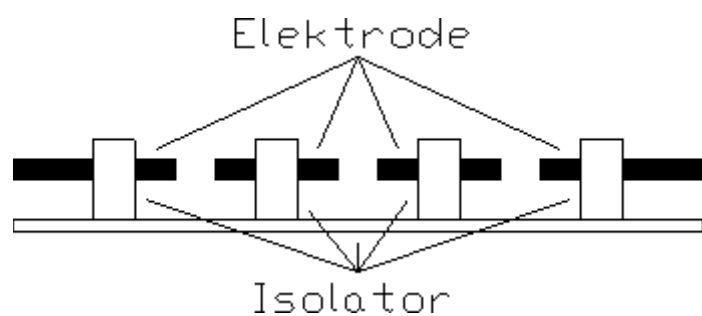
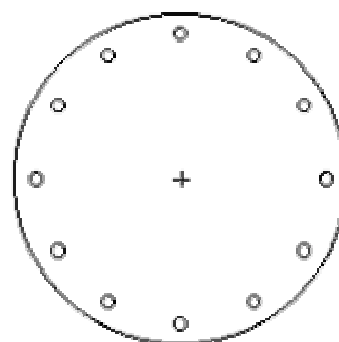
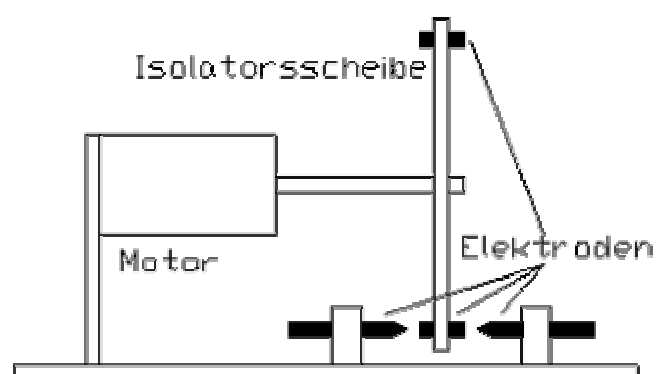


Abb. 11:
Der schematische Aufbau einer Serienfunkenstrecke (links) und einer rotierenden Funkenstrecke (unten).



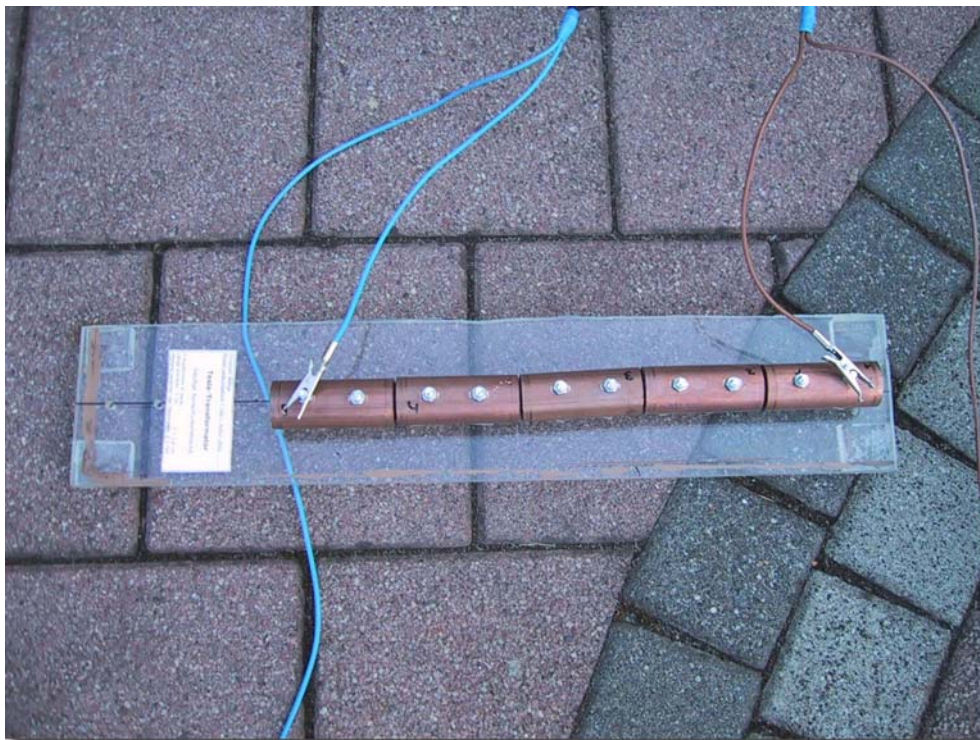


Abb. 12 und 13:

Einzelaufnahmen der Serienfunkenstrecke.
Oben im ausgeschalteten Zustand, unten
in Funktion.

2.3.6 Der Torus

Der Torus dient dazu, die hohen induzierten Spannungen aus der Sekundärspule letztendlich abzuleiten. Er besteht aus einem Aluflex-Schlauch mit einem Durchmesser von 8 cm. Der Torus hat einen äußeren Durchmesser von 36 cm und besitzt dadurch eine Kapazität von ca. 15,62 pF, welche sich mit der Kapazität der Sekundärspule zur Gesamtkapazität addiert. Mit dem Torus herrscht im Sekundärschwingkreis somit eine Resonanzfrequenz von ca. 181,76 kHz.

Die beiden Enden des Aluflex-Schlauches werden durch leitendes Aluminium-Klebeband verbunden, welches man in jedem guten Baumarkt erhält. Die beiden Schlauchenden, die zu einem Ring zusammengesteckt werden, müssen unbedingt leitend miteinander verbunden werden, da ansonsten eine weitere Induktivität entsteht.

Der Torus wird durch einen Draht mit der Sekundärspule verbunden und durch eine Halterung in das PVC-Rohr der Sekundärspule gesteckt. Die Halterung besteht aus einem Plexiglaskreis mit einem Durchmesser von 20 cm und einem zentriert aufgeschraubten Holzfuß, um den Torus auf die Sekundärspule stecken zu können. Die Halterung wurde mit Zweikomponentenkleber in den Torus geklebt.

Eine ringförmige Elektrode wie ein Torus ist einer Metallkugel vorzuziehen, da die Kugel auch Entladungen nach unten zulässt, wodurch die Gefahr der Einschläge in die Sekundärspule erhöht wird. Diese ist dann nach einigen Einschlägen schon irreparabel defekt.



Abb. 14:

Zusammengebauter und
angeschlossener Tesla-Transformator
(Primärspule, Sekundärspule und Torus).

2.4 Sicherheitshinweise

Zum Betrieb des Tesla-Transformators gibt es einige wichtige Punkte der Sicherheit, welche unbedingt beachtet werden müssen.

- Dieses Protokoll, sowie viele weitere Literaturquellen (Bücher, Internet, ...), bietet eine Bauanleitung für einen voll funktionsfähigen Tesla-Transformator. Der Nachbau sollte jedoch nur von Personen durchgeführt werden, die über genügend Vorwissen sowie genügend physikalisches Wissen und Verständnis, gerade im Bereich der E-Lehre, verfügen. Der eigene Nachbau erfolgt auf eigene Gefahr. Der Autor dieses Protokolls übernimmt keinerlei Haftung für jegliche entstandene Schäden.
- Während des Betriebs ...
 - ... darf kein Bauteil berührt werden, da tödliche Spannungen und Ströme anliegen. Man sollte immer einen Sicherheitsabstand von 1 Meter von der elektrischen Anlage halten.
 - ... sollten sich keine Chip-Karten oder empfindlichen Elektrogeräte (Computer, Mobiltelefone, Videogeräte, Herzschrittmacher, ...) im Raum befinden bzw. einen Sicherheitsabstand von mindestens 10 Metern haben. Die enormen magnetischen Felder sowie die hochfrequenten elektromagnetischen Schwingungen können empfindliche Geräte stören und sogar irreparabel zerstören!
 - ... sollte sich, gerade beim Erstbetrieb, ein angeschlossenes Erdungskabel in der Nähe (ca. 10 cm Abstand) des Torus befinden, damit man keine unerwarteten Blitzreichweiten bekommt. Diese Sicherheitsvorkehrung sollte besonders beim Erstbetrieb vorgenommen werden, später kann man auf eigene Gefahr etwas herumexperimentieren und die Erdung entfernen, um längere Streams zu erreichen.
 - ... alle Gliedmaßen nahe am Körper halten. Wegen der starken magnetischen Felder kann es bei ausgebreiteten Armen dazu führen, dass in den einen Arm eine andere Spannung induziert wird als in den anderen Arm; dadurch fließen dann Ströme auf Herzhöhe durch den Körper.
 - ... sollte man für eine gute Belüftung des Raumes sorgen, da an der Funkenstrecke neben Stickoxiden auch Ozon entsteht, was zu Müdigkeit, Kopfschmerzen und Atemproblemen führen kann. Des Weiteren bleibt noch zu erwähnen, dass beim Betrieb UV-Strahlung sowie Röntgenstrahlung (durch das Auftreffen beschleunigter Elektronen auf Metall) entsteht. Wegen der UV-Strahlung sollte man daher nicht direkt in die Funken sehen, auch wenn es eindrucksvoll aussieht.
Bei längerem Betrieb ist es zu empfehlen, einen Gehörschutz zu tragen, da die Funkenstrecke durch die überspringenden Funken einen riesigen Krach macht.
- Während der Transformator ausgeschaltet ist, sollte der Kondensator immer kurzgeschlossen werden, da ansonsten in der Ruhephase durch den *Dielectric-Memory-Effekt* tödliche Ladungen entstehen können.
- Wegen der Gefahr des internen Überschlages sollte man keine Schalter, sondern nur einen Netzstecker verwenden.
- Übrigens ist es entgegen der landläufigen Meinung *nicht* ungefährlich, die Entladungen eines Tesla-Transformators durch den Körper gehen zu lassen. Der häufig zitierte *Skinneffekt* (siehe Kapitel 2.5), nach dem hochfrequente Ströme nur an der Oberfläche von Leitern fließen, ist wegen der geringen Leitfähigkeit des menschlichen Körpers wirkungslos. Zudem enthält die Ausgangsspannung von Tesla-Transformatoren, die mit Funkenstrecken betrieben werden, häufig eine 50 Hz-Komponente, die viel gefährlicher als die Hochfrequenz ist.

2.5 Der Skineffekt

Bei hoher Frequenz verteilt sich der Strom nicht über den ganzen Querschnitt eines zylindrischen Leiters mit gleicher Dichte, sondern drängt sich an die Oberfläche. Die Veranlassung zu diesem **Skin-** oder **Hauteffekt** ist die innere Selbstinduktion.

Durch ein Flächenelement dr ds im Drahtinnern greift ein Magnetfeld hindurch, dessen Änderung ein elektrisches Wirbelfeld \mathbf{E}_{ind} induziert. Es ist auf der der Achse zugewandten Seite dem angelegten Feld \mathbf{E} entgegengerichtet, auf der anderen Seite gleichgerichtet. Das resultierende Feld muss also von der Achse nach außen zunehmen, ebenso wie der von ihm erzeugte Strom. Bei hohen Frequenzen wird der Strom fast vollständig an die

Oberfläche verdrängt. In der Tiefe $d = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_r \mu_0 \omega}}$ ist er bereits auf e^{-1} abgefallen (ρ , μ_r

spezifischer Widerstand und Permeabilität des Drahtes, ω Kreisfrequenz). Eine weitere Folge der inneren Selbstinduktion ist eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.

Der Skineffekt führt dazu, dass ein Draht für hochfrequenten Wechselstrom einen höheren Widerstand hat als für Gleichstrom. Wenn die Dicke d der effektiv leitenden Schicht klein gegen den Drahtdurchmesser ist, bestimmt nicht mehr der Querschnitt, sondern der Umfang den Widerstand. Daher verwendet man als Hochfrequenzleiter dünnwandige Rohre oder Litzen.

Die vollständige Theorie des Skineffektes ist ziemlich kompliziert. Deshalb wird eine Kurzfassung gegeben. Selbst bei den höchsten technisch erreichbaren Frequenzen spielt in guten Leitern der Verschiebungsstrom \dot{D} keine Rolle gegen die Stromdichte j . Man sieht das aus dem Vergleich von $\dot{D} = \omega \varepsilon_0 E$ mit $j = \sigma E$. Für $\omega \ll \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \approx 10^{18} \text{ s}^{-1}$ ist $\dot{D} \ll j$.

Die Maxwell-Gleichungen lauten dann

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \text{rot } \mathbf{E} = \frac{1}{\sigma} \text{rot } \mathbf{j} = -\mu_r \mu_0 \dot{\mathbf{H}}$$

Elimination von \mathbf{H} führt auf $\text{rot rot } \mathbf{j} = \sigma \mu_r \mu_0 \dot{\mathbf{j}}$. Die zeitliche Ableitung entspricht einer Multiplikation mit ω , die zweimalige räumliche (rot rot) einer zweimaligen Multiplikation mit der reziproken Schichtdicke, auf der der Stromabfall auf e^{-1} erfolgt:

$$\frac{1}{d^2} j \approx \omega \sigma \mu_r \mu_0 j$$

Das ist die oben angegebene Beziehung für d , hier für eine Platte.

2.6 Theoretische Betrachtung

Zur theoretischen Betrachtung werden hier tabellarisch die wichtigsten Werte des Tesla-Transformators zusammengestellt.

Die Daten wurden mit einem im Internet weit verbreiteten Java Script zur Berechnung von Tesla-Transformatoren errechnet.

Angaben zum Primärschwingkreis

Innendurchmesser	33 cm
Lücke zwischen den Windungen	1 cm
Drahtdurchmesser	3 mm
Windungszahl	20 Windungen
Wicklungswinkel (0° = flach; 90° = vertikal)	90°
Höhe oberhalb Sekundärspulenanfang	0 mm
Spulenhöhe	20 cm
Induktivität	
• bei 10 abgegriffenen Windungen	38,48 μ H
• bei 20 abgegriffenen Windungen	104,95 μ H
Kapazität des Kondensators	18,8 nF

Angaben zum Sekundärschwingkreis

Durchmesser des Spulenkörpers	11 cm
Lücke zwischen den Windungen	< 0,01 mm
Drahtdurchmesser	0,35 mm
Wicklungslänge	40 cm
Windungszahl	ca. 1110 Windungen
Induktivität	33,12 mH
Dicke des Torus	8 cm
Außendurchmesser des Torus	36 cm
Aspektverhältnis	3,62
Medhurst K	0,68 pF/cm
Eigenkapazität der Sekundärspule	7,52 pF
Torus-Kapazität	15,62 pF
Resonanzfrequenz ohne Torus	318,84 kHz
Resonanzfrequenz mit Torus	181,76 kHz
DC-Widerstand	68,8 Ohm
Widerstand durch Skineffekt	19,45 Ohm
Güte	428,71
Benötigte Primärkapazität	19,92 nF
Kopplungsfaktor zwischen Primär- und Sekundärspule	$\frac{1}{9}$

Durch Abgreifen von ca. 10 Primärwindungen lässt sich, mathematisch betrachtet, zwischen den beiden Schwingkreisen eine Resonanzschwingung von ca. 187,1 kHz einstellen. Experimentell wurden durch Abgreifen der oberen 10 Primärwindungen auch die längsten Blitze gemessen.

Alle Angaben sind ungefähre Werte und können geringfügige Abweichungen aufweisen.

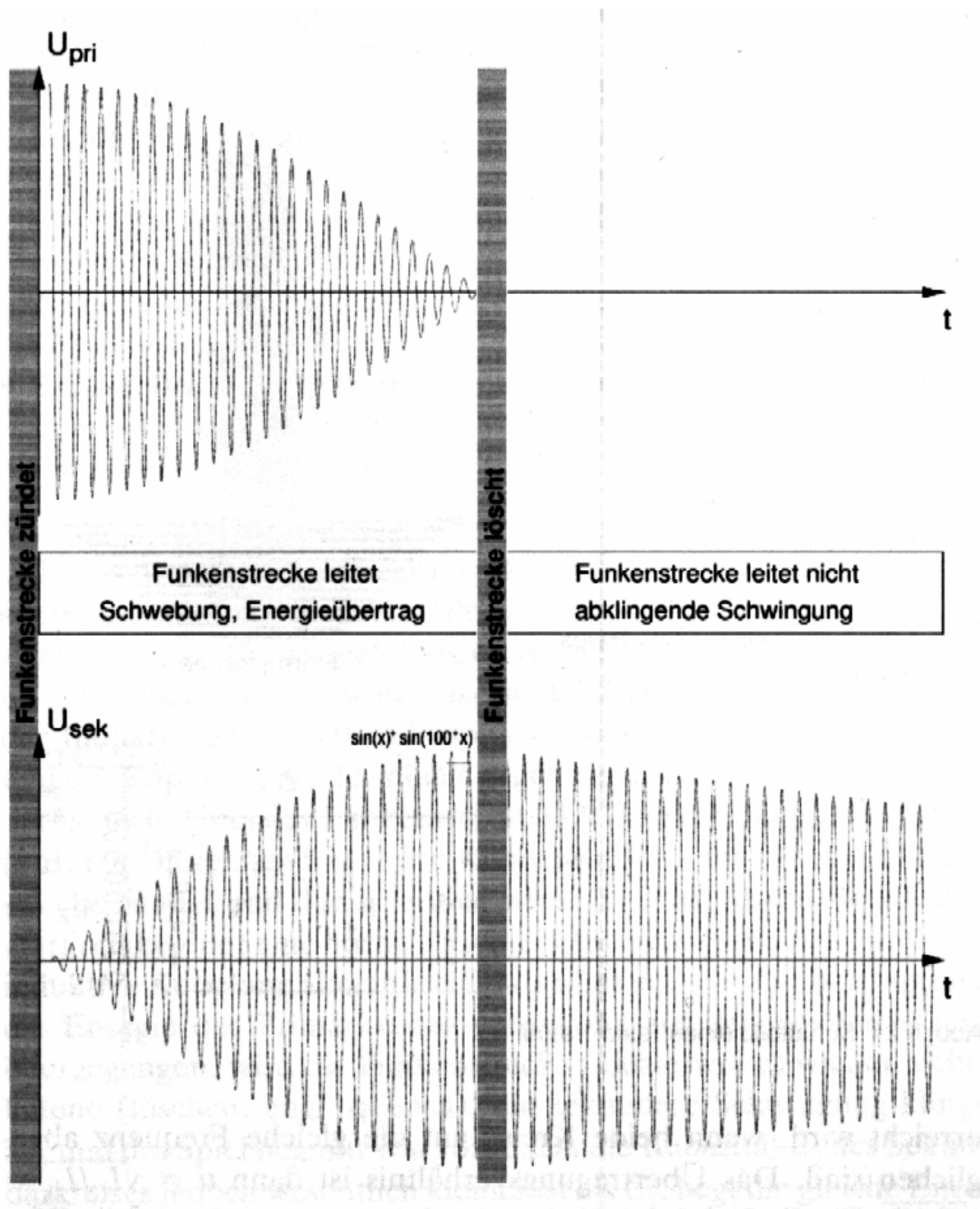


Abb. 15:
Spannungsverlauf am Tesla-Transformator
(idealisiert, ohne sekundäre Funkenentladung).

3. Versuchsauswertung

3.1 Experimente mit dem Tesla-Transformator

Man kann mit dem Tesla-Transformator eine Vielzahl von Experimenten durchführen, um so die Wirkung der starken magnetischen Felder, der elektromagnetischen Strahlung sowie der hochfrequenten Spannungen zu zeigen.

Durch die hochfrequente elektromagnetische Strahlung sollte eine handelsübliche Neonröhre, natürlich ohne angeschlossene Kabel, anfangen zu leuchten, wenn man sie in die Nähe des Torus bringt.



Wenn man eine Glühbirne an den Torus hält, sollte sie anfangen zu leuchten und dabei aussehen wie eine Plasmakugel.

Abb. 16:

Einzelaufnahme einer Glühbirne
in der Nähe des Torus.

Des Weiteren lassen sich realistische Blitzeinschläge wie man sie aus der Natur kennt, simulieren. Für noch größere und daher naturgetreuere Einschläge ist ein Marx-Generator von Vorteil, da dieser weit höhere Spannungen zu erzeugen vermag.



Abb. 17:

Entladung gegen Erde.

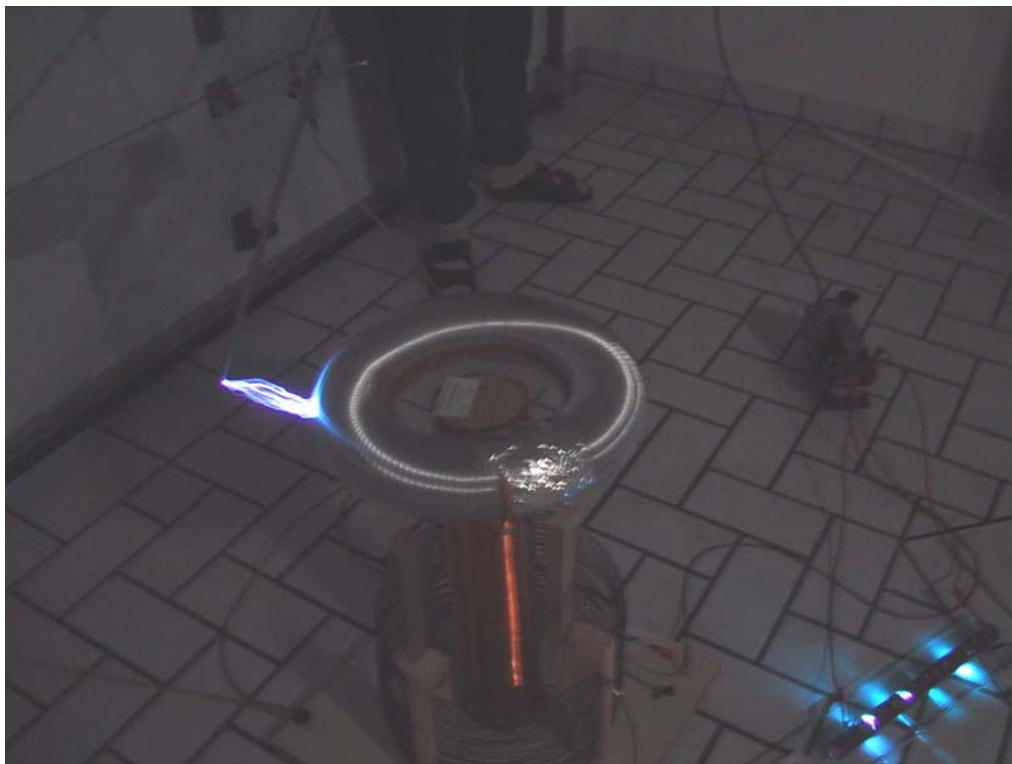


Abb. 18 und 19:
Entladungen gegen Erde in unterschiedlichen Abständen.

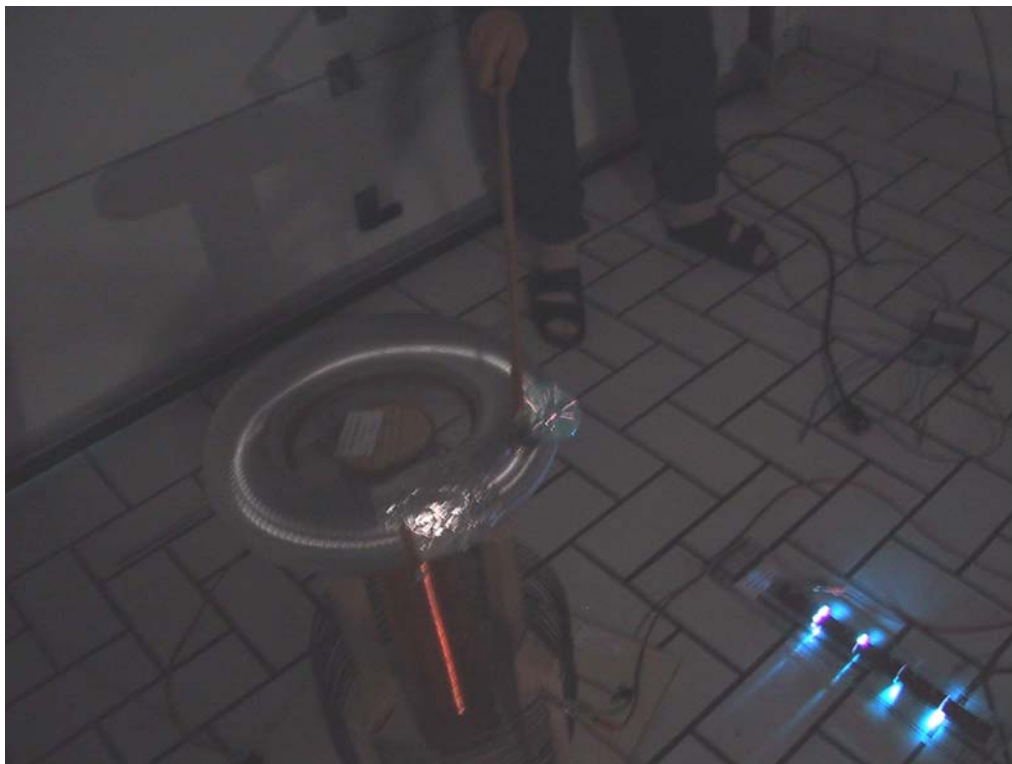
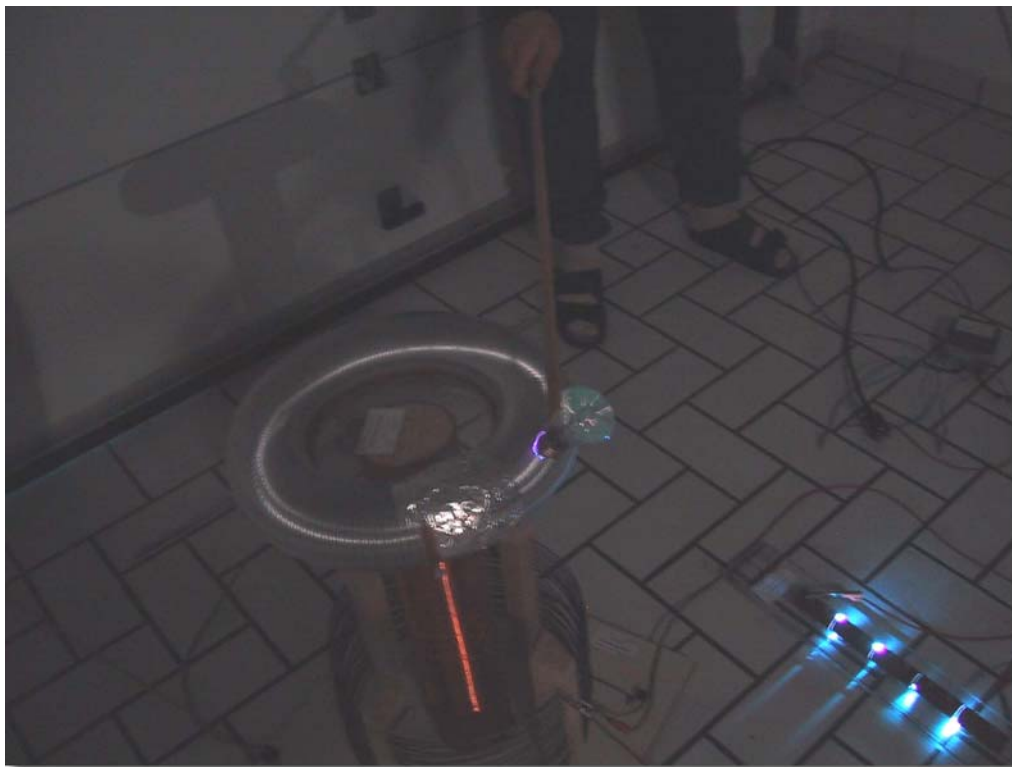


Abb. 20 und 21:
Eine Glühbirne in der Nähe des Torus fängt durch die elektromagnetische Strahlung an zu Leuchten wie eine Plasmakugel.



Abb. 22 und 23:

Oben: Eine Neonröhre in der Nähe des Torus fängt ebenfalls an zu leuchten.
Unten: Die Funkenstrecke in Funktion.

3.2 Wissenschaftliche Erkenntnisse

Neben den möglichen Experimenten, mit denen sich die hochfrequente elektromagnetische Strahlung und die magnetischen Felder nachweisen lassen, finden, wie in Kapitel 2.1 angesprochen, hochfrequente Ströme in der Medizin Anwendung.

Ersetzt man die Sekundärspule durch eine Spule mit wenigen Windungen aus dickem Draht, so werden in ihr starke Ströme niedriger Spannung induziert, in die man z.B. den menschlichen Körper einschalten kann. Diese **Hochfrequenzströme** finden in der medizinischen Therapie als **Diathermieströme** eine wichtige Anwendung. Während Gleichströme oder niederfrequente Wechselströme von 10 bis 100 mA, die durch den menschlichen Körper gehen, tödlich wirken, können Hochfrequenzströme bis über 10 A ohne Schädigung durch ihn hindurchfließen; die untere Grenze der unschädlichen Frequenz liegt bei 10^5 Hz. Während von außen zugeführte Wärme die Temperatur nur einige Millimeter unter der Hautoberfläche erhöht, erwärmt die von den Hochfrequenzströmen entwickelte Joulsche Wärme tief im Innern des Körpers liegende Organe.

Aus physikalischer Sicht betrachtet lässt sich durch die induktive Kopplung der Primär- und Sekundärspule die Induktion von hochfrequenten Spannungen, die bis in den Megavoltbereich gehen können, zeigen. Weiterhin lässt sich durch die aufgezeigten Experimente die enorme elektromagnetische Strahlung sowie die hohen magnetischen Felder nachweisen.

4. Fehlerbetrachtung

4.1 Mögliche Fehlerquellen und Optimierungsvorschläge

Die Funkenstrecke ist ein sehr empfindliches Bauteil, bei welchem auf präzise Bauweise geachtet werden sollte. Die Abstände zwischen den Elektroden sollten nicht zu groß, aber auch nicht zu klein sein. Pro kV lässt sich 1 mm Luft ionisieren. Darüber hinaus sollte auf eine gute Kühlung geachtet werden, damit die Funken gut abreißen.

Eine rotierende Funkenstrecke bringt dem Tesla-Transformator eine höhere Leistung.

Um die Leistung und die Ausgangsspannung noch mehr zu erhöhen, kann man einen so genannten Levelshifter einsetzen, der ähnlich wie ein Spannungsverdoppler wirkt.

Unter der Voraussetzung, dass die Kondensatoren im gekoppelten Zustand die Anforderungen der Spannungsfestigkeit erfüllen, ist auf kalte Lötstellen zu achten. Des Weiteren sollte die Kapazität nicht zu gering sein, da sonst nur kurze oder keine Entladungen erreicht werden. Somit beeinflusst die Primärkapazität die Entladungslänge und somit die induzierte Spannung.

Bei der induktiven Kopplung der beiden Spulen sollte darauf geachtet werden, dass die Sekundärspule zentriert und isoliert, also nur durch induktive Kopplung „verbunden“, in der Primärspule steht. Der Kopplungsfaktor berechnet sich aus dem Verhältnis der Querschnittsflächen und sollte maximal 0,16 betragen.

Bei den Spulen ist auf saubere und ordentliche Wicklung zu achten. Die Windungen der Sekundärspule müssen exakt nebeneinander liegen und dürfen sich nicht überlappen, da es ansonsten zu Corona-Überschlägen kommen kann, was die Sekundärspule irreparabel zerstört.

Generell sollten keine Kabel direkt nebeneinander liegen und auch bei Verwendung von Listerklemmen sollte immer mindestens eine Klemme ausgelassen werden; ansonsten kann es auch hier zu Überschlägen kommen, was sich negativ auf die Leistung des Tesla-Transformators auswirkt.

Für die Verkabelung sollten stabile isolierte Kabel genommen werden, deren Dicke mindestens einem 1,5 mm²-Kabel entspricht.

Man sollte stets isolierende Untergründe wie Steinböden oder ähnliches verwenden, damit nirgends eine ungewünschte Erdung besteht, wodurch die Leistung des Tesla-Transformators stark beeinträchtigt wird und Kabel durchschlagen können.

Die Erdung der Sekundärspule sollte die Ströme gut ableiten. Deshalb ist es zu empfehlen einen Blitzableiter oder die Erdung der Heizung zu verwenden. Für größere Tesla-Transformatoren ist eine extra Erdung von Vorteil. Hierzu kann man eine sehr lange Metallstange senkrecht in den Boden stecken.

Die beiden Schwingkreise müssen in Resonanz schwingen. Nur so kann man lange und effektive Entladungen erreichen. Die Resonanz stellt man mit Hilfe einer Krokoklemme an der Primärspule ein, indem man mehr oder weniger Windungen abgreift. Achtung: Die Bauteile bitte nur angreifen und verändern, wenn der Netzstecker gezogen ist. Ein Kontakt, gerade mit dem Primärschwingkreis, kann tödlich enden!

Wie in 2.3.1 beschrieben, hat es sich bewährt auch andere Primärtransformatoren zu testen, die dem Tesla-Transformator eventuell zu mehr Leistung und somit längeren Streams verhelfen.

Weiterhin sollte man im Allgemeinen auf präzise Verarbeitung der gesamten Bauteile achten. Am besten man macht sich vorher einen genauen Plan, wie welches Bauteil aussehen und gebaut werden soll.

5. Kleine Formelsammlung

Es folgt eine Auflistung der wichtigsten Formeln, die zum Bau und zur Berechnung eines Tesla-Transformators benötigt werden. Auf der nächsten Seite sind die Größen mit den gesetzlichen Einheiten beschrieben.

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2}{l} A$$

Induktivität einer langen Spule

$$L \approx \frac{\mu_0 \mu_r D N^2}{8}$$

Induktivität einer flachen Spule

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Resonanzfrequenz

$$P = U I$$

Elektrische Leistung

$$\hat{u} = \sqrt{2} U_{eff}$$

Effektiv- und Scheitelwerte von Spannung und Strom

$$\hat{i} = \sqrt{2} I_{eff}$$

$$C_{ges} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Parallelschaltung von Kondensatoren

$$U_{ges} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Reihenschaltung von Kondensatoren

$$U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$Q_{ges} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r r$$

Kapazität einer freistehenden Kugel

$$U_{sek} = U_{prim} \cdot \sqrt{\frac{C_{prim}}{C_{sek}}}$$

Ungefäher Wert der in der Sekundärspule induzierten Spannung

$$l_{spark} = 0,8806 \cdot Input[kW]^{0,6052}$$

Ungefähre Streamerlänge

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

Magnetische Flussdichte

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

Magnetischer Fluss

Gesetzliche Einheiten und ergänzende Erläuterung

Größe	Einheit	Bedeutung
L	Henry (H)	Induktivität
μ_0	$\frac{Vs}{Am}$	Magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
μ_r	1	Permeabilitätszahl (Bei Luft gilt $\mu_r=1$)
N	1	Windungsanzahl
l	m	Länge
A	m ²	Querschnitt der Spule
D	m	Durchmesser
C	Farad (F)	Kapazität
f	Hertz (Hz) = s ⁻¹	Frequenz
P	Watt (W)	Leistung
U	Volt (V)	Spannung
I	Ampere (A)	Stromstärke
\hat{u}	Volt (V)	Scheitelspannung
\hat{i}	Ampere (A)	Scheitelstromstärke
U _{eff}	Volt (V)	Effektivspannung
I _{eff}	Ampere (A)	Effektivstromstärke
Q	Coulomb (C)	Ladung
r	m	Radius der Kugel
ϵ_0	$\frac{As}{Vm}$	Elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
ϵ_r	1	Dielektrizitätszahl (Bei Luft gilt $\epsilon_r=1$)
B	Tesla (T)	Magnetische Flussdichte
Φ	Weber (Wb)	Magnetischer Fluss

6. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich diversen Personen und Firmen für ihre Unterstützung meinen Dank aussprechen.

Ich möchte mich hiermit herzlich bedanken bei...

... Herrn Norbert Großberger
und Herrn Erwin Bernhardi

Für die finanzielle und beratende
Unterstützung und die Ermöglichung des
Projektes innerhalb der Physik AG.

... dem Zentrum für Mathematik

Für die finanzielle Unterstützung

... meinem Vater Lothar Böttge

Für Unterstützung und Hilfe beim Bau der
einzelnen Bauteile



...
BCcomponents B.V.

Für 100 kostenlose Kondensatoren des
Typs
MMKP-383, $U_{DC}=1000$ V, $U_{AC}=350$ V,
 $C=0,47$ μ F

(Niederlande)

Web: www.bccomponents.com

Schreiner Weizel & Pfeiffer

Für die Unterstützung beim Bau der
Primärspulenhalterung

Fa. Markus Brübler
- Klimatechnik -

Für den Aluflexschlauch

Glas Hetterich GmbH

Für kostenlose Plexiglas-Platten