

# FACHARBEIT

aus dem Fach

# PHYSIK

Thema:

# BAU UND INBETRIEBNAHME EINER TESLASPULE

Verfasser      Marc Rößler  
Leistungskurs    Ph 20  
Kursleiter  
Abgabetermin

Erzielte Note    \_\_\_\_\_ in Worten    \_\_\_\_\_

Erzielte Punkte    \_\_\_\_\_ in Worten    \_\_\_\_\_

(Einfache Wertung)

Dem Kollegstufenbetreuer vorgelegt am \_\_\_\_\_

---

Unterschrift des Kursleiters

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Praktischer Aufbau der Teslaspule</b>	<b>3</b>
2.1	Schaltskizze des Aufbaus . . . . .	3
2.2	Die einzelnen Komponenten und ihre Funktion . . . . .	4
2.2.1	Hochspannungsquelle . . . . .	4
2.2.2	Hochfrequenzdrosseln . . . . .	6
2.2.3	Funkenstrecke . . . . .	6
2.2.4	Kondensator . . . . .	7
2.2.5	Primärspule . . . . .	9
2.2.6	Sekundärspule . . . . .	10
2.3	Das Zusammenwirken der Komponenten . . . . .	11
2.4	Allgemeine Berechnungen und Messungen . . . . .	12
2.4.1	Ermittlung der Resonanzfrequenz der Sekundärspule . . . . .	12
2.4.2	Ermittlung der Resonanzfrequenz des Primärkreises . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Betrieb der Teslaspule</b>	<b>14</b>
3.1	Vorsichtsmaßnahmen bei der Inbetriebnahme . . . . .	14
3.2	Abstimmen der Teslaspule . . . . .	16
3.3	Versuche mit der Teslaspule . . . . .	16
3.3.1	Bestimmen der Schlagweite . . . . .	16
3.3.2	Spitzenentladungen . . . . .	16
3.3.3	Drahtlose Energieübertragung . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Dank</b>	<b>21</b>

# 1 Einführung

Nikola Tesla wurde am 10. Juli 1856 in Smiljan, Kroatien, geboren. Er war zeitweise Mitarbeiter Thomas Edisons und erfand den Drehstrommotor sowie das Mehrphasensystem zur Energieübertragung (vgl. [1, S.349]). Die Teslaspule wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts von ihm erdacht und erbaut. Sie wird auch als ‘Teslatransformator’ bezeichnet, was jedoch zu der falschen Annahme verleitet, die Funktion würde nur auf dem Prinzip des Transformators basieren.

Die Teslaspule hat in der Welt des 20. Jh. nur sehr wenige Anwendungen gefunden. Eine davon ist in der Medizin die Erwärmung von Gewebe mit Hilfe von hochfrequenten Strömen (vgl. [3, S.42]), jedoch werden Teslaspulen größtenteils im Filmbereich als Effektgeneratoren oder im Lehrbereich als Demonstrationsobjekte eingesetzt.<sup>1</sup>

Prinzipiell besteht eine Teslaspule aus einer einlagig gewickelten, kernlosen Spule relativ hoher Induktivität, an deren einem Ende eine meist torus- oder kugelförmige Elektrode angebracht ist. Die Spule wird durch eine Wechselspannung, deren Frequenz gleich der Resonanzfrequenz der Spule ist, angeregt. Dies kann geschehen, indem man diese Wechselspannung in eine zweite Spule kleinerer Induktivität (Primärspule) einspeist, welche um die Sekundärspule herum angebracht ist. Meist ist dabei die Primärspule Teil eines Schwingkreises, der auf die Resonanzfrequenz der Sekundärspule abgestimmt ist. Die Schwingungen werden dann induktiv auf die Sekundärspule ausgekoppelt und diese auf diese Weise angeregt. Ist das untere Ende der Sekundärspule geerdet, so liegt am oberen Ende (d.h. dort, wo die Hochspannungselektrode angebracht ist) eine hochfrequente Hochspannung an.

Eine der von Tesla vorgesehenen Anwendungen für die Spule war die drahtlose Energieübertragung über weite Strecken mit Hilfe von Radiowellen.

## 2 Praktischer Aufbau der Teslaspule

### 2.1 Schaltskizze des Aufbaus

Im obigen Bild sind die einzelnen Bauteile der Teslaspule zu sehen. Links die Zuleitungen, die mit dem 230V-Netz verbunden werden, daneben der Netzfilter, der die Hochfrequenz vom Stromnetz fernhalten soll. Er ist zur Funktion der Spule nicht zwingend notwendig. Ebenfalls zu sehen sind der Hochspannungstransformator, der

---

<sup>1</sup>Nachtrag: Das Funktionsprinzip der Teslaspule findet auch beim Zünden von HMI-Lampen (Verwendung im Filmbereich als Beleuchtungskörper) und Xenon-Lampen in Kinoprojektoren Anwendung.

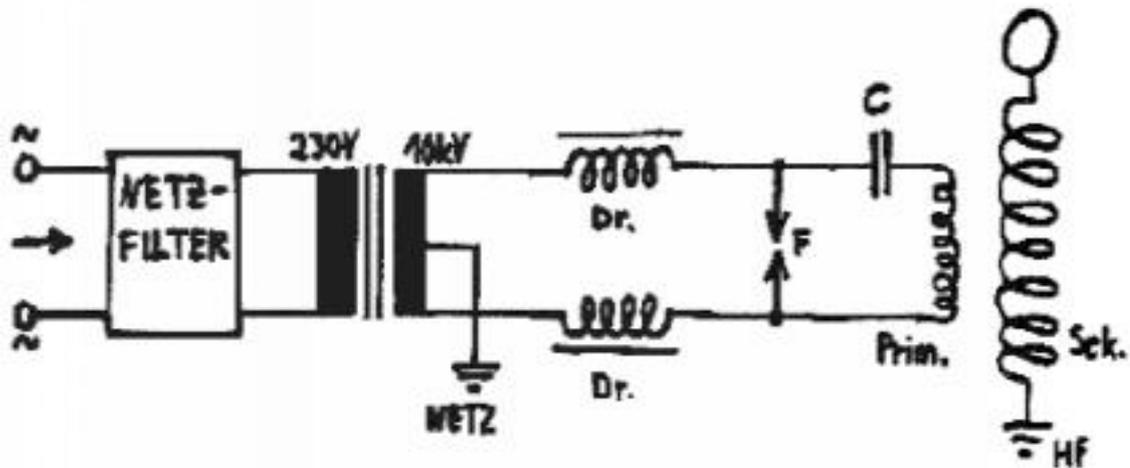


Bild 1: *Schaltskizze der Teslaspule*

die Netzspannung von 230 Volt auf 10 kV herauftransformiert, die nachgeschalteten Drosseln Dr, die Funkenstrecke F, der Kondensator C, die Primärspule sowie die Sekundärspule. Die Netz-Erdung (am Transformator) wird mit der Erdungsleitung des Stromnetzes verbunden, während die HF-Erdung wesentlich massiver (z.B. mit einem Flachbandkabel aus Kupfer) ausgeführt werden muß, da durch sie starke, hochfrequente Ströme fließen.

## 2.2 Die einzelnen Komponenten und ihre Funktion

### 2.2.1 Hochspannungsquelle

Die Hochspannungsquelle besteht gewöhnlich der Einfachheit halber aus einem Hochspannungstransformator. Er transformiert die Netzspannung von 230 V auf die Sekundärspannung, die im Kilovoltbereich liegt und nicht kleiner als 6 kV sein sollte, um einen problemlosen Überschlag an der Funkenstrecke zu ermöglichen.

Im vorliegenden Aufbau wurden sechs Zündtrafos, wie sie in den Brenneranlagen von Zentralheizungen verwendet werden, parallel geschaltet. Dabei muß unbedingt darauf geachtet werden, daß jeweils die richtigen Hochspannungskabel miteinander verbunden werden, so daß die einzelnen Spannungen phasengleich sind. Dies wird experimentell geprüft, indem man zwei Trafos in Betrieb nimmt und die Hochspannungskabel einander annähert. Findet kein deutlich sichtbarer Funkenüberschlag statt, dann können die Kabel jeweils miteinander verbunden werden. Zwischen das 230V-Netz und die Transformatoren wurde noch ein Netzfilter geschaltet, um die Rückwirkungen auf das Netz möglichst gering zu halten.

Ein einzelner Trafo vermag laut Typenschild im Durchschnitt einen maximalen Strom von  $I_{\text{trafo}} = 20 \text{ mA}$  bei einer Spannung von  $U_{\text{trafo}} = 10 \text{ kV}$  zu liefern. Schaltet man mehrere Trafos parallel, addieren sich ihre maximalen Ausgangsströme auf, d.h. sechs Trafos sind in der Lage, einen Strom von  $I_{\text{ges}} = 6 \cdot 20 \text{ mA} = 120 \text{ mA}$  zu liefern. Das entspricht einer Ausgangsleistung von

$$P_{\text{ges}} = U_{\text{trafo}} \cdot I_{\text{ges}} = 10^3 \text{ V} \cdot 120 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1200 \text{ W}.$$

Die erwähnten Trafos besitzen einen sog. ‘magnetischen Shunt’, der den maximal möglichen Ausgangsstrom begrenzt, so daß Kurzschlüsse (ein Funke kann annähernd als Kurzschluß betrachtet werden) die Trafos nicht beschädigen. Es ist zu beachten, daß die Trafos nur max. 3 Minuten ununterbrochen betrieben werden dürfen, danach sind ca. 6 Min. Wartezeit nötig (33% Einschaltdauer, siehe Typenschild).

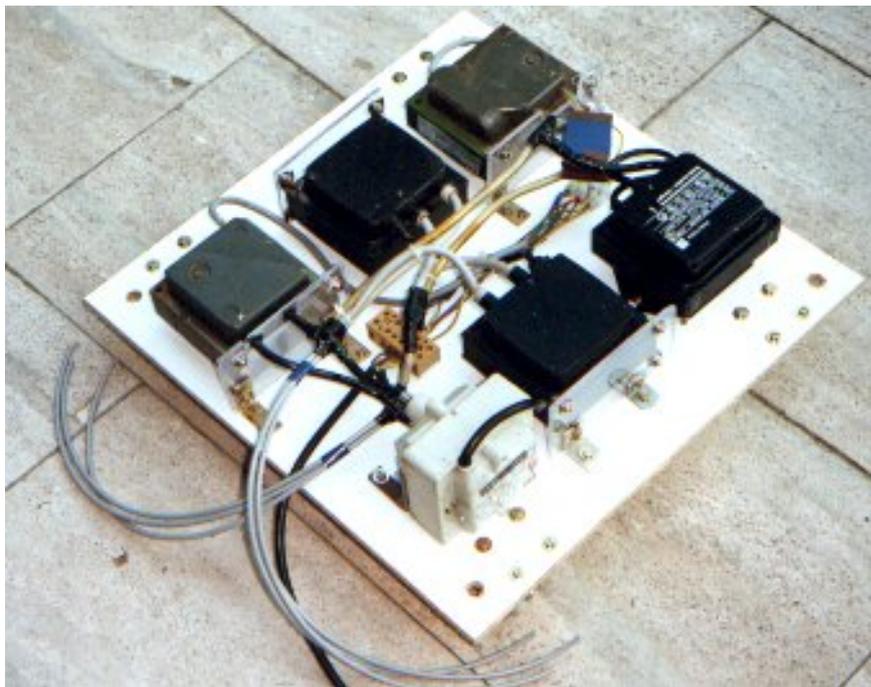


Bild 2: Die Hochspannungstransformatoren

In Bild 2 sind die auf einer Holzplatte angebrachten sechs Transformatoren zu sehen. Die beiden im unteren Bildbereich sichtbaren Hochspannungsleitungen, die je aus drei gebündelten Hochspannungskabeln bestehen, wurden später gegen Hochspannungskabel mit größerem Leiterquerschnitt getauscht. Die schwarze Leitung am unteren Bildrand ist die 230V-Zuleitung.

### 2.2.2 Hochfrequenzdrosseln

Die zwei in Bild 1 eingezeichneten Drosseln haben die Aufgabe, die hochfrequenten Schwingungen des Primärkreises von den Hochspannungstransformatoren (und vom Stromnetz) fernzuhalten und die dämpfende Wirkung der Transformatoren auf die Schwingungen möglichst gering zu halten.

Jede der beiden Drosseln besteht im praktischen Aufbau aus zwei in Reihe geschalteten Drosseln. Dies ist erforderlich, um die nötige Gesamtinduktivität zu erzielen.

Die erste Drossel besteht jeweils aus einem Ferritstab, auf den nach vorheriger Umwicklung mit Elektroklebeband möglichst viele Windungen Kupferlackdraht einlagig aufgebracht wurden. Das Elektroklebeband soll verhindern, daß der schwach leitende Ferritstab die Drossel kurzschließt und so ihre Funktion erheblich beeinträchtigt. Es ist wichtig, daß der Ferritstab nur einlagig und mit Abständen zwischen den einzelnen Windungen bewickelt wird, um Überschläge zu vermeiden.

Die zweite Drossel besteht jeweils aus einem Ferrit-Ringkern, der vor der Bewicklung mit Kupferlackdraht aus o.g. Gründen ebenfalls mit Elektroklebeband umwickelt wurde.<sup>2</sup>

### 2.2.3 Funkenstrecke

Die Funkenstrecke übernimmt, anschaulich erklärt, die Funktion eines Schalters, der periodisch öffnet und schließt. Sie schlägt durch, sobald die Spannung, die an ihr anliegt, die Durchbruchspannung übersteigt.

Der Einsatz einer Löschfunkenstrecke, welche bewirkt, daß die Funken sehr schnell wieder verlöschen, ist vorteilhaft. Wird keine Löschfunkenstrecke verwendet, so neigt die Teslaspule nach eigener Erfahrung dazu, nur sehr ungleichmäßig zu arbeiten.

Das schnelle Verlöschen der Funken kann technisch erreicht werden, indem man mehrere kleine, massiv ausgeführte, seriell geschaltete Funkenstrecken verwendet oder einen kontinuierlichen Luftstrom auf die Funkenstrecke leitet. In beiden Fällen wird die entstehende Wärme schnell abgeführt und dadurch verhindert, daß die Luft an der Funkenstrecke zu leicht ionisiert und die kurzen, impulsartigen Entladungen in eine andauernde Funkenentladung übergehen.

Im vorliegenden Modell wurde der Einfachheit halber eine Funkenstrecke verwendet, die mit einem Luftstrom arbeitet (vgl. [24, airblst.txt]). Diese besteht aus

---

<sup>2</sup>Nachtrag: Die Drosseln wurden im vorliegenden Aufbau zu klein dimensioniert. Andere Hobbyisten verwenden weit größer dimensionierte Drosseln.

zwei einander gegenüberliegenden, massiven Stahlelektroden, wobei ein kleiner Ventilator einen kräftigen Luftstrom an der Lücke zwischen den Elektroden erzeugt. Während des Betriebs werden große Mengen Ozon, nitrose Gase und ultraviolettes Licht erzeugt. Deshalb ist es ratsam für ausreichende Belüftung zu sorgen und nicht in die Funkenentladung zu blicken.

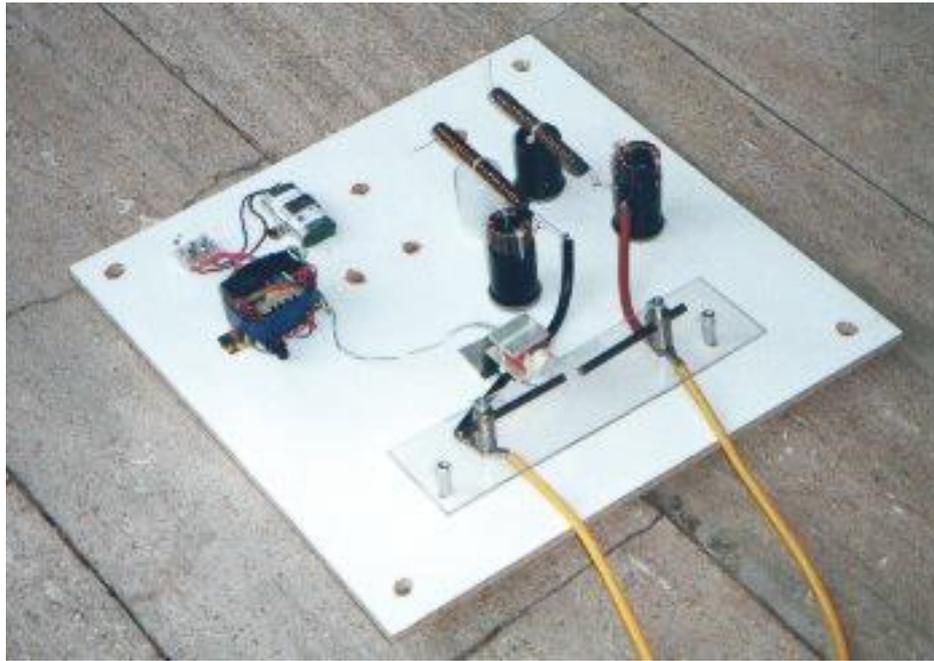


Bild 3: *Funkenstrecke, Drosseln und Netzfilter*

In Bild 3 sind die Drosseln (rechts oben) und die Funkenstrecke (etwas weiter unten) zu sehen. Hinter der Funkenstrecke befindet sich der kleine Ventilator, der vom ebenfalls sichtbaren Niederspannungstrafo mit Strom versorgt wird. Auf dem Trafo ist ein Graetz-Brückengleichrichter zur Gleichrichtung der 50Hz-Niederspannung angebracht. Hinter dem Trafo ist der Netzfilter zu sehen. Niederspannungstrafo, Gleichrichter und Motor wurden in Bild 1 nicht eingezeichnet, da die entsprechende Schaltung trivial und für die Teslaspule an sich nicht wichtig ist.

#### 2.2.4 Kondensator

Der Kondensator ist Teil des Primärkreises. Der Kapazitätswert beeinflusst die Frequenz des Primärkreises, welcher auf die Frequenz der Sekundärspule abgestimmt werden muß.

Als Kondensator kann im Normalfall kein Standard-Kondensator eingesetzt werden, da dieser nicht die nötige Spannungsfestigkeit aufweist, so daß ein Eigenbaukondensator verwendet werden mußte.

Dieser besteht aus Aluminiumfolie als leitendem Bestandteil und Polyethylen als Dielektrikum. Es wurden abwechselnd eine Lage Aluminiumfolie und 10 Lagen 0.1mm PE<sup>3</sup>-Folie übereinandergeschichtet. Denkt man sich die Aluminiumlagen als fortlaufend nummeriert, so wurden jeweils die geradzahlig nummerierten Folien und die ungeradzahlig nummerierten Folien untereinander verbunden, so daß man zwei Kontakte erhält. Der so entstehende Stapel aus PE- und Aluminiumfolie wird mit Hilfe von Polycarbonatplatten, Gewindestangen und Kabelbindern zusammengehalten. Durch das Zusammenpressen wird ein Großteil der Luft zwischen den Lagen entfernt und so Überschläge vermieden. Durch den geringeren Abstand zwischen den Aluminiumlagen wird zudem die Gesamtkapazität vergrößert.

Der 'Folienstapel' ist in Bild 4 zu sehen. Rechts sind die beiden Anschlüsse zu erkennen. Der Kabelbinder in der Mitte des Kondensators verhindert das Wölben der Polycarbonatplatten.

Der Stapel wurde in ein Plastikgehäuse gelegt, die beiden oben erwähnten Kontakte mit Hilfe von kurzen Gewindestangen aus dem Gehäuse herausgeführt und das Gehäuse mit Transformatorenöl aufgefüllt. <sup>4</sup> die nicht aus einem Formteil bestehen. Das Transformatorenöl verhindert durch sein gutes Isolationsverhalten (ca. 70 kV pro cm) Überschläge und Koronaentladungen (diese könnten durch die entstehende Wärme die Folien beschädigen). Schließlich wurde das als Gefäß dienende PE-Behältnis durch Zuschmelzen hermetisch dicht verschlossen, um ein Auslaufen des extrem kriechfähigen Öls zu vermeiden.

Geplant waren ursprünglich zwei solcher Kondensatoren, die dann zur Erhöhung der Gesamtkapazität parallel geschaltet werden sollten. Nachdem jedoch einer der Kondensatoren durch einen Durchschlag irreparabel beschädigt wurde und die Zeit nicht zum Bau eines Dritten ausreichte, wird im vorliegenden Aufbau nur ein Kondensator verwendet. Dies macht sich lediglich in einer Verringerung der Ausgangsleistung bzw. der erzielbaren Funkenlänge bemerkbar.

Die Kapazität des Kondensators berechnet sich nach

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R \cdot \frac{A \cdot n}{d}$$

Dabei ist A die Fläche einer einzelnen Lage Aluminiumfolie in m<sup>2</sup>, n die Anzahl der Folienblöcke (aus je 10 einzelnen, 100 µm dicken Folien bestehend) und d jeweils der Abstand zweier benachbarter Lagen Aluminiumfolie. Da dieser Abstand gleich der Dicke eines Folienblocks ist und dieser aus je 10 Folien besteht, ist  $d = 100 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 10 = 100 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ .

---

<sup>3</sup>Polyethylen

<sup>4</sup>Nachtrag: Es kann nur davon abgeraten werden, die Kontakte an Stellen nach außen zu führen, die mit dem Öl in Verbindung kommen: Die Durchführung ist auf Dauer nicht dicht zu halten! Außerdem sollten mit Hilfe eines Vakuums die Luftblasen zwischen den Folienlagen entfernt werden um Durchschläge durch lokale Überhitzung (durch Koronaentladungen) zu vermeiden.

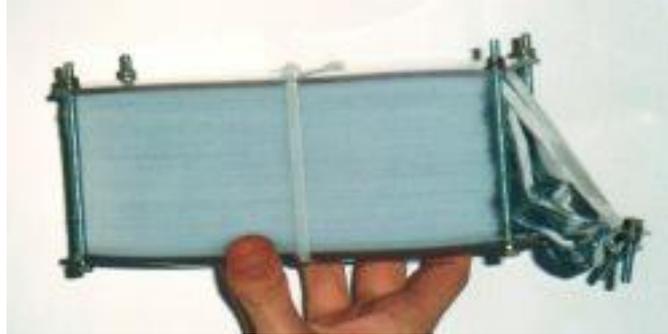


Bild 4: *Das Innenleben des Kondensators*

Geht man von einer Fläche  $A = 0,05 \text{ m} \cdot 0,155 \text{ m} = 7,75 \cdot 10^{-03} \text{ m}^2$  aus, sowie von  $n = 72$ ,  $d \approx 100 \cdot 10^{-5} \text{ m}$  und  $\varepsilon_R \approx 2,3$ , so erhält man durch Einsetzen in obige Gleichung

$$C = \varepsilon_0 \cdot 2,3 \cdot \frac{7,75 \cdot 10^{-03} \text{ m}^2 \cdot 72}{100 \cdot 10^{-5} \text{ m}} = 11,36 \cdot 10^{-9} \text{ F} \approx 11 \text{ nF}$$

Dieser Wert wurde experimentell durch eine Ladungsmessung (laden des Kondensators, Messen von  $Q$  und  $U$ ,  $C = \frac{Q}{U}$ ) überprüft. Dabei war eine Abweichung gegenüber dem errechneten Wert festzustellen (der durch Messung erhaltene Wert ist  $C = 9,8 \text{ nF}$ ). Dies kann auf die nicht millimetergenau zugeschnittenen Aluminiumfolien des Kondensators, auf die Welligkeit der PE-Folie (und damit verbundenem, größerem  $d$ ) und die Beeinflussung von  $\varepsilon_R$  durch das Transformatoröl zurückgeführt werden.

Der fertige Kondensator ist in Bild 5 zu sehen. An der Vorderseite sind die beiden, herausgeführten Anschlüsse zu sehen. Zu erkennen ist ebenfalls die Ölfüllung und der mit Hilfe eines LötKolbens zugeschmolzene Rand des Behältnisses. Das grüne Klebeband soll das Behältnis vor Beschädigung durch die metallischen Befestigungswinkel schützen.

### 2.2.5 Primärspule

Die Primärspule bildet einerseits die Induktivität im Primärkreis und hat andererseits die Aufgabe, die hochfrequenten Schwingungen auf die Sekundärspule auszukoppeln.

Im Hinblick auf die Kopplungseigenschaften sollte sie nicht weniger als 10 Windungen besitzen (vgl. [15]). Ihr Innendurchmesser ist gewöhnlich deutlich größer als der der Sekundärspule, so daß die Sekundärspule in die Mitte der Primärspule gestellt werden kann, um eine optimale Kopplung zu gewährleisten. Eine der beiden



Bild 5: *Der fertige Hochspannungskondensator*

Zuleitungen zur Primärspule ist fest mit dem einen Ende der Primärspule verbunden, der andere Anschluß wird als Abgreifklemme ausgeführt, so daß eine durch Änderung der abgegriffenen Windungen stufenlos variierbare Induktivität möglich ist.

Allgemein üblich ist (v.a. bei kleineren Teslaspulen) eine zylinderförmige Primärspule. Um Funkenentladungen von der Hochspannungselektrode auf die Primärspule zu verhindern wird jedoch oft eine flache Spule verwendet, deren Radius mit jeder Windung schneckenartig zunimmt.

Im praktischen Aufbau wurde eine Kompromißlösung favorisiert: eine kegelförmige Spule, die sich nach oben hin mehr und mehr aufweitet. Unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Skin-Effekts wurde die Spule aus 6mm-Kupferrohr konstruiert, da so die Oberfläche des Leiters größer als bei Verwendung eines einfachen Drahtes ist. Als Folge ist der Widerstand für Hochfrequenz geringer, was die Effektivität der Teslaspule steigert. Um Überschläge zu vermeiden und ein bequemes und sicheres Anbringen der Abgreifklemme zu gewährleisten wurde zwischen den einzelnen Windungen der Primärspule ein Abstand von 1 cm gewählt.

### 2.2.6 Sekundärspule

Die Sekundärspule ist der auf den ersten Blick auffälligste Teil der Teslaspule. Sie besteht i.A. aus Kupferlackdraht, der auf einen isolierenden Hohlkörper gewickelt wird. Nach [24, Datei coilbld1.doc] sollte mindestens eine Drahtstärke von 0.6 mm verwendet werden, außerdem erwiesen sich ca. 900 Windungen als ideal.

Weiterhin sollte man nach [24, Datei coilbld1.doc] darauf achten, daß das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser zwischen 6:1 (kleine Spulen) und 3:1 (große Spulen) liegt. Die Spule sollte also nicht zu lang und schmal werden, sonst würde sie nicht gleichmäßig genug erregt. Als Spulenkörper erwiesen sich nach [24, Da-

tei coilbld1.doc] Röhren aus PE, Polystyren, Polypropylen, Polycarbonat (Lexan) oder Acrylglas als günstig, da diese am wenigsten Verluste im HF-Bereich verursachen. PVC sollte zwar wegen der hohen Verluste vermieden werden, wurde aber im praktischen Aufbau im Hinblick auf Erhältlichkeit und Preis bevorzugt.

Die Kuperdrahtwicklung muß einlagig (um Durchschläge zu vermeiden) und ohne Überlappungen oder Abstände zwischen den Windungen gewickelt werden. Im vorliegenden Aufbau wurde 0,6 mm Kupferlackdraht sorgfältig mit Hilfe einer Bohrmaschine auf den Spulenkörper gewickelt. Schließlich wurde die Spule noch mit einem Überzug aus Polyurethan versehen, um Feuchtigkeitsaufnahme zu verhindern und die Spule gegen Überschlüge zu schützen. Oben auf der Spule wurde in einem Abstand eine torusförmige Hochspannungselektrode angebracht, die mit dem oberen Drahtende der Spule verbunden wurde. Das untere Ende des Drahtes muß gut geerdet werden. Von der Verwendung einer einfachen Metallkugel als Elektrode ist abzuraten, da diese ein Herunterwandern der Entladung auf die Spule erleichtert. Außerdem löst sie sich nicht richtig vom Feld der Spulen und arbeitet so als Kurzschlußwindung gegen das Feld der Primärspule an (vgl. [18]).

Die Sekundärspule schwingt im Betrieb in Eigenresonanz, d.h. die Windungen wirken als Induktivität, die Kapazitäten zwischen den Windungen und die Kapazität der Elektrode gegenüber der Erde zusammen als Kapazität. Somit entsteht eine Art Schwingkreis, der eine bestimmte Resonanzfrequenz besitzt. Die Ermittlung dieser Frequenz wird im Kapitel ‘Allgemeine Berechnungen und Messungen’ beschrieben.

## 2.3 Das Zusammenwirken der Komponenten

Beim Einschalten sind die Kondensatoren im Primärkreis zunächst ungeladen, so daß der gesamte Strom, den die Trafos zur Verfügung stellen, zum Laden der Kondensatoren verwendet wird. Während des Ladevorgangs steigt die Spannung an den Kondensatoren (und damit auch an der Funkenstrecke) kontinuierlich an, bis schließlich die Durchbruchspannung der Funkenstrecke erreicht ist und ein Funke überschlägt.

Der Funke schließt damit den aus Kondensator und Primärspule bestehenden Schwingkreis, der sofort, angeregt durch die im Kondensator gespeicherte Ladung, auf seiner Resonanzfrequenz zu schwingen beginnt.

Während die Funkenentladung im Gange ist (d.h. während der Kreis schwingt) werden die Kondensatoren nicht von den Hochspannungstrafos nachgeladen, da der Widerstand des Funken, wie bereits erwähnt, bei derartig hohen Spannungen vernachlässigbar ist und somit über der Funkenstrecke kaum Spannungsabfall eintritt, durch welchen die Kondensatoren geladen werden könnten. Schließlich bricht die Funkenentladung (und damit auch die Schwingung im Primärkreis) ab, der Kondensator wird wieder nachgeladen und der Vorgang beginnt von neuem.

Die gedämpften Schwingungen des Primärkreises werden durch die Primärspule induktiv auf die Sekundärspule ausgekoppelt, deren Eigenresonanzfrequenz mit der Resonanzfrequenz des Primärkreises übereinstimmt. Die Sekundärspule wird somit angeregt und beginnt in Resonanz zu schwingen. Dadurch werden in ihr starke, hochfrequente magnetische Wechselfelder erzeugt. Dies bewirkt eine Induktion von hochfrequenten Spannungen, die durch Selbstinduktion in der Sekundärspule noch verstärkt werden. Das eine Ende der Sekundärspule ist geerdet, so daß am anderen Ende gegen Erde eine hochfrequente Hochspannung anliegt.

## **2.4 Allgemeine Berechnungen und Messungen**

### **2.4.1 Ermittlung der Resonanzfrequenz der Sekundärspule**

Die Resonanzfrequenz der Sekundärspule wird am besten, wie in [3, S. 50 f.] beschrieben, experimentell bestimmt.

Dazu wird die Erdungsklemme am unteren Ende der Spule mit dem Ausgang eines Signalgenerators verbunden, die Erdungsklemme desselben bleibt unverbunden. Nun bringt man den Tastkopf eines Oszilloskops (dessen Erdungsklemme im übrigen ebenfalls offen bleibt) bis auf 1 m Entfernung an die Hochspannungselektrode der Sekundärspule heran und fixiert ihn mit Hilfe eines Stativs o.ä.. Es ist hierbei sehr wichtig, daß sich im Umkreis (ca. 1 m) keine Metallteile befinden, da diese die Messung verfälschen würden. Auch der Primärkreis muß in ausreichende Entfernung gebracht werden.

Signalgenerator und Oszilloskop werden je auf den 100mV-Bereich eingestellt und die Ausgangsfrequenz des Signalgenerators (Sinus-Signal) variiert. Bei einer bestimmten Frequenz ist ein starker, sehr plötzlicher Anstieg der Amplitude des am Oszilloskop angezeigten Signals festzustellen. Diese Frequenz stellt dann die Resonanzfrequenz der Sekundärspule dar. Im vorliegenden Fall beträgt diese Frequenz ca. 205 kHz. Eine genauere Bestimmung ist nicht sinnvoll, da die Frequenz ohnehin relativ stark durch die elektrischen Eigenschaften der Umgebung beeinflusst wird.

### **2.4.2 Ermittlung der Resonanzfrequenz des Primärkreises**

Um die Resonanzfrequenz des Primärkreises zu ermitteln, werden Signalgenerator (wiederum Sinus-Signal) und Oszilloskop unter Zuhilfenahme eines 56 k $\Omega$ -Widerstands, wie in Bild 6 zu sehen, mit dem Primärkreis verbunden.

Dabei muß die Funkenstrecke kurzgeschlossen werden, so daß ein geschlossener Schwingkreis entsteht. Die Versuchsanordnung basiert auf dem Vorschlag in [3,

S.51, Bild 58], wurde jedoch leicht abgewandelt. So bleibt bei der hier verwendeten Meßmethode der Aufbau mit den Transformatoren verbunden, da die durch die Trafos bedingte Verschiebung der Resonanzfrequenz des Primärkreises mitgemessen werden soll.

Wie bei der Messung der Resonanzfrequenz der Sekundärspule wird auch hier die Frequenz des vom Funktionsgenerators erzeugten Signals so lange variiert, bis am Oszilloskop ein deutliches Anwachsen der Amplitude zu beobachten ist. Die Frequenz, bei der die größte Amplitude auftritt, ist die Resonanzfrequenz.

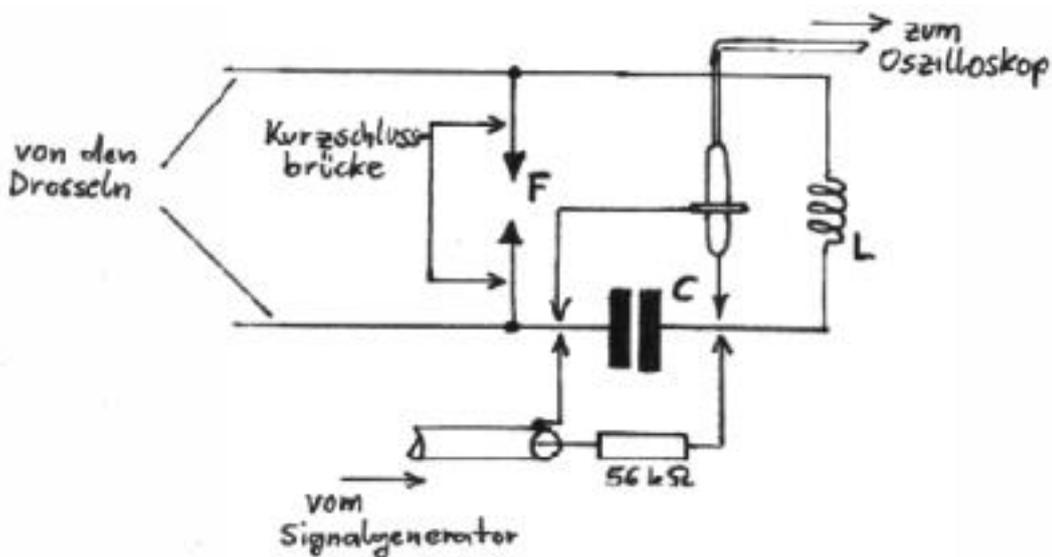


Bild 6: Messung der Resonanzfrequenz des Primärkreises

Die Abgreifklemme wird jeweils so angebracht, daß bei der ersten Messung die ganze Primärspule vom Strom durchflossen wird, so daß sich die maximal mögliche Induktivität ergibt und die kleinstmögliche Frequenz gemessen werden kann. Bei der zweiten Messung wird die Zahl der abgegriffenen Windungen möglichst klein gewählt und somit die maximal mögliche Frequenz bestimmt.

Im vorliegenden Fall ist die minimale Frequenz des Primärkreises ca. 160 kHz, die maximale Frequenz ca. 650 kHz. Auch hier ist eine genauere Bestimmung nicht sinnvoll, da die Frequenz von äußeren Einflüssen abhängig ist und sich z.B. bereits durch das lose Zuleitungskabel der Abgreifklemme ständig ändert. Um den idealen Abgreifpunkt zu bestimmen, wird schließlich der Funktionsgenerator auf die Resonanzfrequenz der Sekundärspule eingestellt und die Abgreifklemme so lange versetzt, bis die am Oszilloskop angezeigte Amplitude des Signals maximal ist.

## 3 Betrieb der Teslaspule

### 3.1 Vorsichtsmaßnahmen bei der Inbetriebnahme

Bevor die Spule an das Stromnetz angeschlossen wird, sollte man sich der Gefahren, die von der Spule ausgehen können, sowie der nötigen Sicherheitsmaßnahmen bewußt sein.

Die Hauptgefahr geht von der verwendeten Hochspannung im Primärkreis aus. Man kann davon ausgehen, daß alle Ströme, die 40 mA übersteigen, potentiell gefährlich sind. Bereits Ströme ab 100 mA sind für den Menschen innerhalb nur einer Sekunde mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit tödlich! Berührt man also mit beiden Händen die Sekundärklemmen eines Hochspannungstransformators, der 10 kV liefert, so fließt bei einem angenommenen Körperwiderstand von  $10\text{ k}\Omega$  und einem ausreichend leistungsfähigen Trafo ein Strom von

$$I_{\text{Koerper}} = \frac{U_{\text{HV}}}{R_{\text{Koerper}}} = \frac{10\text{ kV}}{10\text{ k}\Omega} = 1\text{ A!}$$

Dieser Strom kann von den Trafos nicht geliefert werden, da der Ausgangsstrom auf 120 mA beschränkt ist. Diese 120 mA fließen dann jedoch sicher und bewirken auch bei kurzzeitiger Berührung mit hoher Wahrscheinlichkeit den Tod.

Nicht zuletzt deshalb sollte man bei der Inbetriebnahme unbedingt die folgenden Sicherheitsregeln (vgl. [3, S.55 f.], [16] und [24, math.txt]) befolgen:

- Niemals einen Teil des Primärkreises berühren während die Teslaspule in Betrieb ist.
- Nicht in der Nähe Hochspannung führender Leitungen arbeiten (Gefahr eines Überschlages!)
- Die Sekundärspule immer gut erden, ansonsten sucht sich die Hochspannung selbst ihren Weg zur Erde und löst dabei u.U. einen Brand aus. Die Erdung sollte durch eine massive, versilberte Kupferlitze erfolgen, die mit einem gut geerdeten Gegenstand (Treppengeländer, Wasserrohr o.ä.) verbunden wird.
- Vor Durchfließenlassen der Teslaströme durch den menschlichen Körper unbedingt messen, wie groß die enthaltene 50Hz-Komponente ist. In den Primärkreis gelangt nicht nur die Hochfrequenz sondern auch teilweise 50 Hz Netzfrequenz! Da bei einer Frequenz von 50 Hz praktisch kein Skineffekt auftritt, kann diese Komponente zu elektrischen Schlägen führen.

- Sicherstellen, daß keinerlei Entladungen zwischen Primärspule und Sekundärspule stattfinden, wenn die Teslaströme durch den menschlichen Körper fließen sollen. Bei Entladungen zwischen den Spulen ist die Sekundärspule nicht mehr galvanisch vom Primärkreis getrennt, so daß durch die Funkenentladung u.U. die volle Stromstärke (bei 50 Hz!) des Primärkreises fließt. Bei Bedarf die Entladung mit einer polyurethanbesprühten Acryl-/PVC-Röhre zwischen Sekundär- und Primärspule verhindern.
- Niemals die Entladung einer starken Teslaspule auf sich ziehen, da, auch wenn normalerweise durch den Skin-Effekt nur wenig Strom im Körper selbst fließt, der in den Körper eindringende Strom zunimmt und die zulässigen Werte übersteigen kann.
- Niemals die Funken der Spule direkt auf den Körper überspringen lassen (immer auf Metallstücke!), da sonst durch die hohe Funkentemperatur punktuelle Verbrennungen entstehen.
- Vor Arbeiten an der Teslaspule immer den Stecker ziehen und falls nötig den Kondensator mit einem Leistungs-Widerstand von 100 k $\Omega$  oder mehr entladen.
- Falls die Sicherungen des Versorgungsstromkreises auslösen sofort den Stecker ziehen, um ein unbeabsichtigtes, unerwartetes Wiederanlaufen der Spule zu verhindern.
- Auf die Kondensatoren achten, da diese bei spontanen Durchschlägen und/oder lokaler Überhitzung explodieren können.
- Nicht in die Funkenentladung der Funkenstrecke blicken, da diese viel UV-Licht abstrahlt.
- Für ausreichende Belüftung sorgen, da die Funkenstrecke große Mengen Ozon und nitrose Gase produziert.
- Bei größeren Spulen sollte während des Betriebs ein Gehörschutz getragen werden.
- Bei unbekanntem Schlagweiten die Sekundärspulen-Erde in der Nähe der Hochspannungselektrode führen, um unvorhergesehene Funkenüberschläge zu vermeiden.
- Darauf achten, daß sich in der Nähe keine empfindlichen elektrischen Geräte befinden oder am gleichen Stromkreis betrieben werden. Dies gilt v.a. für Digitaltechnik wie CPUs oder Haushaltsgeräte mit digitaler Steuerung. Auch Fernsehgeräte sollten vom Netz getrennt werden. Träger von Herzschrittmachern sollten unbedingt den Raum verlassen!
- Keine brennbaren oder explosiven Gase, Flüssigkeiten oder Feststoffe in die Nähe einer betriebenen Teslaspule bringen – Explosions- und Brandgefahr!

## 3.2 Abstimmen der Teslaspule

Der Primärkreis der Teslaspule wurde bereits weitgehend bei Messung der Resonanzfrequenz desselben abgestimmt. Falls jedoch kein Oszilloskop zur Verfügung steht kann man den günstigsten Abgreifpunkt an der Primärspule auch experimentell bestimmen, indem man abwechselnd so lange den Abgreifpunkt verändert und dann die Spule in Betrieb nimmt, bis man die maximale Funkenlänge erhält.

## 3.3 Versuche mit der Teslaspule

### 3.3.1 Bestimmen der Schlagweite

Das Bestimmen der Schlagweite der Spule erfolgt entweder ohne Hilfsmittel durch einfaches Abschätzen der Länge der Funken, die von der Hochspannungselektrode ausgehen, oder durch Überspringenlassen der Funken auf ein geerdetes Metallstück in bekannter Entfernung. Die zweitgenannte Methode liefert geringfügig längere maximale Funkenlängen, jedoch ist dabei zu beachten, daß die so entstehenden Funken besonders heiß sind und u.U. die Elektrode beschädigen, da diese lediglich aus dünnem Aluminiumklebeband und Plastik besteht. Die nach der zweitgenannten Methode ermittelte Funkenlänge beträgt hier ca. 70 cm.

### 3.3.2 Spitzenentladungen

Am Beispiel der Teslaspule läßt sich sehr gut die Wirkung von Elektroden mit extrem kleinem Biegungsradius (d.h. Spitzen) beobachten. Dazu setzt man bei abgeschalteter Spule auf die Elektrode ein Stück Draht, das so zurechtgebogen wurde, daß es stabil auf der Elektrode steht und eines der Drahtenden nach oben zeigt. Wird die Spule eingeschaltet, schießen sofort Funken aus der Drahtspitze heraus senkrecht nach oben und schlagen u.U. sogar unter grellem Aufleuchten in die Decke ein, wie in Bild 8 gut zu sehen ist. Dieser sog. Spitzeneffekt resultiert aus dem sehr geringen Biegungsradius des Drahtendes, wodurch an der betreffenden Stelle eine extrem hohe Feldstärke entsteht, welche schließlich das Entstehen eines Funkens begünstigt.

### 3.3.3 Drahtlose Energieübertragung

Die starken elektrischen Felder und die Aussendung von Radiowellen im Bereich der Resonanzfrequenz (ca. 200 kHz) ermöglichen eine drahtlose Übertragung von Energie. Dies war die ursprünglich vorgesehene Anwendung Nikola Teslas für seine Spule. Demonstriert werden kann der Effekt z.B., indem man eine gewöhnliche

Leuchtstoffröhre in die Nähe der Spule stellt und letztere in Betrieb nimmt. Wie aus Bild 9 ersichtlich ist, beginnt die Leuchtstoffröhre deutlich sichtbar flackernd zu leuchten, obwohl weder eine galvanische Verbindung zur Spule gegeben ist noch Funkenüberschläge auf die Leuchtstoffröhre zu sehen sind. Das Leuchten der Röhre muß also aus dem starken E-Feld resultieren. Eine weitere Möglichkeit zur Energieübertragung ist der Bau einer zweiten Teslaspule, die dieselbe Resonanzfrequenz wie die erste Spule besitzt und die elektromagnetischen Wellen wieder auffängt und in elektrische Ströme umwandelt.



Bild 7: Die fertige Teslaspule kurz vor der Inbetriebnahme



Bild 8: *Spitzenentladungen mit Hilfe eines Drahtstücks*



Bild 9: *Die starken E-Felder bringen die Leuchtstoffröhre zum Leuchten*

## 4 Dank

Ich möchte den folgenden Firmen und Privatpersonen, die mich bei der Erstellung der Facharbeit uneigennützig unterstützt haben, meinen Dank aussprechen:

- Fa. 4P Folie, Forchheim
- Fa. Adler, Bräuningshof
- Fa. Dotterweich Heizungstechnik, Hausen
- Fa. Konrad Sponsel Heizungstechnik, Forchheim
- Fa. Synflex, Nürnberg
- Fa. 'Ihre Aussenwerbung', Erlangen
- Fa. Prechtel, Forchheim
- Fa. Baustoff Union, Forchheim
- Holger Bredl
- Serkan Beyaz
- Nils Hornung
- Jochen Kronjäger
- Roland Schulz
- Herrn Pfeifenberger
- meine Eltern

## Literatur

- [1] Meyers Enzyklopädisches Lexikon (Band 24)  
Bibliographisches Institut AG, Mannheim 1978 (Nachdruck 1979)
- [2] BERGMANN/SCHAEFER. *Lehrbuch der Experimentalphysik (Band II: 'Elektrizität und Magnetismus', H.Gobbrecht)*. 1971 Walter de Gruyter - Berlin-NewYork
- [3] GÜNTER WAHL. *Tesla Energie*. 1997 Franzis Verlag GmbH, Feldkirchen
- [4] HARRI SUOMALAINEN (haba@snakemail.hut.fi). *Tesla coil theory and applications*. 26. September 1993  
<ftp://ftp.ee.ualberta.ca/pub/cookbook/misc/tesla.ps.Z>
- [5] *The strange life of Nikola Tesla*. Unbekannter Autor/Verlag. Digitalisiert von John Roland Hans Penner  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/biog.pdf>
- [6] JEFF CORR (corr@enid.com). *Step by Step Instructions on how to Build a Tesla Coil*  
<http://www.harvestcomm.net/personal/corr/tc/cnstgd.zip>
- [7] JOCHEN KRONJÄGER (Kronjaeg@stud-mailer.uni-marburg.de). *Tesla coil theory*, 20. April 1998.  
testheU.ps
- [8] JOCHEN KRONJÄGER (Kronjaeg@stud-mailer.uni-marburg.de). *2nF/30kV plate stack capacitor*, 18. Mai 1998.  
<http://www.mathematik.uni-marburg.de/~kronjaeg/hv/>
- [9] RICHARD HULL. *The High Voltage, Pulse Discharge, CAPACITOR*.  
<http://www.icorp.net/users/kev/tesla/capacit.txt>  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/cap.txt>
- [10] RICHARD QUICK. *CAPACITOR INFO*, Mail vom 28. August 1995.  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/cap3.txt>
- [11] BERT POOL. *High voltage capacitor construction by Bert Pool*, 8. April 1994.  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/cap4.txt>
- [12] RICHARD QUICK. *AWG Wire Chart*, Mail vom 28. August 1995.  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/wire1.txt>
- [13] BILL BEATY (billb@eskimo.com). *Tesla coil hints*.  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/tc.txt>

- [14] *Tesla coil hints*. Unbekannter Autor.  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/tc2.txt>
- [15] RICHARD QUICK. *Primary Coils*, Mail vom 31. August 1995.  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/primary.txt>
- [16] MIKE HAMMMER (mhammer@misslink.net). *Tesla Coil Safety*  
<http://www.misslink.net/mhammer/safety.htm>
- [17] CHIP ATKINSON (chip@pupman.com). *Tesla Coils Safety Information*  
<http://bhs.brook12.wv.us/homepage/chip/safety.htm>} \bibitem{  
teslacoils.faq} \textsc{Jimmy Paul}. \textsl{Tesla Coil FAQ}.\ \\  
\path<http://home.earthlink.net/~immypaul/faq.htm>—
- [18] RICHARD QUICK (richard.quick@slug.org). *Toroid Discharge Terminals*,  
Mail vom 23. August 1995.  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/toroid1.txt>
- [19] BILL BEATY (billb@eskimo.com). *Making an upper Toroid terminal*  
<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/toroid2.txt>
- [20] 'ntesla 1.7', Programm zur Berechnung von Teslaspulen  
Autor: Steve Falco (sfalco@worldnet.att.net)  
<ftp://sunsite.unc.edu/pub/Linux/apps/circuits>
- [21] STEVE GANTT. *How to build a tesla coil*.  
[http://www.svusd.k12.ca.us/schools/MVHS/Departments/TechClub/  
tesla/gantt/tesla.html](http://www.svusd.k12.ca.us/schools/MVHS/Departments/TechClub/tesla/gantt/tesla.html)
- [22] Tesla-Anleitung von David Stevick (dstevick@juno.com)  
<http://168.216.219.18/homepage/alumni/dstevick/coildope.zip>
- [23] BRENT TURNER (bturner@apc.net). *Tesla Coils*  
<http://www.apc.net/bturner/coils.htm>
- [24] Baupläne von Richard Quick (richard.quick@slug.org)  
<http://bhs.brook12.wv.us/pub/ibm/ELECTRON/TC-PLANS.ZIP>
- [25] GEORGE TRINKAUS. *The lost inventions of Nikola Tesla* (Auszug).  
<http://netbase.t0.or.at/tesla/teslcoil.htm>