

Diplomarbeit

Peter Siegrist ET0104B

Teslatransformator



Uzwil, 01.10.04

Inhaltsverzeichnis

1.EINLEITUNG.....	3
1.1.ZUSAMMENFASSUNG.....	3
1.2.NIKOLA TESLA.....	3
2.FUNKTIONSWEISE DER TESLASPULE.....	7
2.1.RESONANZTRANSFORMATOR.....	7
2.2.WAHL DER SCHALTUNG.....	10
2.3.DRAHTLÄNGE = $\lambda/4$?.....	12
2.4.SKINEFFEKT?.....	13
3.EINZELNE KOMPONENTEN IM DETAIL.....	14
3.1.SICHERHEITSFUNKENSTRECKE.....	14
3.2.FUNKENSTRECKE / ROTARY.....	15
3.3.KONDENSATOREN.....	18
3.4.PRIMÄRSPULE.....	18
3.5.SEKUNDÄRSPULE.....	20
3.6.TOROID / ENTLADUNGSTERMINAL.....	22
3.7.HSP TRAFO.....	23
3.8.FILTER.....	24
3.9.MASSE / GEGENPOL.....	25
3.10.HILFSMITTEL.....	25
4.AUSLEGUNG / BERECHNUNGEN.....	26
4.1.SIMULATIONEN / VERGLEICH MIT PRAXIS.....	26
4.2.BERECHNUNGEN ALLGEMEIN.....	28
4.3.PHASENSCHIEBER.....	29
4.4.MESSUNGEN.....	30
4.5.ABSTIMMUNG.....	31
4.6.AUFGETRETENE PROBLEME.....	32
5.PRAKTISCHER AUFBAU.....	33
5.1.STEUERPULT.....	33
5.2.HSP-TEIL.....	34
6.BETRIEB DER ANLAGE.....	36
6.1.SICHERHEITSHINWEISE.....	36
6.2.AUFBAU.....	36
6.3.BETRIEB.....	37
7.FAZIT UND AUSBLICK.....	38
8.TAGEBUCH.....	39
9.ANHANG.....	40
10.PROJEKTANTRAG.....	41

1. Einleitung

1.1. Zusammenfassung

Vor einigen Jahren tauchten im Internet Bilder von Teslaspulen auf. Die spektakulären Bilder hatten mich damals fasziniert und so baute ich 2002 zusammen mit einem Schulkollegen die erste kleine Teslaspule.

Durch die berufsbegleitende Schule bedingt, fehlte später die Zeit für den Bau einer grösseren Spule. Die Diplomarbeit war deshalb ein willkommener Anlass eine grössere Anlage zu realisieren. In der Zwischenzeit hatte ich immer ein Auge offen für Material das für den Bau einer Spule Verwendung finden könnte. So konnte einiges an Material zusammengetragen werden.

Vor den Sommerferien begann ich mit dem Bau eines Sinusgenerators. Dieser sollte bei der Abstimmung einer grösseren Teslaspule zum Einsatz kommen. Der Projektantrag dazu wurde anfangs der Sommerferien verfasst und ich bekam vom Fachlehrer das OK mit der Arbeit zu beginnen.

Die Abende in der schulfreien Zeit in den Sommerferien nutzte ich, um die mechanische Fertigung der benötigten Teile voranzutreiben. Am 21.08, just zu meinem Geburtstag, fand der erste Testlauf statt. Es konnten auf Anhieb ca. 70 cm Blitzlänge erreicht werden. In der Zeit zwischen Ende August bis zum Semesterende war nochmals ein Endspurt in der Schule angesagt, in der Zeit konnte ich deshalb nicht viel an der Anlage arbeiten. Nun folgten Messungen während dem Betrieb sowie Optimierungen. Einen Rückschlag musste ich am 22.09.04 hinnehmen: Ein Isolationsdefekt durch einen Überschlag von der Primär- zur Sekundärspule. Der Defekt konnte glücklicherweise repariert werden. Um weitere Probleme diesbezüglich zu verhindern habe ich die Primärspule neu gebaut. Durch die veränderte Geometrie konnten weitere Überschläge verhindert werden.

Während der Arbeit wurde ersichtlich, dass die Resonanzfrequenz der Sekundärspule relativ stark vom Aufstellungsort abhängt. Die Anlage wurde deshalb an verschiedenen Standorten in Betrieb genommen. Für jeden Standort wurden die Resonanzfrequenzen bestimmt.

Die Zeit in der letzten Woche vor dem Abgabetermin wurde für den Bericht aufgewendet.

Die im Projektantrag erwähnten Kosten- und Performance Ziele konnten erreicht werden.

1.2. Nikola Tesla

Nikola Tesla (am 10. Juli 1856 in Smiljan, in Kroatien (damals österreichische Monarchie) geboren ; † 7. Januar 1943 in New York) war ein serbisch-stämmiger Erfinder und Elektro-Ingenieur, der 1884 in die USA emigrierte. Sein bedeutendster Beitrag zur Elektrotechnik ist die Nutzbarmachung des Wechselstroms. Benannt nach ihm ist das Tesla, die physikalische Einheit der magnetischen Flussdichte. Immer mehr Menschen sehen Teslas Namen als Inbegriff eines grossen Visionärs und Genies und den Vater des 20. Jahrhunderts.

Biographie

Teslas Eltern waren Serben, sein Vater war ein serbisch-orthodoxer Priester. Tesla selbst wurde in der Lika, in der Nähe von Gospic (Kroatien) geboren. Nach seiner Ausbildung an der Technischen Universität von Graz, der Universität von Prag und in Budapest entwickelte er die Idee, Wechselstrom in Form eines Motors nutzbar zu machen. 1882 zog Tesla nach Paris, um dort für den europäischen Ableger der Unternehmen von Edison zu arbeiten. 1884 siedelte er praktisch ohne Finanzmittel nach New York über, wo er erneut Arbeit bei Edison fand.

Im Mai 1885 verkaufte er sämtliche Patentrechte an seinen Wechselstromdynamos an George Westinghouse, worauf ein erbitterter Kampf zwischen Edisons Gleichstromsystemen und Tesla-Westinghouses Wechselstromsystemen ausbrach, der zugunsten des Wechselstroms entschieden wurde. In diesem Kampf um das bessere System wurde auch der elektrische Stuhl mit Wechselstrom gespeist, um jedem die Gefährlichkeit vor Augen zu führen: Teslas Gegner prägten den Begriff westinghoused. Die erste Hinrichtung war aber ein Desaster, da der Verurteilte beim ersten Versuch nicht gleich starb. Keiner wusste ja genau, wie lang und wie stark der Strom durch ihn durchfliessen sollte. Der Deliquent starb sehr qualvoll und begann zu qualmen, was den Zuschauern und den eingeladenen Journalisten gar nicht bekam. Die Zeitungen waren danach voll des Spottes, da eigentlich eine menschenwürdigere Methode gesucht worden war, Exekutionen durchzuführen.

Tesla versuchte die Ungefährlichkeit seiner Stromart zu zeigen und demonstrierte in einem Hotel, wie eine Glühbirne in seiner Hand leuchtete.

Tesla experimentierte anschliessend mit verschiedenen Beleuchtungssystemen, Hochfrequenzwechselstrom, kabelloser Stromübertragung, dem ersten Radiosender, der ersten Fernsteuerung der Welt (1898) und mit Röntgenstrahlung.

Er starb zu einem unbekannten Zeitpunkt zwischen dem 5. Januar und 8. Januar 1943 an Herzversagen im New Yorker Hotel New York, der Totenschein bestätigte unverdächtige Umstände. Trotz seiner enormen Zahl an Erfindungen hinterliess er einen riesigen Schuldenberg. Seine Urne befindet sich heute im Nikola-Tesla-Museum in Belgrad.

Errungenschaften

Tesla erfand das Radio, auch wenn ihm diese Erfindung jahrelang nicht zugesprochen wurde, den Tesla-Transformator, die Tesla-Turbine, baute die erste Fernsteuerung der Welt, den Tesla-Generator und war der Vater unseres heutigen Wechselstromsystems. Weiterhin wollte er eine Stromversorgung über Funk, statt über Leitungen, aufbauen. Zum Zeitpunkt seines Todes hatte er über 700 Patente angesammelt.

Um die Jahrhundertwende wurden viele Erfindungen fast zeitgleich von mehreren Menschen gemacht und wie im Falle von Tesla war es nicht immer der Patentinhaber, der sich schliesslich durchsetzte. So verdiente er keine Lizenzgebühren am Radio. Seine Lizenzen für den Wechselstromgenerator hatte er Westinghouse quasi geschenkt. Auch wenn er so kaum Geld verdiente, pflegte er dennoch weiterhin seinen teuren Lebensstil in den besten Hotels von New York.

Mutmassungen um das Spätwerk

Bis heute ist Teslas Spätwerk immer wieder Gegenstand von Spekulationen. So habe er an bahnbrechenden Theorien gearbeitet, die Albert Einsteins Relativitätstheorie widerlegen sollten und soll laut eigenen Aussagen an einer mysteriösen "Todesstrahlen"-Waffe gearbeitet haben, die seiner Meinung nach Krieg auf alle Zeiten unmöglich machen sollte. Dabei weisen die Vertreter dieser Sichtweise vor allem darauf hin, dass die möglicherweise durch Tesla gefundene sogenannte freie Energie, das heisst im Prinzip durch jedermann anzapfbare "Vakuumsenergie", die gegenwärtigen Machtverhältnisse auf der Erde radikal umstürzen würde. Bis heute hätten es Regierungen und Energiekonzerne erfolgreich verhindert, diese Technik zum Durchbruch kommen zu lassen. Eine Theorie versucht das Tunguska-Ereignis mit einem fehlgeschlagenem Experiment Teslas in Verbindung zu bringen.

Heute wird Nikola Tesla von vielen verfälschend in folgendem Zusammenhang genannt: Er soll gesagt haben, die "Nutzung von Atomenergie sei nicht machbar". Damit wird suggeriert, Tesla hätte behaupten wollen, die Kernspaltung sei nicht möglich. Dies wird noch heute von schlecht informierten Journalisten, Laienwissenschaftlern, miserablen Autoren und gar von Universitätsprofessoren als "Paradebeispiel wissenschaftlicher Irrtümer" zitiert. Tatsächlich aber war Tesla ein Gegner der Nutzung der Atomenergie, welche durch Kernspaltung gewonnen wird, da er die Nebenwirkungen und den Missbrauch dieser Technologie abzusehen vermochte, und sie daher als falschen Weg erachtete. Mitunter auch deshalb wurde Tesla zu einem der vehementesten Verfechter und Erforscher sogenannter "alternativer Energien". Tesla behauptete, wie bereits erwähnt, es gäbe genügend "freie Energie" in unserer Umwelt, welche von jedem nahezu kostenlos genutzt werden könne.

Angesichts seiner Errungenschaften und seiner Fähigkeit, Erfindungen im Geiste zu konstruieren und zu bauen, ohne jemals dafür eine Konstruktionszeichnung oder einen Plan erstellt zu haben, kann man Nikola Tesla zu den hervorragenden Erfindern in der Geschichte der Wissenschaft zählen.

Dieser Artikel basiert auf dem Artikel [Nikola Tesla](http://de.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla) (http://de.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla) aus der freien Enzyklopädie [Wikipedia](http://de.wikipedia.org) (<http://de.wikipedia.org>) und steht unter der [GNU Lizenz für freie Dokumentation](http://www.gnu.org/licenses/fdl.txt) (<http://www.gnu.org/licenses/fdl.txt>).

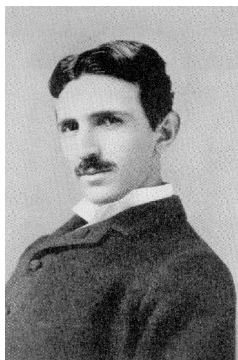


Abbildung 1 Nikola Tesla

Im Konversationslexikon von Meyer's von 1897 findet sich zu dem Thema folgender Abschnitt:

Teſlaſtröme, von N. Teſla (geb. 1856 zu Smiljan in Kroatien) hergeſtellte Wechſelſtröme von großer Schwingungszahl und ſehr hoher Spannung. Von den Polen eines Funkeninduktors führen Drähte zu den innern Belegungen zweier Leidener Flaſchen, deren (entgegengeſetzt geladene) äußere Belegungen mit einer Spule aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes (primäre Spule) verbunden ſind. In dieſe Verbindung iſt jedoch eine Funkenſtrecke eingeſchaltet, durch welche bei jeder Entladung der Flaſchen ein Funke überſpringt. Hierdurch werden entlang jener Spule elektriſche Schwingungen von großer Stromſtärke erregt, deren Anzahl in einer Sekunde etwa 1 Million beträgt. Um die primäre Spule iſt eine ſekundäre Spule mit ſehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes gelegt; in dieſer entſtehen Induktionsſtröme von ebenſo kurzer Schwingungsdauer und außerordentlich hoher Spannung, weil der primäre Strom in ſo ſehr kurzer Zeit ſeine Stärke und Richtung ändert (T.). Wegen der hohen Spannung müſſen die Spulen vorzüglich iſoliert ſein; ſie werden daher in ein Gefäß mit luſtfreiem Öl geſenkt (Teſla-Transformator). Die Enden des ſekundären Drahtes ſind iſoliert nach außen geführt. Aus jedem Pole ſprühen veräſtelte bläuliche Lichtbüſchel, zwiſchen den beiden genäherten Polen entſteht eine glänzende Lichterſcheinung, gleich einem Regwert ſilberglänzender Fäden. Bringt man an einem Pole einen langen, am Ende iſolierten Draht an, ſo ſchießen aus ihm ſeiner ganzen Länge nach nach allen Seiten ſenkrecht zum Draht bläuliche Strahlen hervor; ſpannt man von beiden Polen parallel zu einander je einen Draht, ſo ſchießen die Strahlen durch den Zwischenraum von einem zum andern und bilden ein langes, ſanft leuchtendes bläuliches Lichtband. Wird der eine Pol mit einem größern, der andre mit einem kleinern konzentriſchen Drahtkreis verbunden, ſo erfüllt ſich der Zwischenraum der beiden Kreiſe mit den unausgeſetzt übergehenden Strahlen, die, wenn die Kreiſe auseinander gerückt werden, einen leuchtenden Kegeltumpf bilden. Weiſſlerſche Röhren leuchten in der Nähe der Pole ohne irgend welche Verbindung mit denſelben. Werden zwei mit den Polen verbundene Metallplatten einander gegenübergeſtellt, ſo herrſchen in dem Zwischenraum ſo ſtarke elektriſche Kräfte, daß Weiſſlerſche Röhren, frei in dieſen Raum gebracht, hell aufleuchten (Teſla-Beleuchtung). Die Entladung der T. geht leichter durch die Luſt als durch gute Leiter, z. B. Metalldrähte, weil bei Strömen von ſo hoher Wechſelzahl die Selbſtinduktion bei letztern den Durchgang bedeutend erſchwert, ſo daß die Strömung ſich hauptſächlich auf die Oberfläche beſchränkt und nicht in das Innere des Leiters dringt. Hieraus erklärt ſich, daß die T. trotz ihrer hohen Spannung nur geringe phyſiologiſche Wirkung ausüben, während man von gewöhnlichen Induktionsſtrömen heftige Schläge empfängt. Vgl. Teſla, Unterſuchungen über Mehrphaſenſtröme u. (deutſch, Halle 1895).

2. Funktionsweise der Teslaspule

2.1. Resonanztransformator

Der Teslatransformator besteht im wesentlichen aus zwei lose gekoppelten L/C Schwingkreisen.

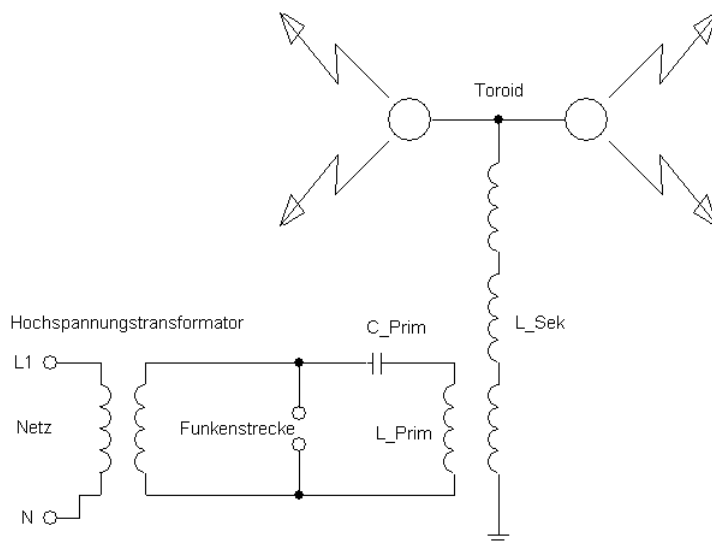


Abbildung 2

Eine Hochspannungsquelle transformiert die Netzspannung auf einige Tausend Volt (typisch 5-20 kV). Mit dieser Spannung wird ein impulsfester Kondensator geladen, der in Serie mit der Primärspule liegt. Wenn die Spannung genügend hoch ist, zündet eine Funkenstrecke und schliesst somit den Primärschwingkreis. Die Energie des Kondensators pendelt nun mit der Resonanzfrequenz zwischen Spule und Kondensator hin und her. Durch die magnetische Kopplung wird mit jeder Schwingung ein Teil der Energie in den Sekundärschwingkreis übertragen. Dieser ist auf die gleiche Resonanzfrequenz abgestimmt und besteht aus einer grossen, einlagigen Spule, die auf einen eisenlosen Kern gewickelt ist und dem Entladungsterminal. Der Fusspunkt der Spule wird geerdet, das andere Ende ist an eine Kugel oder einen Toroid angeschlossen. Dieser bildet gegen Erde eine Kapazität, die wiederum mit der Spule einen Schwingkreis darstellt. Dadurch, dass die beiden Schwingkreise die gleiche Resonanzfrequenz aufweisen aber unterschiedliche Kapazitäten besitzen, kommt es zu einer Spannungserhöhung.

$$E_{Pr im} = \frac{1}{2} * C_{Pr im} * U^2 = 0.5 * 107.7 nF * 10500 V^2 = 6 J$$

$$E_{Sek} = \frac{1}{2} * (C_{Sek} + C_{Top}) * U^2$$

$$U_{Sek} = \sqrt{\frac{E_{Pr im}}{\frac{1}{2} * (C_{Sek} + C_{Top})}} = \sqrt{\frac{6 J}{\frac{1}{2} * (26.5 pF)}} = 673 kV$$

Dieser theoretische Wert von 673 kV wird in der Praxis (Verluste) sicher nicht erreicht werden, aber zeigt in welcher Grössenordnung sich die Spannung bewegen wird.

In Abbildung 3 und 4 ist der theoretische Spannungsverlauf einer verlustlosen Spule aufgezeichnet. Je nach dem wie stark die Kopplung ist, dauert es mehr oder weniger lange, bis die komplette Energie übertragen ist. Wenn die Energie sekundärseitig nicht abgeführt wird, pendelt sie zwischen den beiden Schwingkreisen hin und her. Idealerweise löscht die Funkenstrecke nachdem die komplette Energie das erste Mal vollständig in den Sekundärkreis übertragen worden ist.

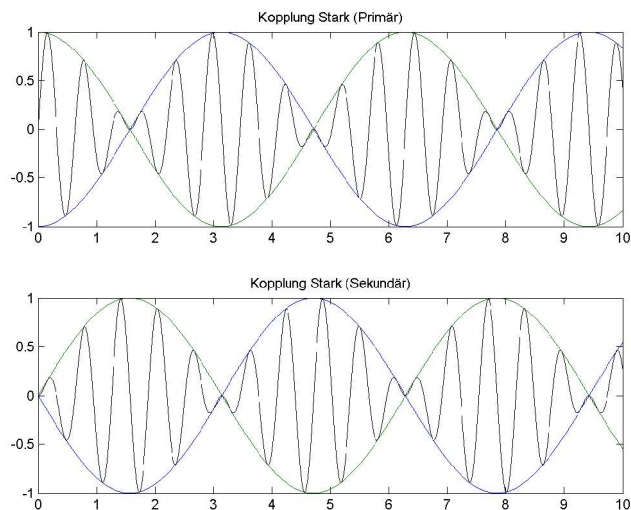


Abbildung 3

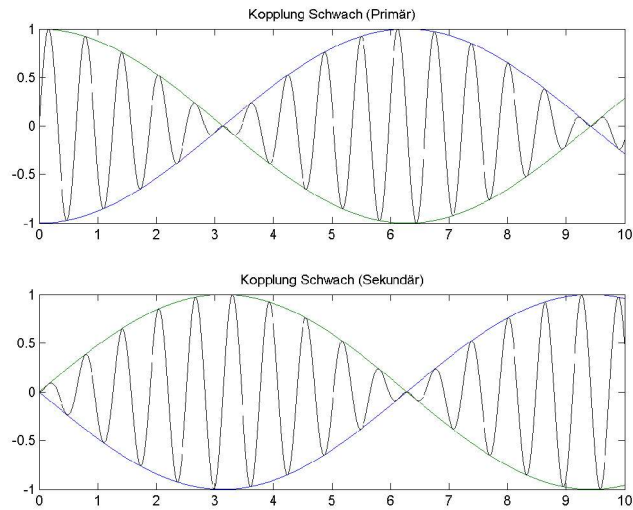


Abbildung 4

In der Praxis hat die Funkenstrecke aber einen ohmschen Widerstand von ca. 2 Ohm. Dies führt zu einer exponentiell gedämpften Schwingung. (Abbildung 5)

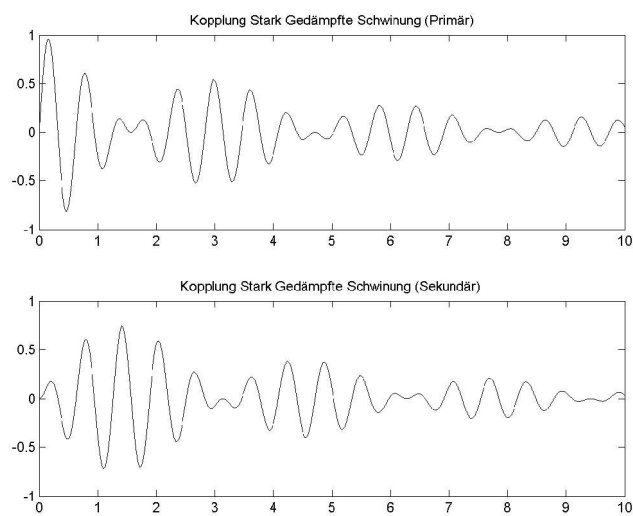


Abbildung 5

Das Matlab Script zu diesen Grafiken befindet sich im Anhang.

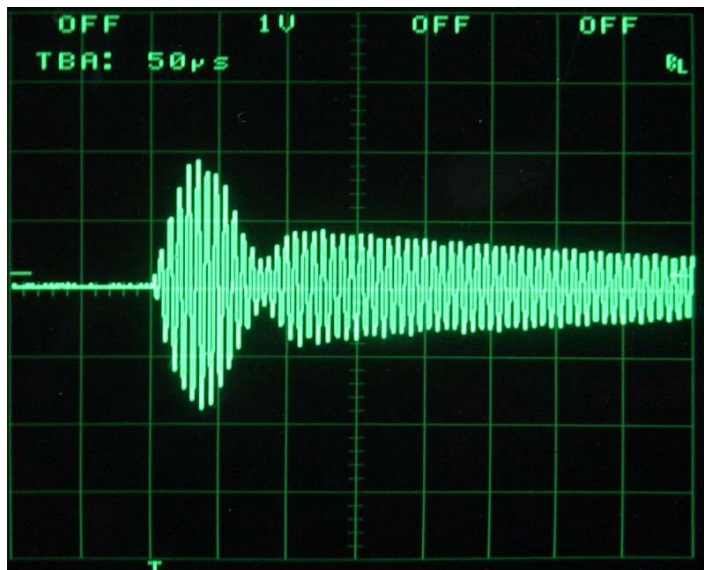


Abbildung 6

Abbildung 6 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf der Sekundärspannung. (gemessen mit einer KO Probe in der Luft mit 3 m Abstand zum Toroid) Aufgrund der grossen Verluste wird die Schwingung sehr stark gedämpft. Offenbar löscht die Funkenstrecke in diesem Fall nach ca. 100 ms und die Energie bleibt im Sekundärkreis gefangen und klingt langsam aus.

2.2.Wahl der Schaltung

Es gibt mehrere mögliche Varianten eine Teslapule zu realisieren. Einige davon zeigen die folgenden Grafiken.

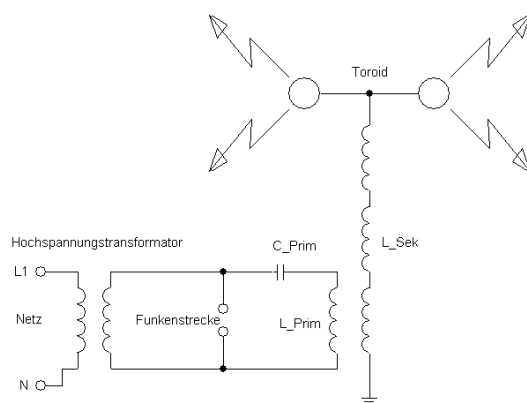


Abbildung 7

Die Abbildung 7 zeigt die **klassische Schaltung**. Diese gibt es noch in leicht abgewandelter Form. Hier sind der Primärkondensator und die Funkenstrecke vertauscht. (Abbildung 8) Sie funktioniert im Prinzip genau gleich wie die klassische Schaltung.

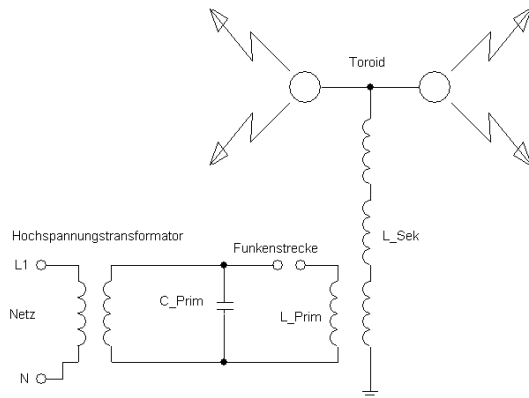


Abbildung 8

Es wäre auch denkbar, eine Teslapule mit Gleichstrom zu betreiben. Dies könnte z.B. so aussehen:

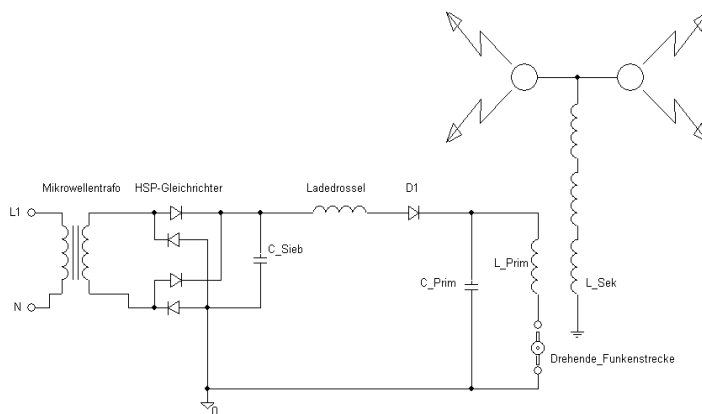


Abbildung 9

In der Schaltung, die Abbildung 9 zeigt, wird die Netzspannung auf z.B. 2400 V transformiert. Für diesen Zweck könnte ein spannungssteifer Mikrowellentrafo verwendet werden. Die Spannung wird nun gleichgerichtet und mittels eines Kondensators geglättet. Der Primärschwingkreis ist ähnlich aufgebaut wie bei der konventionellen Schaltung. Er muss aber zwingend aus einer drehenden Funkenstrecke bestehen. Vor den Schwingkreis ist eine Ladedrossel, sowie eine Diode geschaltet. Wenn die Funkenstrecke zündet, reisst sie die Spannung über der Ladedrossel (Induktivität im Bereich einiger Henry) gegen 0 V. Es beginnt ein Strom zu fließen. Wenn in der Funkenstrecke der Lichtbogen mechanisch auseinandergerissen wird, will der Strom in der Drossel weiterfließen und baut eine Spannung zusätzlich zur gleichgerichteten Spannung auf. Wenn die Funkenstrecke jetzt erneut zündet, beginnt die Energieübertragung in die Sekundärspule.

Heutzutage wäre es auch denkbar, die Funkenstrecke in den verschiedenen Schaltungen durch Halbleiter zu ersetzen.

Ich wollte ursprünglich die Schaltung, die unter Abbildung 9 beschrieben ist, realisieren. Bei dieser Variante gibt es einige problematische Komponenten. Die Ladedrossel muss eine sehr hohe Induktivität besitzen (im Bereich von einigen

Henrys). Dies ist nur mit einer riesigen Drossel zu realisieren. Die Diode im Ladekreis muss eine sehr hohe Spannungsfestigkeit besitzen. Dies wäre z.B. durch mehrere Dioden in Serie zu erreichen. Für ein Problem sehe ich aber keine Lösung: Das kontrollierte Löschen der Funkenstrecke. In Simulationen hat sich gezeigt, dass der wichtigste Parameter die Einschaltzeit der Funkenstrecke (t_{on}) ist. Die Funkenstrecke muss in diesem Aufbau in dem Moment löschen, in der der grösste Strom fliesst. Dies wird zur Folge haben dass der Lichtbogen weit aufgezoogen werden kann ohne dass er löscht. Wenn aber die t_{on} Zeit nur ein wenig länger ist, als sie sein sollte, kann dies schon fatale Folgen haben. Der Strom wird dadurch zu wenig begrenzt. Dies kann einerseits zu einer zu hohen Primärspannung führen, andererseits aber kann die Drossel in die Sättigung gehen. Beides könnte zur Zerstörung der Bauteile führen. Wenn die Drosseln in die Sättigung gehen sind alle Dioden im System gefährdet, wenn die Spannung zu hoch wird könnte es zu Durchschlägen kommen.

Die DC gespeiste Spule hat sicher ihren Reiz, sie ist aber nicht sicher zu realisieren. (siehe Abschnitt oben) Ausserdem birgt sie ein grosses Risiko, dass in der Entwicklungsphase das eine oder andere Bauteil zerstört wird. Wenn man bedenkt, welche Energien in den Drosseln und Kondensatoren gespeichert wären, wird man meinen Entschluss sicher verstehen, weshalb ich diese Idee verworfen habe.

Eine Halbleitervariante wäre auch denkbar. Dies wäre aber voraussichtlich mit deutlich mehr Aufwand verbunden. Ausserdem bin ich nicht eingerichtet um Leiterplatten zu entwerfen oder gar zu fertigen.

Von den AC Schaltungen ist diejenige vorteilhafter, in der die Funkenstrecke parallel zum Hochspannungstrafo liegt. In der Schaltung ist der Hochspannungstrafo in dem Moment, in der die Funkenstrecke gezündet hat, kurzgeschlossen und wird somit nicht mit der Resonanzfrequenz des Primärschwingkreises belastet.

2.3.Drahtlänge = $\Lambda/4$?

Im Internet findet sich eine Menge an Informationen über Teslaspulen. Diese Informationen sind aber teilweise mit Vorsicht zu geniessen! Beispielsweise wird häufig erwähnt, dass für die Funktion einer Teslaspule die sogenannte $\Lambda/4$ Bedingung erfüllt sein muss. Damit ist gemeint dass die Drahtlänge einem Viertel der Wellenlänge der Resonanzfrequenz entsprechen soll. Vertreter dieser Theorie (inkl. Tesla) begründen dies dadurch, dass durch die Reflexion am Leiterende so eine stehende Welle entstehe. Ich denke nicht, dass dieser Effekt in dem Frequenzbereich, in dem Teslaspulen typischerweise operieren (50 kHz-300 kHz), stark zum Tragen kommt. Auch ist die Sekundärspule ein weitaus komplexeres Gebilde als ein gerader gestreckter Draht. Diese Diplomarbeit untermauert diese Vermutung dadurch, als dass sie zufriedenstellend arbeitet!

Verwendete Drahtlänge = 651m

$\Lambda/4$ bei 146kHz liegt bei 513m

2.4. Skineffekt?

Auf einigen Internet Seiten findet man Abbildungen von Leuten die metallene Gegenstände in der Hand halten und sich damit einer laufenden Teslaspule nähern bis die Entladungen einschlagen. Durch den Skineffekt fliesse der Strom nur auf der Hautoberfläche. **Von solchen Aktionen möchte ich ausdrücklich abraten!**

Der Skineffekt hat bei den relativ tiefen Frequenzen (bereich typisch 50-500 kHz) und dem hohen spezifischen Widerstand des Menschen nur einen sehr geringen Einfluss. In der Tat spürt man keinen Schmerz und die Muskeln reagieren nicht auf den Strom. Muskeln registrieren Frequenzen oberhalb von einigen kHz nicht mehr, ähnlich dem Ohr das keine Frequenzen oberhalb 20 kHz mehr wahrnimmt. Die chemische Zersetzung im Körper wird so aber nicht verhindert!

Ausserdem besteht die Gefahr der Verbrennung von Körpergewebe durch die eintreffenden Lichtbögen, falls diese direkt auf die Haut treffen.

3. Einzelne Komponenten im Detail

3.1. Sicherheitsfunkenstrecke

Die Sicherheitsfunkenstrecke dient dazu, eventuell auftretende Spannungsspitzen kurzzuschliessen. Dies kann z.B. eintreten durch eine Fehlzündung der drehenden Funkenstrecke (-> Resonanzüberhöhungen) oder einen falschen Zündwinkel.

Ich habe Edelstahlkugeln mit einem Durchmesser von je 25mm verwendet. Der Abstand lässt sich mit 2 Inbusschrauben justieren. Je weiter die Kugeln voneinander entfernt sind, desto höher muss die Spannung sein, damit es zu einem Durchschlag kommt. Die Schlagweite hängt vom Ausbruchradius der Elektroden ab. Im Gegensatz zu einer Spitze hat eine Kugel einen sauber definierten Radius. Auch ist es wichtig, dass die Sicherheitsfunkenstrecke genügend Energie abführen kann und sich nicht überhitzt. Dies ist ein weiterer Vorteil der massiven Stahlkugeln.

Leider haben Funkenstrecke den Nachteil, dass die Schlagweite auch vom Spannungsverlauf abhängt. Je steiler der Spannungsanstieg, desto früher erfolgt ein Durchschlag. Aus diesem Grund musste ich den Abstand ein wenig weiter erhöhen, als es alleine für den Leerlaufbetrieb des Hochspannungstrafos nötig gewesen wäre.

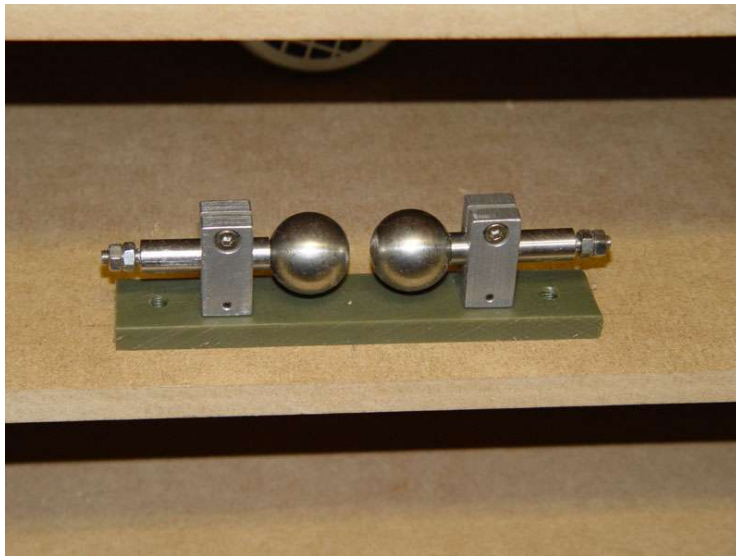


Abbildung 10 Sicherheitsfunkenstrecke

3.2.Funkenstrecke / Rotary

Funkenstrecken kann man auf verschiedene Arten aufbauen. Die einfachste ist die **statische Funkenstrecke**. Sie besitzt 2 Elektroden, die einen fixen Abstand aufweisen, und zündet wenn die Schlagweite der Spannung ausreicht, um den Luftspalt zu überwinden. (siehe Tabelle 1) Die statischen Funkenstrecken sind relativ einfach herzustellen, haben aber den Nachteil, dass sie unter Umständen schlecht löschen. Das Löschverhalten kann dadurch verbessert werden, dass mehrere Funkenstrecken in Serie geschaltet werden und / oder Pressluft eingesetzt wird, um die ionisierte heisse Luft auszublasen. Leider liefern die statischen Funkenstrecken nicht sehr konstante Ergebnisse. Dies macht sie zusammen mit den genannten Nachteilen für eine Diplomarbeit uninteressant.

SPARK-GAP VOLTAGES

Based on results of the American Institute of Electric Engineers Air at 760 mmHg, 25 °C					
Peak Volt- age	Needle points	Diameter of spherical electrodes, [cm]			
		2.5	5	10	25
[kV]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
5	0.42	0.13	0.15	0.15	0.16
10	0.85	0.27	0.29	0.30	0.32
15	1.30	0.42	0.44	0.46	0.48
20	1.75	0.58	0.60	0.62	0.64
25	2.20	0.76	0.77	0.78	0.81
30	2.69	0.95	0.94	0.95	0.98
35	3.20	1.17	1.12	1.12	1.15

Tabelle 1

Eine Weiterentwicklung der statischen Funkenstrecke ist die **drehende Funkenstrecke**. Dabei drehen die Elektroden angetrieben von einem Elektromotor und nähern sich abwechselnd und entfernen sich wieder. Dies hat mehrere Vorteile: Die ionisierte Luft wird weggeblasen, die Elektroden durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit gekühlt und die Funkenstrecke zündet kontrolliert immer zur gleichen Zeit. Zudem kann durch das Design der Abstand der Elektroden verringert werden, was sich positiv auf die Verlustleistung auswirkt. Nachteilig ist der grössere mechanische Aufwand.

Die drehenden Funkenstrecken kann man wahlweise (Phasen-) synchron oder Asynchron aufbauen. Um einen reproduzierbaren, kontinuierlichen Betrieb sicherzustellen habe ich mich für eine synchrone Variante entschieden. Den phasensynchronen Lauf kann man auf verschiedene Arten erreichen:

- Synchronmotor
- Asynchronmotor mit Tacho und Regelung (PLL)
- Asynchronmotor umgebaut als Reluktanzmotor

Einen Synchronmotor aufzutreiben wäre kein grosses Problem, leider sind z.B. Servomotoren sehr teuer in der Anschaffung.

Eine Regelung für einen Asynchronmotor aufzubauen ist mit einem grossen Aufwand verbunden. Vor allem wenn man bedenkt dass die Regelung in nächster Nähe einer laufenden Teslapule noch sehr präzise arbeiten soll.

Die letzte Variante erschien mir aufgrund der obigen Gesichtspunkten am interessantesten. Ein Reluktanzmotor ist ein einfacher Asynchronmotor in dessen Rotor so viele Flächen eingefräst werden wie Pole vorhanden sind. Der verwendete kleine 1 Phasen Kondensatormotor hat eine Nenndrehzahl von 2900 U/min. Durch das Abfräsen erhält der Rotor ausgeprägte Pole. Er läuft asynchron hoch und klinkt sich dann synchron ins Drehfeld ein. Durch die Modifikation verliert er zwar einen Grossteil seiner abgegebenen Leistung, aber diese reicht immer noch aus, um die Funkenstrecke anzutreiben. Der Umbau hat gleich auf den ersten Anhieb funktioniert. (je 2 mm abgefräst)



Abbildung 11

Die Wahl der Elektroden ist entscheidend für einen stabilen Betrieb der Anlage. Aus früheren Versuchen weiss ich, dass z.B. RF Schrauben aus V4A Stahl der Belastung nicht lange standhalten und in kürzester Zeit Abbrandstellen aufweisen. Für das WIG Schweißen werden Elektroden aus einer Wolframlegierung verwendet. Diese müssen einem Lichtbogen und sehr hohen Stromstärken standhalten. Sie sind erstens leicht erhältlich und zweitens durch die genannten Vorteile geradezu prädestiniert für eine Anwendung in einer Funkenstrecke. Die Verarbeitung der Wolframstäbe ist allerdings nicht ganz einfach. Wolfram ist extrem zäh. Mit einer feinen Trennscheibe und einer guten Portion Geduld ging es aber trotzdem.

Die stehenden Elektroden werden nicht durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit gekühlt, diese müssen deshalb separat gekühlt werden. Ich habe dies mit 2 Kühlkörpern realisiert. Die Funkenstrecke ist so aufgebaut, dass 2 oder 4 Elektroden eingesetzt werden können. (100 oder 200 Breaks pro Sekunde)

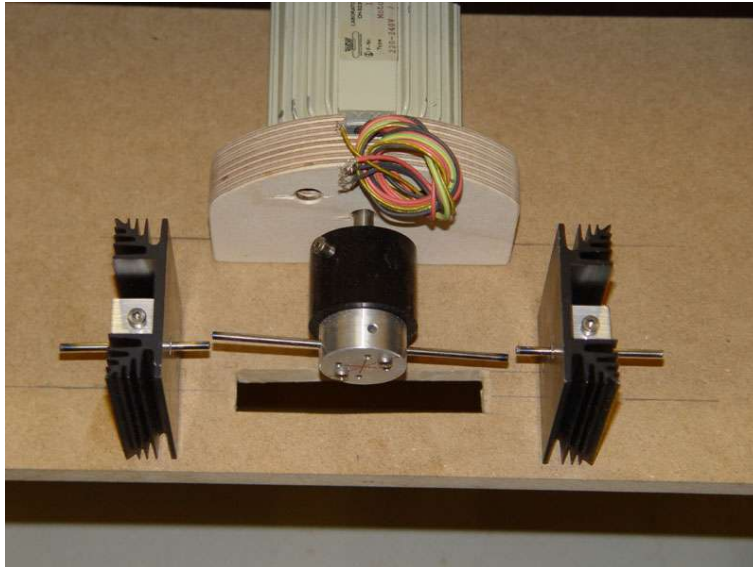
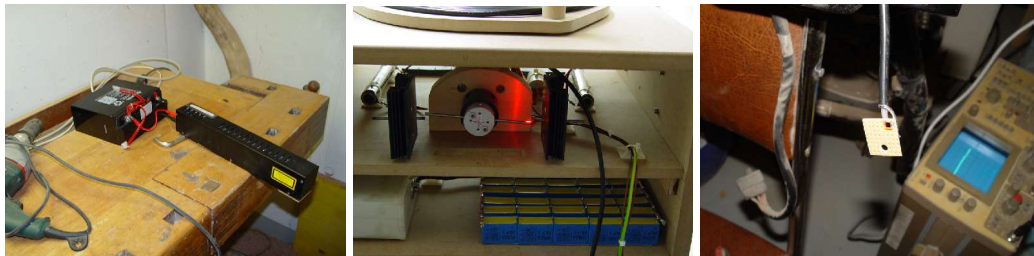


Abbildung 12 Drehende Funkenstrecke

Um die Funktion zu überprüfen habe ich einen Laserstrahl durch den Weg der drehenden Elektrode auf eine Photodiode gerichtet. Der Laserstrahl befindet sich dabei auf der Höhe der stehenden Elektrode. Der Aufbau mag ein wenig ungewöhnlich erscheinen (eine Art Gabellichtschranke wäre naheliegender) aber den Laser und die Photodiode hatte ich gleich zur Hand...

Die folgenden Bilder zeigen den Messaufbau.



Auf Abbildung 11 ist das gemessene Signal der Photodiode zu sehen. Der Motor dreht sehr exakt phasensynchron, auf dem Oszilloskop ist kein nennenswerter Jitter zu sehen.



Abbildung 13

Mit dem gleichen Aufbau habe ich die Elektroden mechanisch auf der Achse des Motors ausgerichtet, so dass der gewünschte Zündwinkel eingestellt werden kann.

Während des Betriebes ist es möglich den Zündwinkel am Oszilloskop zu überprüfen. Zumindest in dem Bereich, in dem die Spannung hoch genug ist, um die Funkenstrecke zu zünden.

3.3.Kondensatoren

An die Kondensatoren einer Teslaspule werden hohe Anforderungen gestellt. Einerseits müssen sie hohen Spannungen standhalten (10-30 kV), andererseits müssen sie grosse Impulsströme abgeben können und sie dürfen zudem nur sehr kleine dielektrische Verluste haben. Solche grossen Impulskondensatoren im Bereich von einigen 10nF übersteigen als Neuteile sicher jedes Studentenbudget. Ich habe 2 verschiedene Kondensatoren eingesetzt. Einerseits einen gebrauchten Maxwell Impulskondensator (Occ. in den USA gekauft) andererseits noch ein Array aus 18*5 Wima FKP1 Impulskondensatoren. Diese Kondensatoren haben eine Spannungsfestigkeit von 6000 V DC/ 700 V AC und jeweils 22 nF. Wie Versuche anderer Coiler gezeigt haben, können die Wima FKP1 über dem AC wert betrieben werden. Der DC Wert darf jedoch auf keinen Fall überschritten werden! Es hat sich gezeigt, dass der Strom das grössere Problem ist als die Spannungsfestigkeit. Für das Auslegen solcher MMC's (multi mini cap) gibt es von Terry Fritz ein Excel-sheet mit Parametern die teils aus Datenblättern, teils in Versuchen ermittelt worden sind.

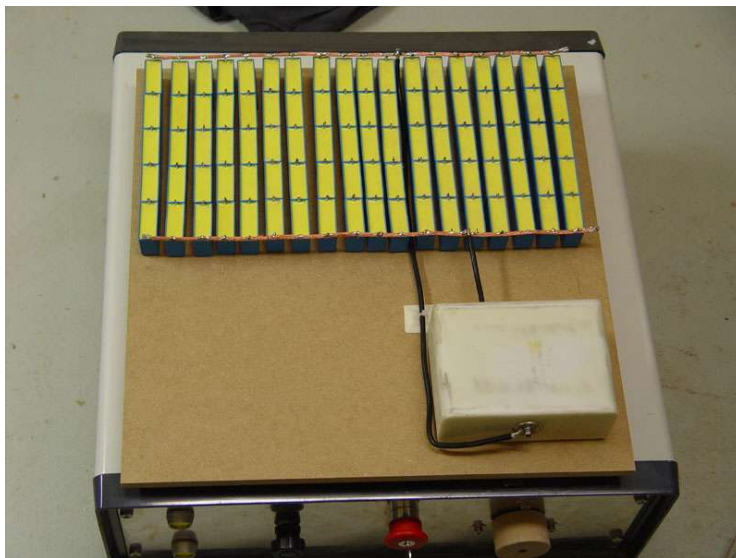


Abbildung 14 Kondensatoren

Die Datenblätter der Kondensatoren können im Anhang eingesehen werden.

Insgesamt haben die eingebauten Kondensatoren in meinem Aufbau 30 nF (Maxwell) + $18 * 1/5$ (WIMA) = 109.2 nF (gemessen 107.7 nF) und eine Spannungsfestigkeit von ca. 20 kV.

3.4.Primärspule

Die Primärspule besteht aus einigen wenigen Windungen. Sie hat in diesem Fall eine Induktivität von ca. 12 uH. Es gibt verschiedene Möglichkeiten Primaries aufzubauen. Flachspulen, Helix, konische Spulen usw. Als Leiter kommen Kupferbänder, Kupferrohre, Blitzableiterdrähte, dicke Litzen usw. in Frage. Ich habe mich für 16 mm² Litze entschieden. Diese hat 2 Vorteile: Sie ist günstig zu beziehen und ist isoliert. Die Spannungsfestigkeit der Litze ist erstaunlich hoch. 10 kV hält sie problemlos aus, höher hatte ich keine Möglichkeit zu testen. Die Isolation ermöglicht die einfachstmögliche Anordnung: gebündelt und mit Kabelbindern fixiert. Der Nachteil der Isolation ist, dass nicht so einfach ein verschiebbarer Abgriff angebracht werden kann. Dafür wird der ganze Aufbau durch die Isolation viel kompakter als es z.B. mit luftisolierten Röhrchen möglich wäre. Ganz zu schweigen vom mechanischen Aufwand für die Befestigung und das Biegen.

Berechnung der Induktivität (gem. Wheeler):

$$L_s = \frac{R^2 * N^2}{20.32R + 27.94W} = \frac{13cm^2 * 6^2}{20.32 * 13cm + 27.94 * 5cm} = 15.1\mu H$$

L Induktivität [uH]

W Spulenbreite [cm]

R Mittlerer Radius [cm]

N Anzahl Windungen



Abbildung 15 Primärspule

3.5. Sekundärspule

Die Sekundärspule ist sicher das auffälligste Bauteil einer Teslaspule. Sie besteht aus einer einlagigen Kupferlackdrahtwicklung auf einem eisenlosen Körper. In diesem Fall ist sie ca. 1m hoch (Wicklungslänge 914 mm). Ich habe einen 0.5 mm Kupferlackdraht der Firma Elecrisola verwendet, welcher mir gratis zu Verfügung gestellt wurde. Die technischen Daten können dem Datenblatt im Anhang entnommen werden.



Abbildung 16 Sekundärspule

Die Spule habe ich auf einer Drehbank gewickelt. Die Wickelzeit betrug bei 60 U/min ca. 30 min. Wichtig ist, dass sich die Windungen nicht überlappen und die Isolation nicht verletzt wird. Der Spulenkörper ist aus dem Baumarkt und hat einen Durchmesser von 125 mm.



Abbildung 17

Die Spule hat ca. 1659 Windungen und 44.7 mH (gemessen).
 Resonanzfrequenz mit Toroid beträgt ca. 146 kHz (gemessen in eingebautem Zustand, Primärkreis offen)
 Die Resonanzfrequenz variiert jedoch je nach Umgebung. Sie beträgt z.B. 146 kHz im Bastelraum und 152 kHz im Freien.

Berechnung der Induktivität (gem. Wheeler):

$$L_s = \frac{R^2 * N^2}{2540 * (9R + 10H)} = \frac{6.25cm^2 * 1659^2}{2540 * (9 * 6.25cm + 10 * 91.4cm)} = 43.625mH$$

L Induktivität [mH]
 R Spulenradius [cm]
 H Höhe [cm]
 N Anzahl Windungen

Eigenkapazität der Spule (gem. Medhurst):

C Eigenkapazität [pF]
 D Durchmesser [cm]
 K Konstante abhängig Höhe/Durchmesser ($91.4 / 12.5 = 7.3 \rightarrow K = 1.03$)

$$C_s = K * D = 1.03 * 12.5cm = 12.875pF$$

Benötigte Drahtlänge:

$$L_s = 2 * \pi * R * N = 2 * \pi * 0.0625 * 1659 = 651.5m$$

3.6. Toroid / Entladungsterminal

Als Entladungsterminal werden hauptsächlich Kugeln, oder bei grösseren Anlagen, Toroide verwendet. Die theoretisch maximal erreichbare Spannung nimmt zwar ab je grösser der Toroid ist. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass die Entladungen einiges grösser werden, wenn ein Toroid verwendet wird. Durch den grossen Austrittsradius erfolgt erst eine Entladung, wenn sich genügend Energie aufgebaut hat. Der Toroid soll so gross sein, dass die Entladungen gerade noch stark genug sind, dass sie ohne zusätzliche Ausbruchsstelle austreten können. Für die Dimensionierung ist die Faustformel von John Freau hilfreich:

Angestrebte Blitzlänge: 1.2m

Dividiert durch 2.5 gibt den Aussendurchmesser von 470 mm

Blitzlänge durch 10 gibt den Rohrdurchmesser von 120 mm

Einen ansprechenden Toroid herzustellen ist gar nicht so einfach. Vor allem wenn man nicht viel Geld dafür ausgeben will. Ein Bekannter von mir hat mir freundlicherweise aus 4 rostfreien Rohrbögen einen Toroiden zusammengeschweisst und sauber verschliffen, vielen Dank an Michael!

Er hat nicht ganz genau die Werte die John Freau's Formeln vorschlagen, aber mit 498*98 mm liegen sie doch relativ nahe.

Eine andere Alternative wäre es, Toroide aus sogenannten Aluflexlüfterschläuchen zu basteln. Diese sehen aber nicht sehr ansprechend aus, die Oberfläche ist nicht glatt und sie sind mechanisch instabil.



Abbildung 18 Toroid

Berechnung der Kapazität des Toroids gegen Erde (gem. Bert Pool):

$$C_T = 2.8 * (1.2781 - \frac{d_2}{d_1}) * \sqrt{0.1217 * d_2 * (d_1 - d_2)}$$

$$C_T = 2.8 * (1.2781 - \frac{8.8}{49.8}) * \sqrt{0.1217 * 8.8 * (49.8 - 8.8)} = 20.44 \text{ pF}$$

C Kapazität [pF]

d1 Aussendurchmesser [cm]

d2 Rohrdurchmesser [cm]

3.7.HSP Trafo

Als Hochspannungstrafos eignen sich kurzschlussfeste Trafos mit einer Ausgangsspannung von ca. 10-20 kV. Leistung je nach gewünschter Performance. Solche Transformatoren werden bspw. für Neon Leuchtreklamen, oder in Ölbrennern als Zündtrafo eingesetzt. Ich konnte 2 Neonleuchtreklame Trafos günstig erwerben bei einem Hersteller solcher Reklameschilder. Leider haben sie nur eine Ausgangsspannung von 7 kV eff. Der Ausgangskurzschlussstrom liegt gemessen bei 105 mA. Durch die interne Beschaltung (Z-Diode vom Mittelabgriff gegen Erde für eine optional erhältliche Schutzschaltung, siehe Anhang) ist es leider nicht möglich die beiden in Serie zu betreiben. Wie dem auch sei, ich habe einen der beiden Trafos eingesetzt und muss bedingt durch die relativ niedrige Ausgangsspannung mit grossen Kondensatoren und durch den hohen Strom mit verhältnismässig grossen Verlusten in der Funkenstrecke leben.

Der Hochspannungstrafo liefert gemessen 105 mA Kurzschlussstrom und 7 kV Leerlaufspannung.



Abbildung 19 NST

3.8.Filter

Der Primärkreis erzeugt durch die steilen Flanken beim Zünden der Funkenstrecke grosse Transienten. Diese würden dem Hochspannungstrafo schaden und Störungen ins Netz verursachen. Um diese Störungen zu unterdrücken habe ich ein RC Filter eingebaut. Es besteht aus 2 symmetrischen RC Tiefpässen zwischen dem Hochspannungstrafo und der Funkenstrecke. Die Grenzfrequenz liegt bei 159 kHz. Die Widerstände haben jeweils 500 Ohm und können mit 100 W belastet werden. Als Kondensatoren kommen RIFA Impulskondensatoren zum Einsatz. Jeweils 5 stk mit je 10 nF in Serie, damit sie die nötige Spannungsfestigkeit erreichen. Die Widerstände sind aus einem ausgedienten Hochspannungsisolationsprüfgerät ausgebaut.

$$F_g = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 500 * 2e-9} = 159 \text{ kHz}$$

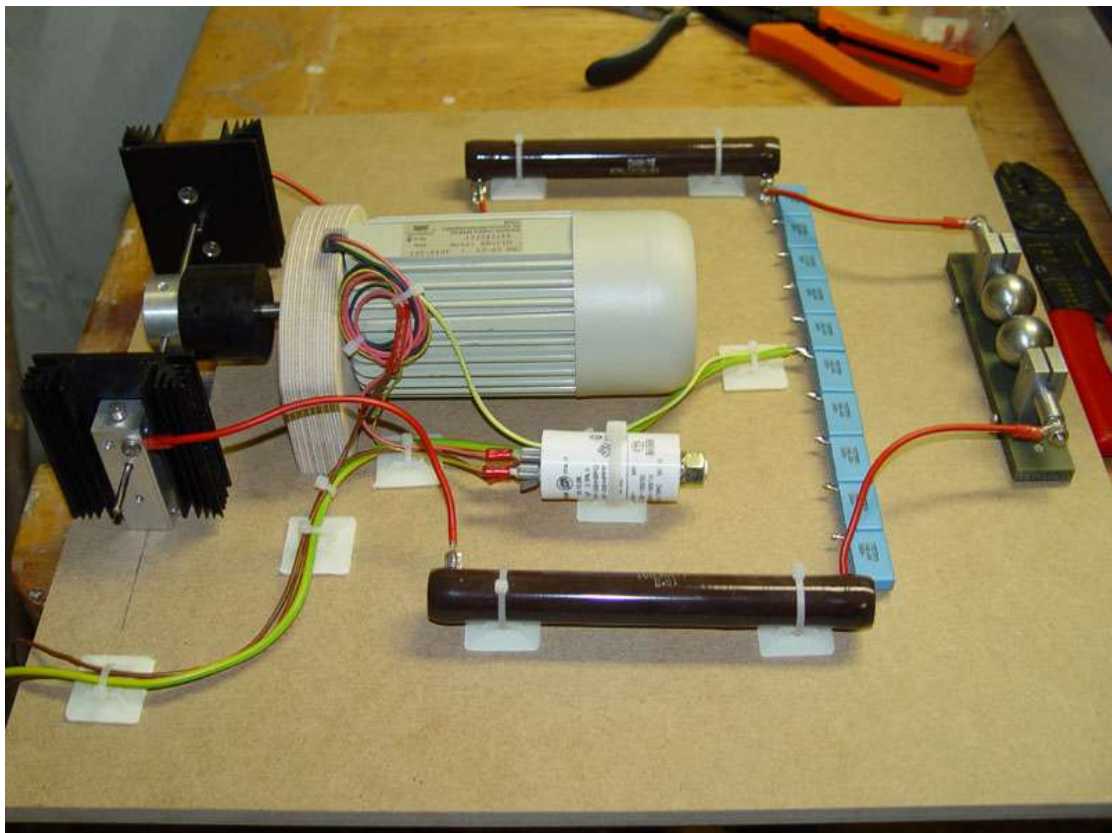


Abbildung 20

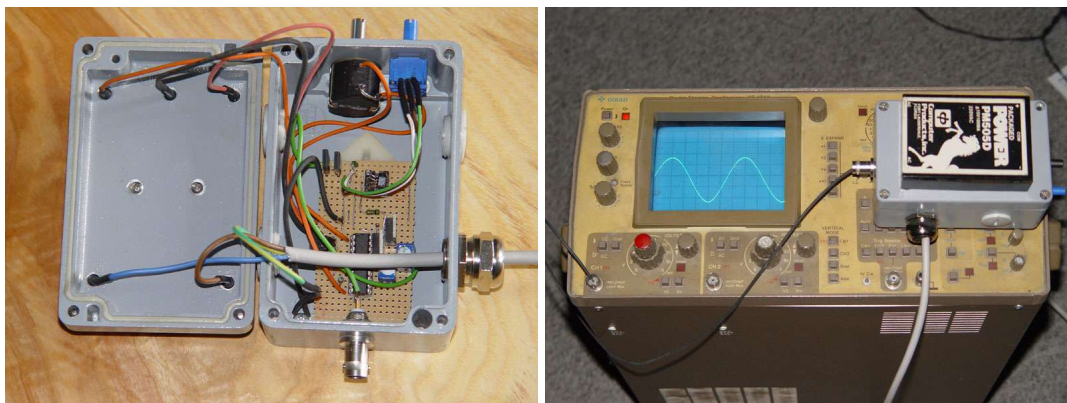
3.9.Masse / Gegenpol

Teslaspulen sollten nicht an der Hauserde betrieben werden. Störungen würden über die Erdleitung die ganze nähere Umgebung stören. Es ist sogar mit grösseren Spannungsabfällen über den Leitungsinduktivitäten zu rechnen. Idealerweise erfolgt der Betrieb einer Teslaspule im Freien. Hier kann ein Metallstab in den Boden getrieben werden. (Bei trockenem Boden Wasser ins Loch giessen)

Beim Betrieb innerhalb eines Gebäudes macht es Sinn einen eigenen „Gegenpol“ zu schaffen. Dies kann ein grosses Blech, Maschendraht, Alufolie oder ähnliches, am Boden ausgelegt, sein. Die Leitung zu der Erde bzw. Gegenpol soll möglichst kurz sein und eine kleine Induktivität besitzen. Alufolie oder Blechstreifen werden sternförmig ausgelegt. Der Anschluss erfolgt dann in der Mitte. Während den Versuchen habe ich ca. 5 m² Maschendrahtgitter als Gegenpol verwendet.

3.10.Hilfsmittel

Für das Abstimmen der Schwingkreise wird ein Sinusgenerator benötigt. Er sollte einen Frequenzbereich von 50 kHz-300 kHz abdecken und einen niederohmigen Ausgang besitzen. Den verwendeten Sinusgenerator habe ich vor den Sommerferien aufgebaut. Das Schema dazu befindet sich im Anhang.



Um Messungen im Primärkreis durchführen zu können, wird eine Hochspannungsdifferentialprobe benötigt. Für den Aufbau einer kleinen Spule vor einigen Jahren hat Tobias Hofer eine solche Probe gebaut. Sie hat sich auch bei dieser Arbeit bestens bewährt. Das Schema ist ebenfalls im Anhang zu finden.



4. Auslegung / Berechnungen

4.1. Simulationen / Vergleich mit Praxis

Um abschätzen zu können, wie sich die geplante Anlage verhalten wird habe ich eine Simulation im Pspice angefertigt. Sie simuliert den Spannungsverlauf im Primärkreis. Mit der Simulation war es mir möglich, die optimale Grösse des Primärkondensators sowie des Zündzeitpunktes zu bestimmen. Den Hochspannungstrafo (NST= Neon Sign Transformer) habe ich für die Simulation durch eine Spannungsquelle und eine Streuinduktivität ersetzt. Der ohmsche Wicklungswiderstand wird durch einen Widerstand in Serie dargestellt.

Streuinduktivität:

$$XL = \frac{U - (R_i * I)}{I} = \frac{7000V - (3500\Omega * 0.105A)}{0.105A} = 63167\Omega$$

$$L_s = \frac{XL}{2 * \pi * f} = \frac{63167\Omega}{2 * \pi * 50} = 201.1H$$

Als Funkenstrecke kommt ein zeitlich gesteuerter Schalter in Serie mit dem Innenwiderstand Ri zum Einsatz..

Anhand der Simulationen habe ich den Zündzeitpunkt auf 2.5 ms festgelegt. Die ideale Grösse des Primärkondensators beträgt ca. 132 nF. Mit den vorhandenen Kondensatoren konnte ein Wert von 107.7 nF erreicht werden. So erreiche ich nicht ganz die maximal mögliche Leistung die dem Trafo entnommen werden kann. Sie reicht aber aus für das gesetzte Ziel. (>75 cm Funkenlänge) Mit 107.7 nF bin ich ausreichend von der 50 Hz Resonanz entfernt. Diese könnte bspw. durch eine Fehlzündung der Funkenstrecke zu enormen Resonanzspannungsüberhöhungen führen. (Resonanz bei 50Hz würde mit ca. 51 nF erreicht werden.)

Neon: 7kV/105mA 50Hz

RC Tiefpass
Fg=159.2kHz

Primärschwingk.
Fres: 146KHz

Rotary: 100BPS sync

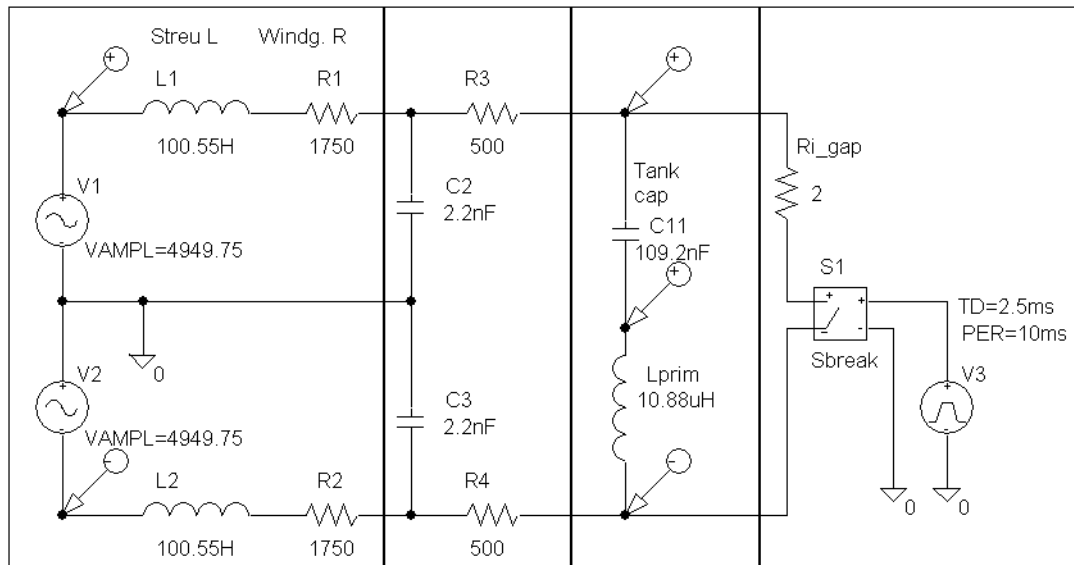
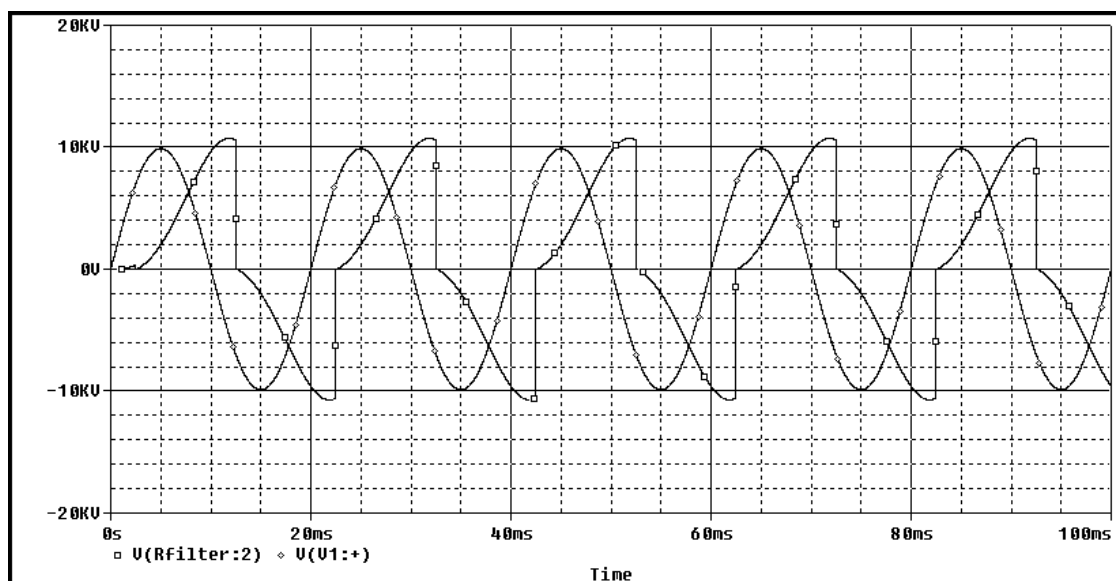


Abbildung 21 PSpice Modell

Das Ergebnis der Simulation...



...Im Vergleich zur realen Messung.

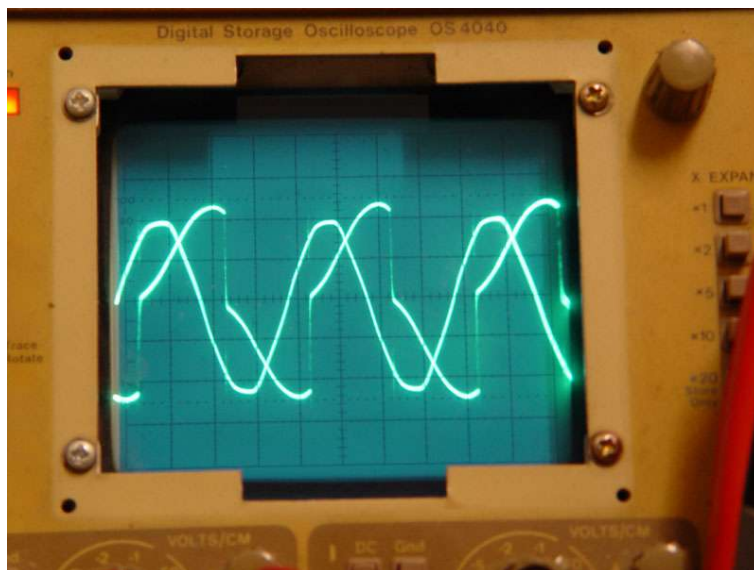


Abbildung 22

Die Simulation stimmt erstaunlich präzise mit den gemessenen Werten überein. Ich hätte durch das doch sehr vereinfachte Modell des Streufeldtrafos etwas grössere Abweichungen erwartet. (das Sinussignal in Abbildung 21 dient lediglich als Phasenreferenz, 5kV/DIV)

4.2.Berechnungen allgemein

Bei der Auslegung einer Teslaspule gibt es viele Dinge zu berücksichtigen. Vieles ist voneinander abhängig. Um nach dem Verändern eines Parameters nicht jedes Mal alles neu durchrechnen zu müssen, habe ich die ganzen Berechnungen in ein Excel Blatt eingegeben. So wird alles automatisch nachgetragen. Ein Ausdruck der Exceldatei ist im Anhang zu finden.

Resonanzfrequenz Primärschwingkreis:

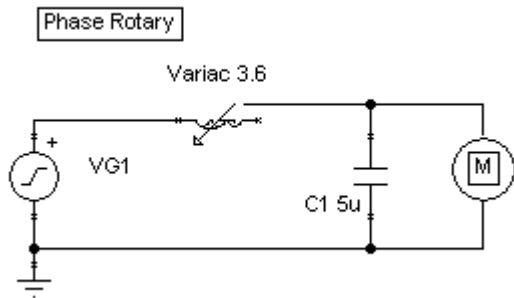
$$F_R = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{11 \mu H * 107.7 nF}} = 146.2 kHz$$

Resonanzfrequenz Sekundärschwingkreis:

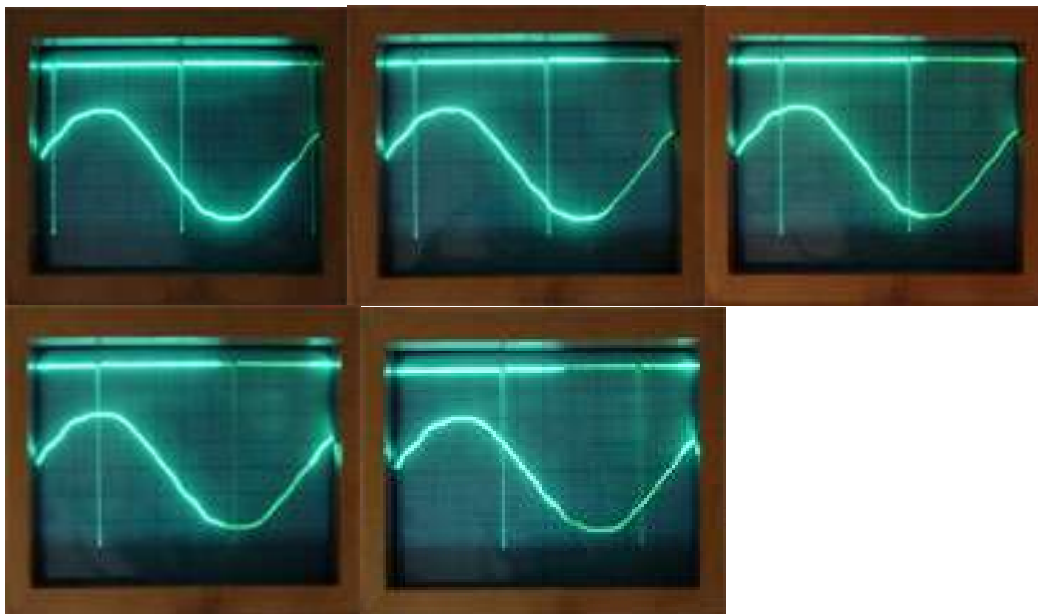
$$F_R = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{44.7 mH * 26.5 pF}} = 146.2 kHz$$

4.3. Phasenschieber

Der Zündzeitpunkt ist für den Betrieb der Anlage ein wesentlicher Aspekt. Um diesen während des Betriebes live nachjustieren, gibt es eine einfache Schaltung bestehend aus einem Variac und einem Kondensator. (Nach einer Idee von John Freau)

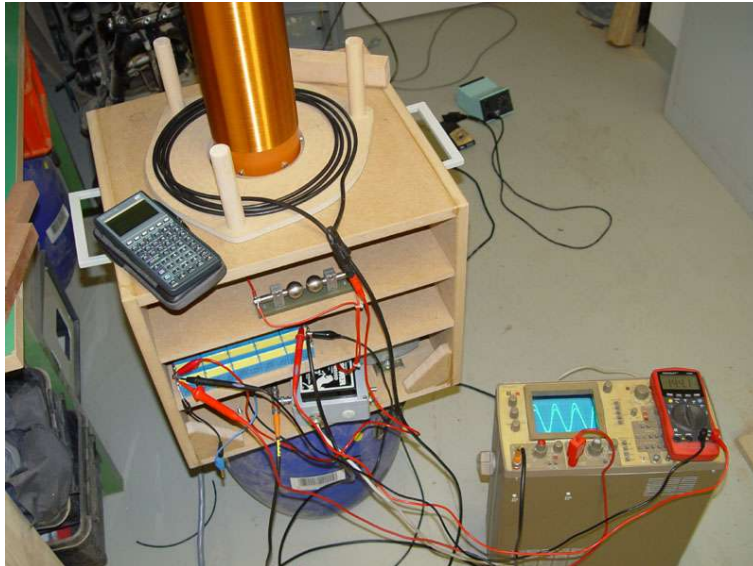


Die folgenden Abbildungen zeigen den Zündzeitpunkt bei einer Einstellung von 0%, 25%, 50%, 75% und 100%

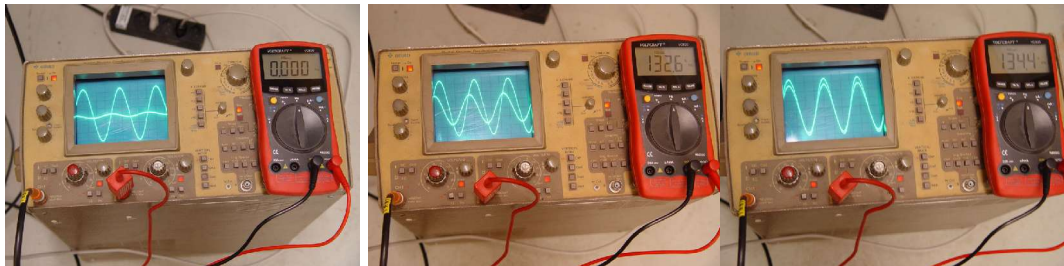


4.4.Messungen

Für die Messung der Resonanzfrequenz(en) im Primärschwingkreis werden C_{Prim} und L_{Prim} parallel geschaltet, und über ein 10 kOhm Widerstand ein Frequenzgenerator eingekoppelt.



Die Frequenz wird solange durchgestimmt, bis auf dem Oszilloskop ein Ausschlag zu sehen ist. Als Hilfe kann als zweiter Kanal das Signal des Frequenzgenerators angezeigt werden. Wenn die beiden Sinussignale phasengleich sind, ist eine Resonanz erreicht. Die Frequenz wird abgelesen und notiert.



Wenn die Sekundärspule angeschlossen (geerdet) ist sind 2 Resonanzen zu sehen. Dies ist auf die beiden gekoppelten Schwingkreise zurückzuführen. Sie beeinflussen sich bereits durch die schwache Kopplung ($K \approx 10\%$). Über die Kopplung „sehen“ die Schwingkreise jeweils einen Teil der Induktivität, bzw. Kapazität des andern Schwingkreises. Wird die Sekundärspule von der Erde getrennt ist die Resonanzfrequenz des unbelasteten Schwingkreises zu sehen.



Abbildung 23 Messung Sekundärspule

Für die Messung der Sekundärspule wird eine KO Probe in ca. 1m Abstand zum Toroid auf gleicher Höhe fixiert. Ein Frequenzgenerator mit einem niederohmigen Ausgang wird an den Fusspunkt der Spule angeschlossen. Die Masse des Generators wird mit der abgehängten Erdverbindungsleitung verbunden. Nun wird wieder die Frequenz des Sinussignals durchgestimmt bis auf dem Oszilloskop ein Ausschlag zu sehen ist. Die Frequenz, die auf diese Weise ermittelt werden kann, entspricht der Resonanzfrequenz des unbelasteten Sekundärschwingkreises. Diese ist aufgrund der unterschiedlichen Kapazität, die durch den Toroid und die Erde gebildet werden, je nach Umgebungsbedingung ein wenig anders.

Wenn nun die Funkenstrecke des Primärkreises kurzgeschlossen wird, kann die Sekundärspule im belasteten Zustand gemessen werden. Wie beim Primärschwingkreis sind nun auch 2 Resonanzen vorhanden.

Die Kapazität des Primärkondensators sowie der beiden Spulen habe ich mit einem RLC Messgerät der Firma Grundig (Typ RLC 100) gemessen .

Die gemessenen Werte können dem Anhang entnommen werden.

4.5.Abstimmung

Die beiden Schwingkreise müssen aufeinander abgestimmt werden. Da der Sekundärkreis nur schlecht verändert werden kann wird der Primärkreis auf diesen abgestimmt. Das Abstimmen geschieht durch das Verändern der Wicklungsanzahl der Primärspule. Es werden jeweils die unbelasteten Resonanzfrequenzen betrachtet. Durch versuchsweises Einschalten kann die Funkenlänge durch Vergrössern der Primärinduktivität vergrössert werden (im Bereich von ca. + 5-10%) Dies sind Erfahrungswerte. Ich vermute, dass dies der, durch die während des Betriebes austretenden Funken, grösser werdenden Kapazität des Sekundärkreises, entgegenwirkt.

Im ersten Gespräch mit dem Fachlehrer (Urs Bernegger) wurde abgemacht die Resonanzfrequenz im belasteten Zustand abzustimmen. Dies konnte nicht realisiert werden, weil sich die Resonanzfrequenzen beider Schwingkreise im belasteten Zustand miteinander verschieben. Eine Änderung der Primärresonanzfrequenz hat so immer auch eine Änderung der (belasteten) Sekundärresonanzfrequenz zur Folge. Die besten Ergebnisse wurden mit dem weiter oben beschriebenen Verfahren erzielt.

4.6.Aufgetretene Probleme

Während den Simulationen hat sich gezeigt, dass, bedingt durch den Innenwiderstand der Funkenstrecke von ca. 2 Ohm, der **ideale Hochspannungstransformator** eine Spannung von ca. 15 kV abgeben sollte. Mit dem eingesetzten Trafo (7 kV) muss ein sehr grosser Primärkondensator eingesetzt werden, was zu sehr grossen Strömen im Primärkreis führt. Dies ist sicher nicht ideal, aber es funktioniert trotzdem zufriedenstellend.

Während den Messungen erfolgte ein **Durchschlag** von der Primär- in die Sekundärspule. Wie es Murphy so will, natürlich auf der Rückseite der Spule. Dadurch habe ich es erst zu spät bemerkt. Der Durchschlag erfolgte bei dem Versuch die Blitzlänge bei hoher Kopplung zu optimieren. Die Primärspule befand sich zu diesem Zeitpunkt ca. 6 cm über dem Wicklungsanfang der Sekundärspule.

Aufgrund dieses Vorfalls habe ich die Primärspule neu gebaut. Diesmal mit dickerer Litze (16 mm²) ohne Abgriffe (Isolation!). Die neue Spule ist enger gewickelt, so dass schon eine hohe Kopplung erreicht werden kann wenn sich die Primärspule noch unterhalb der Sekundärspule befindet. Die Sekundärspule habe ich für die weiteren Versuche repariert:

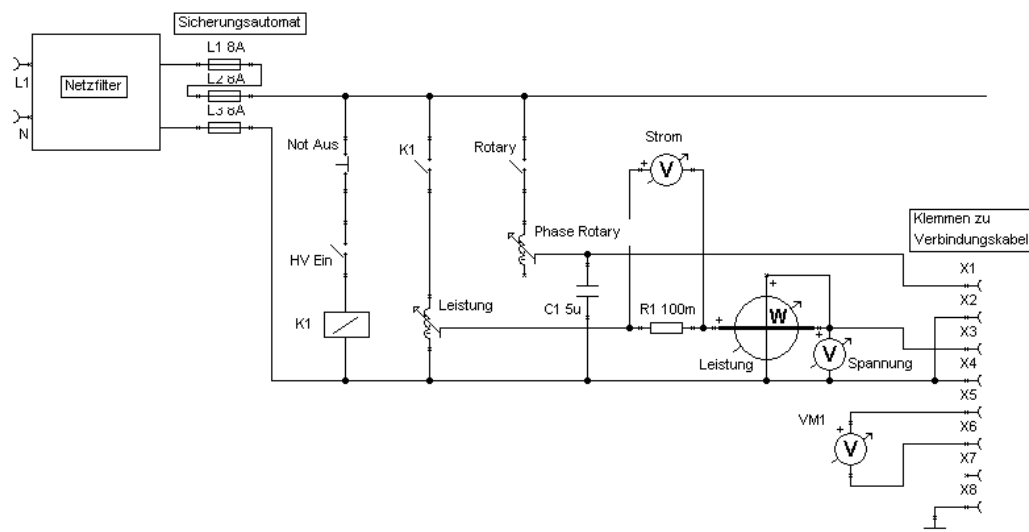
- Abbrandstelle vorsichtig abgeschliffen.
- Den Zwischenraum zwischen den Wicklungen gesäubert.
- Unteren Teil der Wicklung mit mehreren Schichten Isolierspray lackiert.

Anfangs erfolgte nochmals ein Durchschlag. Dies konnte durch nochmaliges Lackieren verhindert werden. Sie scheint jetzt wieder zu halten. Leider habe ich nur noch ca. 500m Kupferlackdraht, würde aber um die 650m benötigen um die Spule neu zu wickeln.

5. Praktischer Aufbau

5.1.Steuerpult

Für den Betrieb der Anlage werden einige Schalter und Regler benötigt. Zudem ist es von Vorteil über eine Anzeige einiger wichtiger Betriebsparameter zu verfügen. In der folgenden Abbildung kann der Schaltplan entnommen werden.



Da ich kein Einbau Wattmeter zur Verfügung hatte habe ich 4 Buchsen für den Strom und Spannung vorgesehen, an die ein externes Wattmeter angeschlossen werden kann. Dies hat zudem den Vorteil, dass für weitere Messungen eine Schnittstelle für Strom und Spannung zur Verfügung stehen. Wenn das Wattmeter nicht angeschlossen ist, müssen die Stromanschlüsse mit einer Kurzschlussbrücke überbrückt werden. Die Verbindung zum Hochspannungsteil besteht aus einem mehradrigen Kabel, das hinten am Bedienteil eingesteckt wird.



Abbildung 24 Steuerpult

5.2.HSP-Teil

Ich habe versucht den ganzen Aufbau einigermaßen kompakt zu halten, damit ich die ganze Anlage problemlos mit dem PW transportieren kann. Der Spannungswandler hat lediglich eine Spannungsfestigkeit von 5 kV. Er zeigt deshalb nur die Spannung einer Ausgangswicklung. Für einen einfachen Transport besitzt der Aufbau 2 versenkbare Traggriffe. Die einzelnen Komponenten sind auf Schubladen angebracht. Diese können bei Bedarf ausgebaut werden. Die Sekundärspule wird mit einer M6 Mutter befestigt. Die Befestigung dient auch gleich dem elektrischen Anschluss. Abbildung 18 zeigt das Verdrahtungsschema.

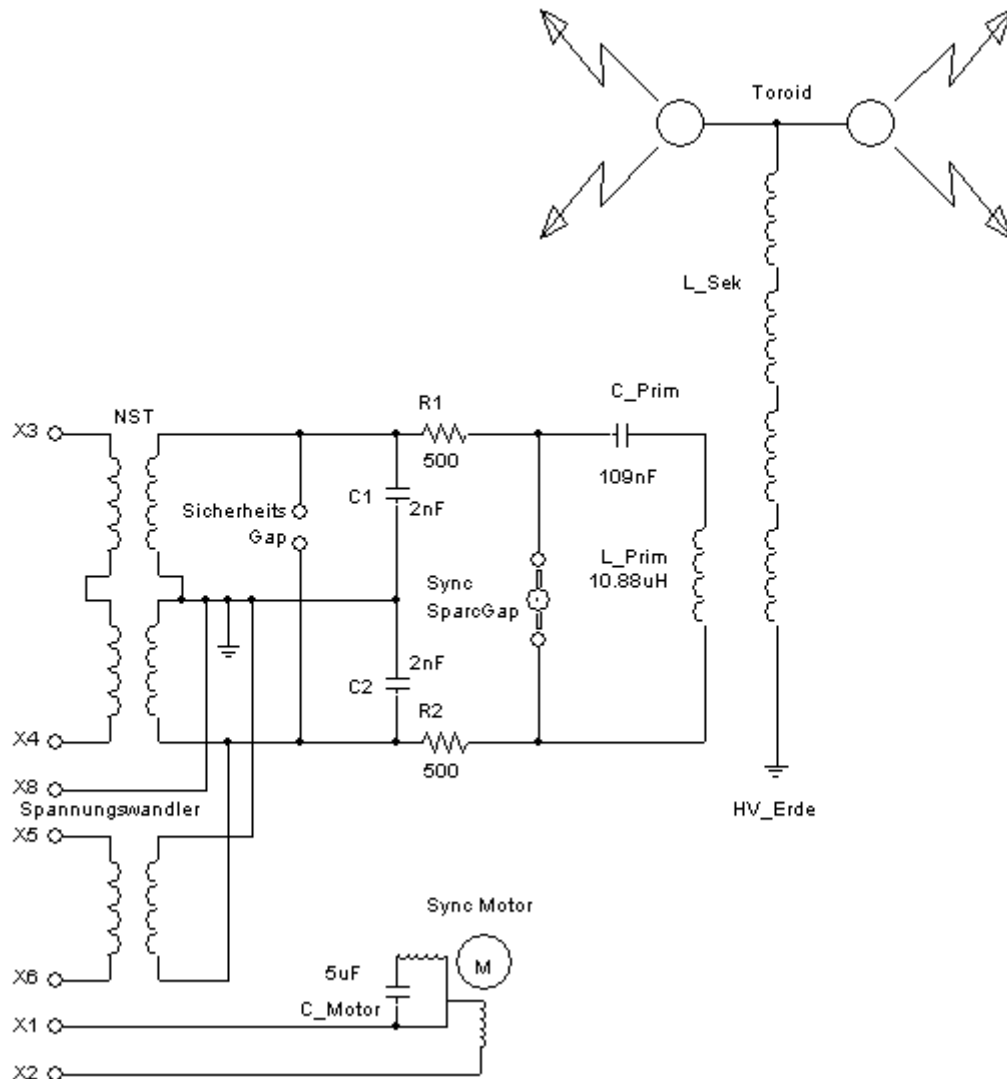


Abbildung 25

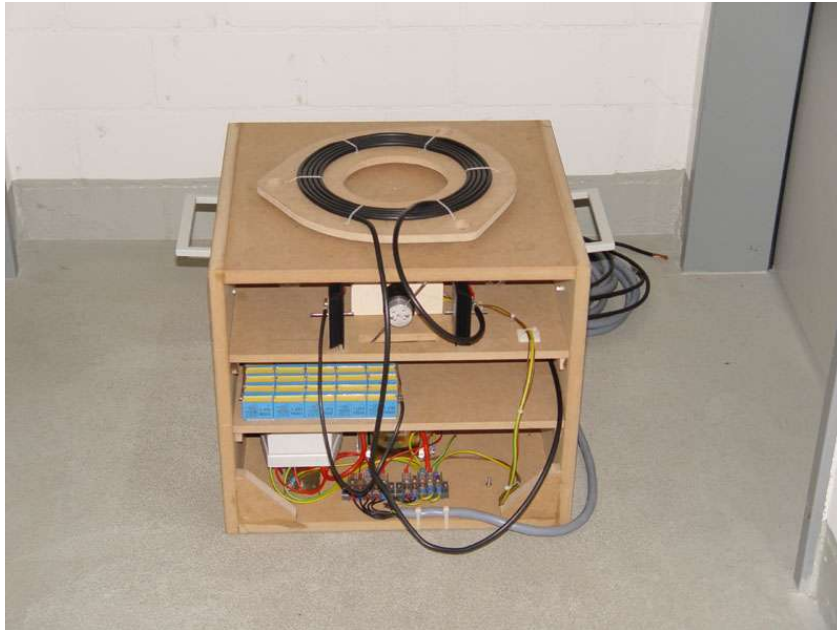


Abbildung 26 Ansicht hinten



Abbildung 27 Ansicht vorne

6. Betrieb der Anlage

6.1.Sicherheitshinweise

Achtung!

**Diese Anlage produziert lebensgefährlich hohe Spannungen!
Sie darf deshalb nur von autorisierten Personen in Betrieb genommen werden.
Vor Arbeiten an der Anlage ist die vollständige Entladung der Kondensatoren zu überprüfen.**

Um ein unbefugtes Einschalten zu verhindern kann der Not-Aus Knopf gedrückt werden. Dieser lässt sich nur mit dem Schlüssel entriegeln.

Es ist für genügend Freiraum um die Spule zu sorgen. Blitze die in elektrische Einrichtungen wie Leitungen, Lampen etc. einschlagen können Kurzschlüsse auslösen.

Der Schutzleiter der Steckdose darf auf keinen Fall als HV Erde verwendet werden! Die Induktivität der Leitungen führt bereits über wenige Meter zu grossen Spannungsabfällen.

Personen die einen Herzschrittmacher tragen sollten einen Abstand von min 8-10 m einhalten.

Nicht mit evakuierten Gefässen an der Spule experimentieren. (es könnte möglicherweise radioaktive Beta-Strahlung entstehen)

6.2.Aufbau

Der Hochspannungsteil ist so auszurichten, dass die Sicherheitsfunkenstrecke vom Operator aus gesehen werden kann. Rund um die Spule sollten auf jede Seite mindestens 2 m Freiraum vorhanden sein. Gegenpol auslegen oder Staberder einschlagen und anschliessen. Den Steuerteil auf eine geeignete Unterlage stellen und anschliessen. Idealerweise wird der Raum abgedunkelt oder draussen auf Sonnenuntergang gewartet. In der näheren Umgebung sollten sich keine empfindlichen elektronische Geräte befinden.

6.3.Betrieb

Einschalten:

- Not-aus mit Schlüssel lösen.
- Rotary einschalten. (Phasensteller ganz links)
- Phase einstellen auf eingezeichnete Markierung.
- HV einschalten.
- Spannung mit dem Variac langsam erhöhen.
- Mit dem Phasensteller kann die Funkenlänge optimiert werden.

Abschalten:

- Spannung mit dem Variac herunterfahren.
- HV Ausschalten
- Rotary abschalten
- Not-Aus drücken (damit kein Unbefugter die aufgebaute Anlage einschalten kann)
- Entladung der Kondensatoren überprüfen



7. Fazit und Ausblick

Die im Projektantrag geforderten Ziele wurden erreicht. Der finanzielle Aufwand konnte in vernünftigem Rahmen gehalten werden. (Der Aufbau besteht zu einem grossen Teil aus recyceltem Elektroschrott)

Für mich persönlich war die Arbeit insofern interessant und lehrreich, als dass sie nicht nur theoretischer Natur war, sondern auch mechanisch einige Herausforderungen gestellt hat.

Dadurch, dass das Meiste des benötigten Materials bereits zusammengetragen war, und eine Werkstatt mit Drehbank und Fräsmaschine zur Verfügung stand, konnte der Aufbau speditiv vonstatten gehen.

Mit der gebauten Teslaspule können spektakuläre Blitze mit bis zu 90cm Länge erzeugt werden.

Die Pspice Simulation ist ein sehr hilfreiches Hilfsmittel zur Auslegung einer Teslaspule. Mit Hilfe einer Simulation konnte der Spannungsverlaufes über dem Primärkondensator sehr präzise vorausgesagt werden.

Nach Abschluss dieser Arbeiten werde ich diesen Bericht und einige Bilder, die während den Arbeiten entstanden sind, im Internet veröffentlichen. URL: (www.trilobyte.ch/tesla)

8. Tagebuch

9. Anhang

Schema Sinusgenerator
Schema HSP Differential Probe
Wheeler Formeln
Medhurst Formel
Excelsheet mit Berechnungen
Messungen Res. Frequenzen
Datenblatt Lackdraht
Datenblatt Kondensatoren
Datenblatt HSP Trafo
Matlab Script Grafiken

10. Projektantrag