

UBTT – Funktion & Betrieb (Uni-Bern-Tesla-Twin)

Version 2 (Prototyp)

von

Kurt Schraner
April / Juni 2004

Anhang von **Urs Lauterburg**

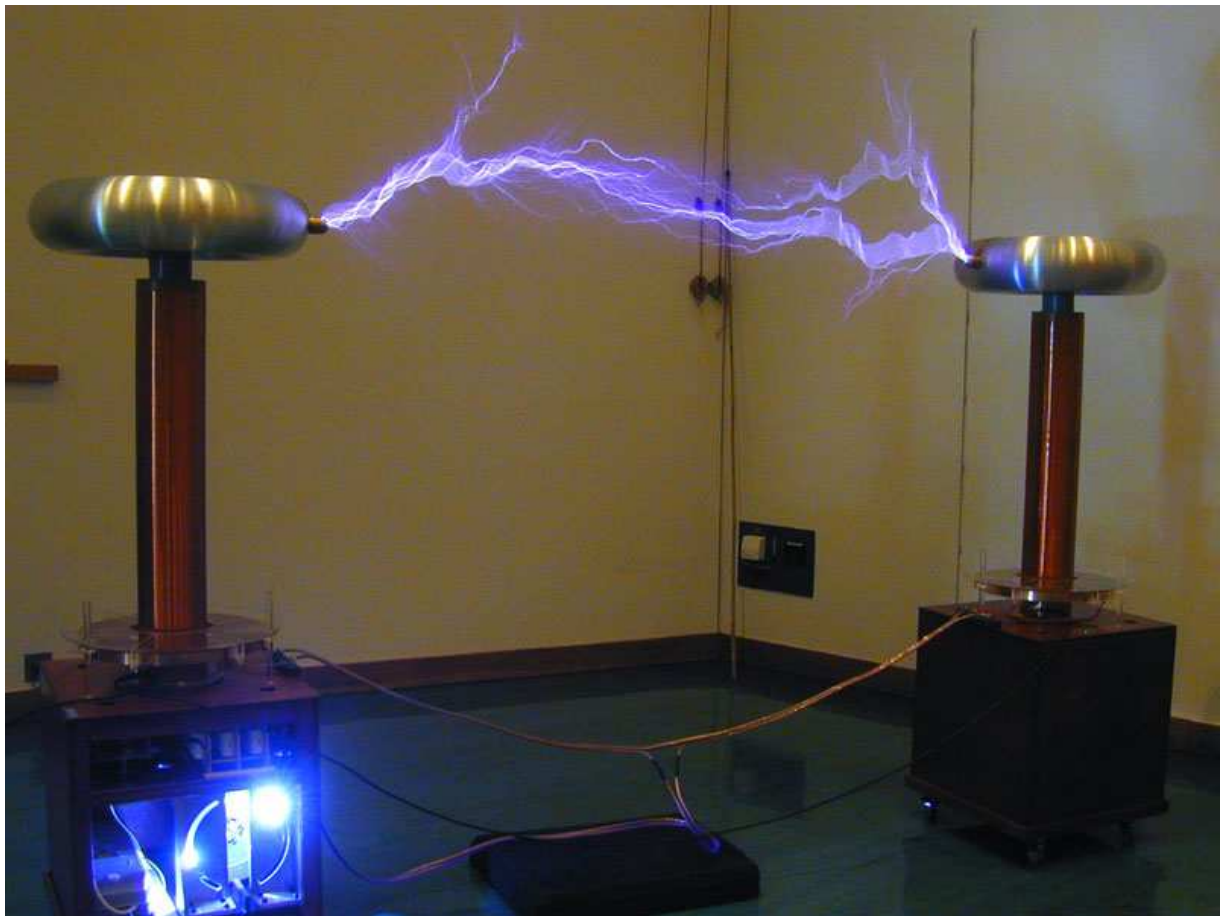


Bild: Twin-Teslatransformator in Aktion: Universität Bern, 18. September 2004

UBTT – Funktion & Betrieb

(Uni-Bern-Tesla-Twin)

Version 2 (Prototyp)

von

Kurt Schraner
April / Juni 2004

Anhang von **Urs Lauterburg**

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1.) Einleitung	2
2.) Funktionsweise	
2.1) HF Teil (eigentlicher Tesla-Transformator)	3
2.2) Energieversorgungsteil	5
3.) Kennen der UBTT Baueinheiten...	
3.1) Prinzipschema	6
3.2) Steuergerät	6
3.3) HV-Trafo: Neon-Reklame Trafo (NST= <u>N</u> eon <u>S</u> ign <u>T</u> ransformer)	7
3.4) Kickback- resp. NST Schutzfilter	8
3.5) Rotierende Funkenstrecke SRSG (<u>S</u> ynchronous <u>R</u> otary <u>S</u> park <u>G</u> ap)	9
3.6) Phasenschieber für Synchronmotor der SRSG	10
3.7) Kondensator: MMC (Multi-Mini-Capacitor)	11
3.8) Primärspule 1: PVC-isolierter 2.76 mm ϕ , Installationsdraht	12
Primärspule 2: Kupferband 20 x 0.5 mm	13
3.9) Sekundärspule	14
3.10) Toroid	15
3.11) Erdung	16
4.) „Single“- im Vergleich zum „Twin“ Betrieb / 2 Funkenbeispiele	17
5.) Sicherheit, EMV	18
6.) UBTT - Daten	19
6.1) Entwurf	19
6.2) Simulation	20
6.3) Messungen	22
7.) Literatur / Internet Links	26
8.) Anhang: Praktische Installation & Inbetriebnahme	27
8.1) Installation für Twin-Betrieb	27
8.2) Installation für Single-Betrieb	27
8.3) Inbetriebnahme der Teslaspulen	28

1.) Einleitung

Der grosse serbokroatisch-amerikanische Erfinder und Elektropionier

NIKOLA TESLA (1856 – 1943)

hat eine Vielfalt von Varianten seines Hochfrequenz-Resonanztransformators (im angelsächsischen Sprachraum „Tesla Coil“, oder kurz TC genannt) schon vor dem 20. Jahrhundert, etwa in den Jahren 1889 – 1899 erfunden und entwickelt [1]. Der Teslatransformator hat relativ bescheidene industrielle Anwendungen als Isolatorenprüfer oder auch als Apparat zur Teilchenbeschleunigung gefunden [2],[2a]. Apparate mit leichter reproduzier- und beherrschbaren Spannungsverläufen haben heute seine Stellung in diesen Bereichen eingenommen. Schon immer haben aber die spektakulären Entladungserscheinungen fasziniert, und das komplexe Verhalten das Interesse von physikalisch Interessierten angeregt. Und so erstaunt es wenig, wenn heute die TC's, vorherrschend im Show-Business („Special-Effects“ im Film [3], öffentliche Vorführungen [4]), zur Demonstration in Museen, und als Schulungsobjekte der Elektrizitätslehre, Verwendung finden. Und ausserdem sind sie Objekt des Interesses einer begrenzten Anzahl Hochspannungs-verrückter Spulenbauer („Coiler“), wovon deren etwa 1000 sich auch via Internet über die einschlägigen Probleme austauschen [5], und eine gewisse Fortentwicklung des über 100 jährigen Objekts betreiben, etwa in Richtung besseres Verständnis[6,7], längere „Blitze“[8,9], andere Arten des Betriebes und der Energieversorgung (z.B. CW, oder Energie direkt ab Netz / ohne HV-Trafo...Solidstate Coils; Tube Coils).

Die UBTT ist eine klassische Tesla-Spule (- d.h. mit Funkenstrecke -) bescheidener Leistung (~ 1kW), zeitgemässen Entwurfes für lange Funken (relativ zur Leistung). Ein Prototyp wurde von Kurt Schraner für die Demonstration im Physikunterricht und in Museen konzipiert und gebaut. Die UBTT wird g.g.F. von Lehrlingen des Physikalischen Instituts der Universität Bern, auf Bestellung, in Kleinstauflage hergestellt. Auch bei der Herstellung des Prototypen wurden von den Werkstätten der Uni Bern wichtige mechanische Arbeiten hilfreich übernommen.



Klassische TC's geben, bei vergleichbarem Leistungsinput, immer noch längere Entladungen als ihre Röhren- oder Halbleitervarianten. Zu erschwinglichen Preisen gibt es noch kein Schaltelement, welches die Eigenschaften einer Funkenstrecke, - schalten bei Spannungen von 10 bis 30kV, mit Strömen von vielen 100A ermöglicht, obwohl gewaltige Fortschritte in der Halbleitertechnik (z.B. IGBT's) gemacht werden. Diese Aussage wird wohl schon bald relativiert werden müssen, denn gerade heute (=Anfang 2004) werden mit SSTC's (=Solid-State TC's) wesentliche Fortschritte gemacht.

2.) Funktionsweise

2.1) HF Teil (eigentlicher Tesla-Transformator)

Figures/Concepts: „borrowed“ from **Richie Burnett**'s website: <http://www.richieburnett.co.uk>
 Diese Website erklärt den Tesla-Trafo viel besser und ausführlicher: **sehr empfehlenswert!**

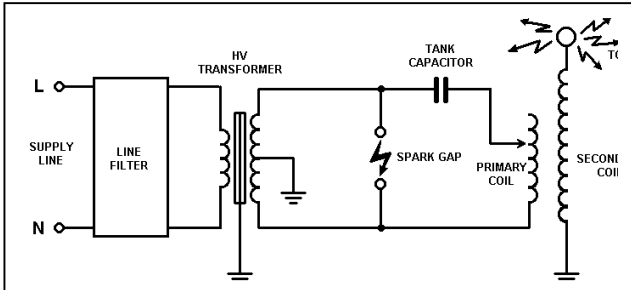


Fig.1

Klassische Grundschaltung eines Tesla Transformators. Der HV Trafo operiert mit 50Hz Netzfrequenz und z.B.16kV, und hat eine grosse magnetische Streuung, auf welche wir unten noch zu sprechen kommen. Der eigentliche Teslatrafo besteht aus 2 lose ($k=10-20\%$) gekoppelten Schwingkreisen, die auf die gleiche Frequenz abgestimmt sind. Im sekundären Kreis, dessen Kapazität aus jener der Topelektrode und der Spulen-Eigenkapazität besteht, entsteht die hohe Spannung: Einige 100kV, bei höherer Frequenz von einigen 100kHz. Eine Funkenstrecke (FS) dient als wichtiges Schaltelement.

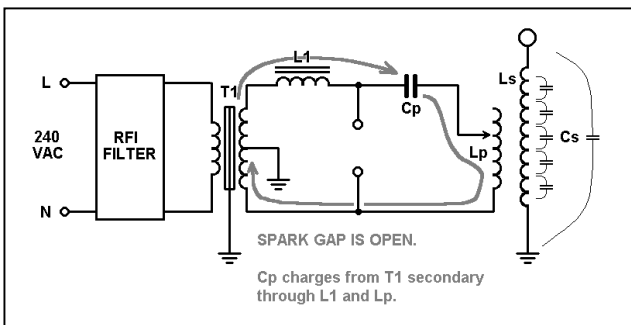


Fig.2

1.) Laden des Kondensators Cp.

Die Funkenstrecke ist offen, und der Kondensator wird via die Streuinduktivität L1, welche hier separat dargestellt ist, und via Lp aufgeladen. (der Zeitrahmen dieser Aufladung ist in der Grössenordnung [ms]; sie kann g.g.F. während einer 50Hz Halbwelle auch mehr als einmal stattfinden.). Die Ladeströme sind in der Grössenordnung einige 10mA bis wenige A.(bei TC's grosser Leistung)

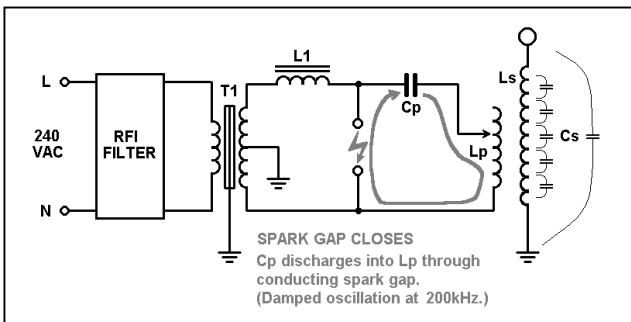


Fig.3

2.) Zündung Funkenstrecke/Cp Entladestart

Wenn die Spannung an Cp genügend hoch ist, bricht der Luftwiderstand in der Funkenstrecke, infolge des hohen E-Feldes zusammen, und sie bildet dann einen guten Leiter. Cp beginnt sich, wie angedeutet, in einer gedämpften HF-Schwingung zu entladen, $f = 1/[2\pi \cdot \sqrt{Lp \cdot Cp}]$. Die hohen Ströme in Lp [einige 100...1000A] beginnen aber, durch die magnetische Kopplung, auch in Ls einen entsprechenden Strom zu induzieren.

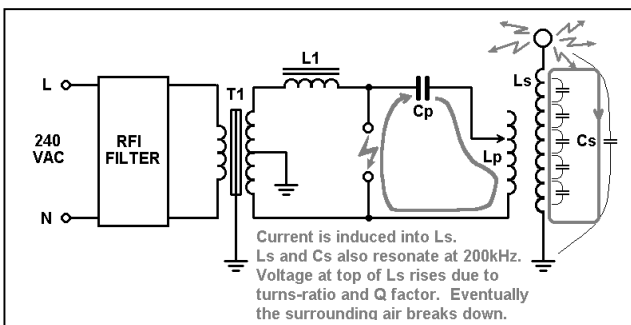
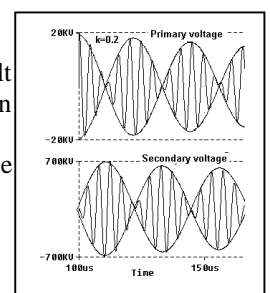


Fig.4

3.) Energietransfer Primär <-> Sekundär

Die Energie $E_p = (1/2) \cdot C_p \cdot U_p^2$, welche durch Aufladung in Cp gespeichert war, wird, im Laufe mehrerer HF-Schwingungen, vollständig in den Sekundärkreis übertragen (abgesehen von realen Verlusten. [Zeitbedarf: einige 10us]). Die hierbei auftretende Kurvenform einer Schwebung ist, analog, aus der Bewegung zweier gekoppelter Pendel bekannt:

Solange die FS zündet, pendelt die Energie auch wieder in den Primärkreis zurück, usw., - hin und her -, bis alle Energie in Verluste überführt ist,



oder die FS löscht. Diese Vorgänge sind jedoch nur ungestört, wie beschrieben, bis an der Top-Elektrode der Sekundärspule Funken auszubrechen beginnen (siehe Anmerkung unten).

Je nach Kopplungsfaktor k ist die Periodendauer der Schwebungshüllkurve kurz ($\rightarrow k$ hoch) oder lang ($\rightarrow k$ tief). Das Löschen der FS findet natürlich bevorzugt in einem Schwebungsknoten des Primärsystems statt, jedoch kaum im ersten Durchgang, sondern erst etwa im 2. bis 4., da vorher noch zuviel erhitzte und ionisierte Luft in der FS vorhanden ist (\rightarrow man spricht von 1st, 2nd, 3rd... Primary Notch Quenching).

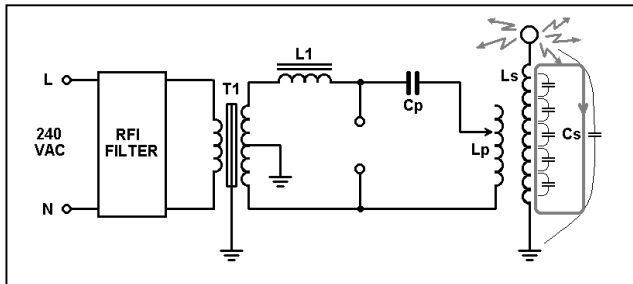
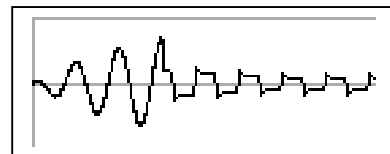
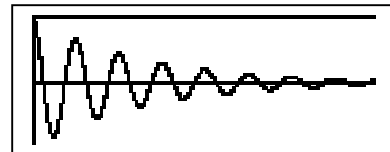


Fig.5

Anmerkung:

Die Kurvenform der Sekundärspannung ändert sich drastisch, sobald die Funken an der Topelektrode ausbrechen. Dieser Ausbruch, der natürlich schon beim ersten Energietransfer stattfindet, stellt denn auch sofort eine wesentliche Energieabfuhr aus dem System dar, und hilft somit einem (- willkommen! -) raschen Löschen der Primärfunkenstrecke.



Wie entsteht nun die sehr hohe Sekundärspannung?... wenige Physikformeln helfen:

Die extreme Spannungssteigerung des klassischen Teslatrafos stammt aus der Tatsache, dass die Energie des grossen Primärkondensators in die vergleichsweise geringe Streu- + Topkapazität des Sekundärkreises übertragen wird (... eine Art parametrischen Pumpens). Die Energie im geladenen Primärkondensator ist:

$$E_p = 0.5 C_p U_p^2$$

Beispiel ~UBTT: $C_p = 30\text{nF}$; $U_p = 21\text{kV} \rightarrow E_p = 0.5 \times 30\text{nF} \times (21\text{kV})^2 = 6.615 \text{ Joules}$

Wenn wir verlustlose Übertragung dieser Energie in die Sekundärspule annehmen, wird gemäss Energieerhaltungssatz diese Energie schliesslich in der sekundären Kapazität C_s landen, welche sehr gering ist (einige 10pF). Für $E_s (= E_p)$ können wir wiederum schreiben:

$$E_s = 0.5 C_s U_s^2$$

oder umgestellt, und z.B. $C_s = 30\text{pF}$; $E = 6.615\text{J}$ eingesetzt:

$$U_s^2 = E_s / (0.5 C_s)$$

$$U_s^2 = 6.615 / (0.5 \times 30\text{pF})$$

$$\underline{U_s = 664 \text{ kV} !}$$

Dieser Theoretische Spannungsgewinn des Teslatrafo kann auch durch das Kapazitätsverhältnis ausgedrückt werden als

$$\underline{(U_s/U_p) = \text{sqrt}(C_p/C_s)}$$

...oder durch das Induktivitätsverhältnis, da die Resonanzfrequenzen für Primär- und Sekundärkreis übereinstimmen müssen:

$$L_p C_p = L_s C_s \quad \text{oder} \rightarrow (C_p/C_s) = (L_s/L_p) \quad \text{und damit:}$$

$$\underline{(U_s/U_p) = \text{sqrt}(L_s/L_p)}$$

In der Praxis wird dieser theoretische Maximalwert durch diverse Verluste etwa auf die Hälfte bis max. ~70% reduziert. Verluste: Primär-, Funkenstrecken-, Sekundär-, Korona-+Funken- und Radio-Abstrahlungsverluste.

4.) Ausklingen in der Sekundärspule.

Nachdem die Energie einige Male zwischen Primär- und Sekundärkreis hin- und hergeschwappt ist, wird sie infolge der Verluste genügend klein, dass die FS abkühlt. Sie wird in einem Primär-Stromknoten aufhören zu leiten. Alle übrigbleibende Energie bleibt nun „gefangen“ im Sekundärkreis. Die hier verbliebene Energie klingt nun in einer gedämpften Schwingung exponentiell aus.

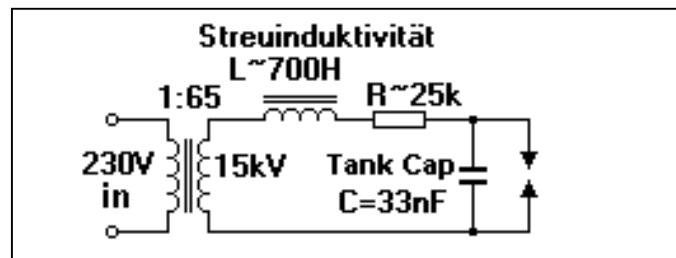
2.2) Energieversorgungsteil

Die Energieversorgung der TC erfolgt über das normale 230V/50Hz Wechselstromnetz via eine mittlere Hochspannung von 15kVeff, die vom NST (Neontrafo) geliefert wird. Die Streuinduktivität des NST wirkt dabei, geschaltet durch die 50Hz-synchrone Funkenstrecke, in komplexer Weise mit dem Primärkondensator zusammen. Es sind 2 Effekte, die für den Lade-/Entladezyklus des Primärkondensators(=Cap) zu berücksichtigen sind:

- Die potentielle Netzfrequenz(50Hz)-Resonanz des Systems „Streuinduktivität / Cap“
- Der sog. „induktive Kick“, den die Streuinduktivität beim Schalten durch die FS an den Cap abgeben kann

Natürlich ist es möglich, dass sich beide Effekte überlagern.

Die Ladeschaltung kann wie folgt , im Ersatzschaltbild, dargestellt werden (-ohne HF Teil der TC-):



Wenn wir den NST als Spannungsquelle betrachten, haben wir hier einen Serieschwingkreis, bestehend aus Streuinduktivität, Widerstand und Tank Cap (=Primärkond. Der TC). Dessen Eigen-Resonanzfrequenz liegt in der Größenordnung der Netzfrequenz (hier konkret: 33Hz). Wenn man einen Tank Cap gewählt hätte, der genau den 50Hz Netzfrequenz entspräche (=12.7nF), würde die resonant überhöhte Spannung an ihm bis zu 146kV betragen, was zu dessen Zerstörung, sowohl als auch des NST führen würde, wenn keine Schutzfunkenstrecke parallel zum Cap vorhanden wäre. Ein Cap von 33nF führt aber nur noch zu ca. 9.3kV (13.2kV peak). Dies, unter Voraussetzung linearer Elemente, insbesondere aber konstanter Streuinduktivität, sowie ungeschaltet sinusförmiger Erregung des Systems.

Unabhängig vom Einfluss der 50Hz Resonanz zeigt sich aber , dass wenn man den Cap periodisch, durch die Funkenstrecke der TC, entlädt, und dies in synchronem Rhythmus zu den 50Hz tut, die Energie, die im Feld der Streuinduktivität gespeichert ist, dennoch eine zusätzliche Ladung erbringt (sog. „Induktiver Kick“). Durch Simulation des synchron geschalteten Systems kann man zeigen, dass auch ein etwa 2.6 Mal grösserer, als der resonante Cap, auf die vollen 21kVpeak der 15kVrms Spannung geladen werden kann.

Des weiteren wurde beobachtet, dass die Streuinduktivität nicht konstant bleibt, da die magnetischen Shunts des NST, welche verantwortlich für diese Grösse sind, teilweise in Sättigung gehen, wenn der NST in der beschriebenen, unvorhergesehen „stressigen“ Weise betrieben wird. Sie nimmt ab, Quantitatives dazu ist lediglich im Vergleich von (-linear-)simuliertem zu tatsächlichem Leistungsverhalten bekannt: Während die simulierte Netzleistung der UBTT etwa 900W beträgt, ist die gemessene 1300W und evtl. mehr, soweit es der HF Teil der TC verträgt – je nach Zündzeitpunkt der synchronen Funkenstrecke. Durch die Abnahme der Streuinduktivität nähert sich das Lade-LC System auch wieder der 50Hz Resonanz an, und es ergibt sich wahrscheinlich eine Wechselwirkung der beiden wichtigen Ladeeffekte.

Wer sich detaillierter über die nur scheinbar so einfache Ladeschaltung des Primärkondensators informieren möchte, sollte es nicht versäumen, die ausführlichere Behandlung der Vorgänge auf Richie Burnett's Website anzuschauen:

<http://www.richieburnett.co.uk/resonant.html#resonant>

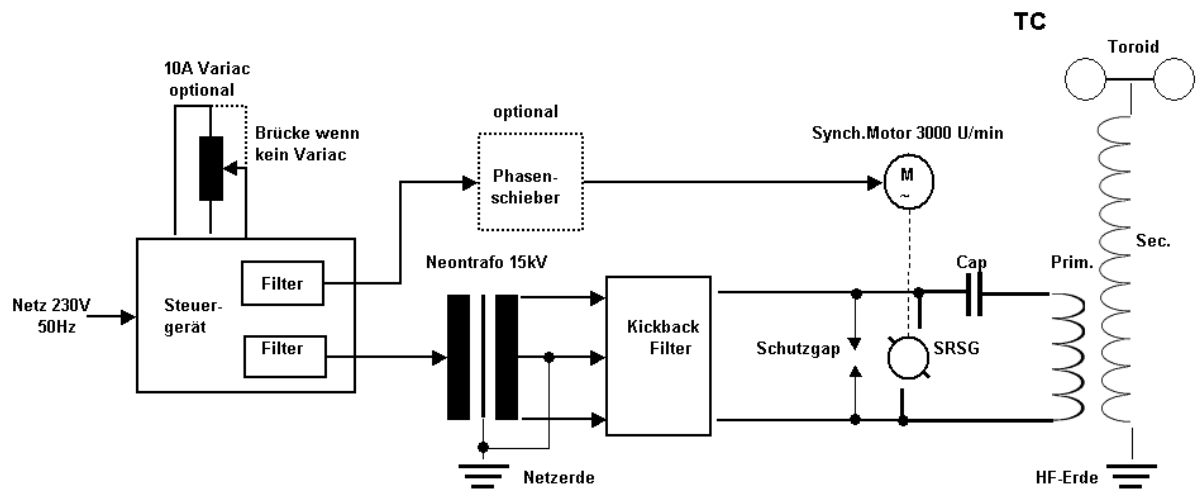
<http://www.richieburnett.co.uk/indkick.html#kick>

...hier werden die „linearen“ Verhältnisse in verständlichem Detail behandelt, während der Einfluss von Sättigungseffekten des NST, sowie die hierdurch mögliche kombinierte Wirkung von „Resonanz“ und „Kickeffekt“ noch unberücksichtigt bleiben.

Um die Darstellung der Primär-Cap Ladeverhältnisse einer Funkenstrecken betriebenen, Streufeld-Trafo gespeisten TC nicht zu sehr ausufern zu lassen, habe ich mich hier auf eine grobe Umrisskizze beschränkt.

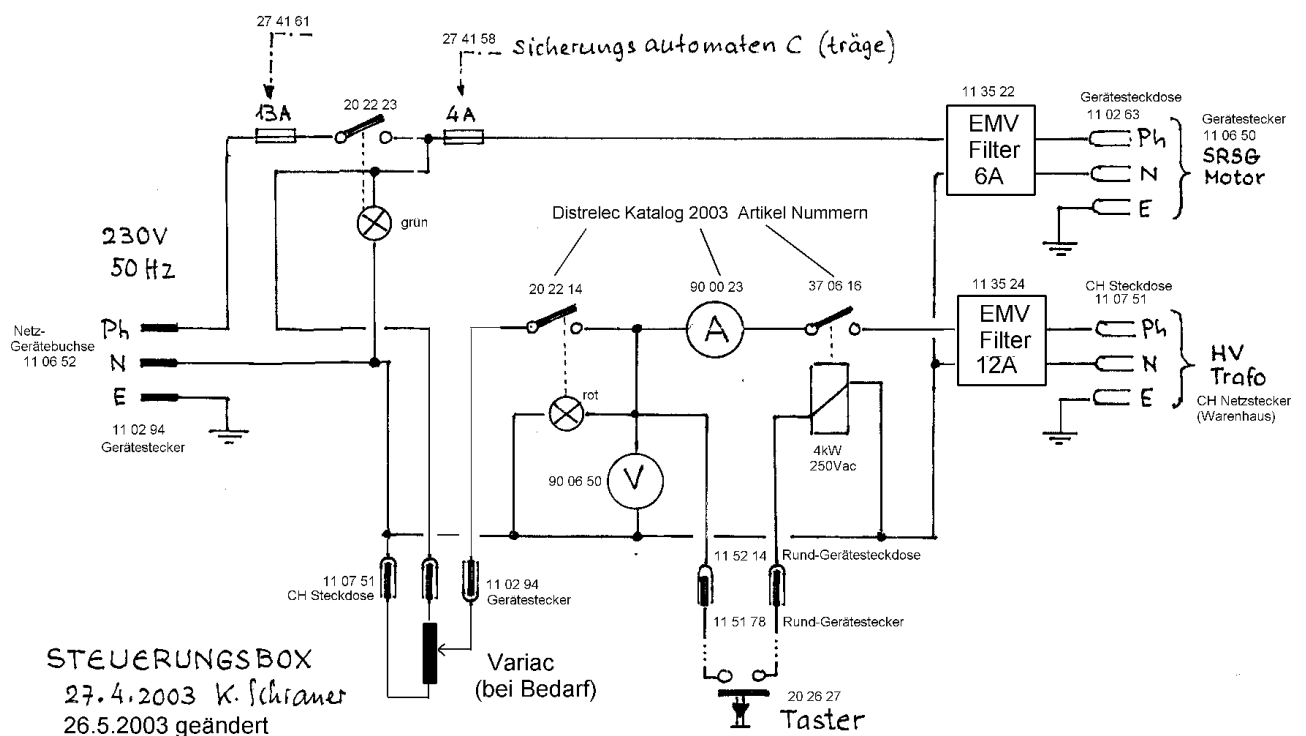
3.) Kennen der UBTT Baueinheiten...

3.1) Prinzipschema



3.2) Steuergerät

Das Prinzipschema zeigt die Zusammenschaltung der UBTT Hauptelemente. Das Steuergerät dient der sachgemässen und bequemen Zuschaltung der Elemente und der Messung von Spannung und Strom zum Hochspannungstrafo. Das Schaltschema des Steuergerätes:



Zwangsläufig wird der Synchronmotor der rotierenden Funkenstrecke zuerst eingeschaltet (grün). Betätigung des zweiten Schalters (rot) lässt die Ablesung der (Netz-) Speisespannung am Voltmeter zu. Die Möglichkeit ist vorgesehen, am Steuergerät einen Regeltrafo (Variac) zuzuschalten, welcher den Betrieb mit reduzierter oder leicht erhöhter Spannung ermöglicht. Bei dessen Fehlen werden die Anschlüsse zwischen „Phase“ und „Abgriff“ überbrückt. Mittels Taster kann die TC in Aktion gesetzt werden, und der bezogene Effektivstrom am Ampèremeter abgelesen werden. Gefilterte Ausgänge sollen die TC generierten (HF-) Störungen ins 50Hz Netz reduzieren, um andere dort angeschlossene Geräte und Apparate nicht ungünstig zu beeinflussen.

das Steuergerät sieht wie folgt aus:



3.3) HV-Trafo: Neon-Reklame Trafo (NST=Neon Sign Transformer)

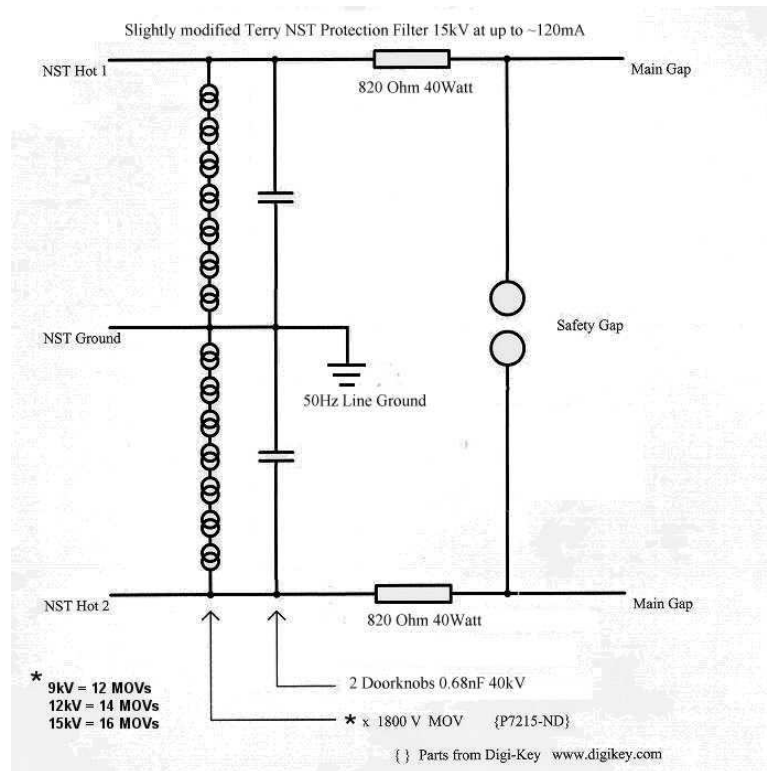
Im Hauptstrang des Prinzipschemas weitergehend, finden wir nun die Hochspannungs Energieversorgungsquelle der TC, welche durch einen Neonreklame Transformator von $2 \times 7.5\text{kV} = 15\text{kV}$, mit 60mA Kurzschlussstrom gegeben ist. Es ist ein Trafo der italienischen Firma FART, welcher für den fernen Osten produziert, und in Europa normalerweise nicht geliefert wird. Wesentlich: Er ist ein Streufeldtrafo! Die Streuinduktivität ist funktional wichtiges Element im Ladeverfahren des TC Primär-Tank-Kondensators (siehe Funktionsweise 2.2).



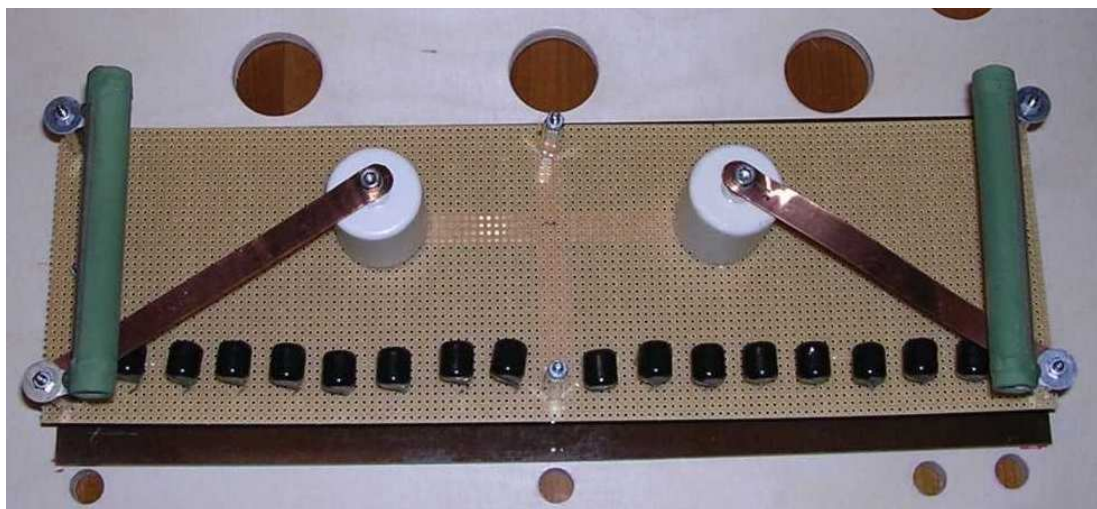
Das nachfolgende Kickback-Filter soll einerseits diesen Trafo vor HF Schwingungen, welche in breitem Spektrum durch die Funkenstrecke entstehen, schützen, andererseits auch mithelfen, diese Schwingungen vom 50Hz Netz fernzuhalten.

3.4) Kickback- resp. NST Schutzfilter

Es wird ein sogenanntes „Terry-Filter“ verwendet, dessen Schaltschema folgt:



Die Schutzfunkenstrecke, welche in die synchron zum 50Hz Netz rotierende Haupt-Funkenstrecke integriert ist, verhindert, dass sich unvorhergesehene Überspannungen (durch Fehlzündung, FehlAbstimmung, fehlerhafte Rotary-Einstellung) auf den vorhergehenden Energieversorgungssteil auswirken können. Die MOV's (Metalloxid Varistoren) sind (sozusagen, analog Stossdämpfern eines Autos), Elemente, die Spannungsspitzen aufnehmen können, und als "letzter Schutz" den NST vor diesen Spitzen schützen sollen. Die Idee ist auch: besser einige MOV's zu verlieren, als den NST (MOV's schliessen im Dauer-Überlastungsfall kurz). Dadurch, dass sie fest installiert sind, schützen sie den NST auch dann, wenn der Betreiber die Schutzfunkenstrecke zu sehr geöffnet hätte. Hier ein Bild des Filters (ohne Schutzfunkenstrecke, die im Rotary-Gap integriert ist):

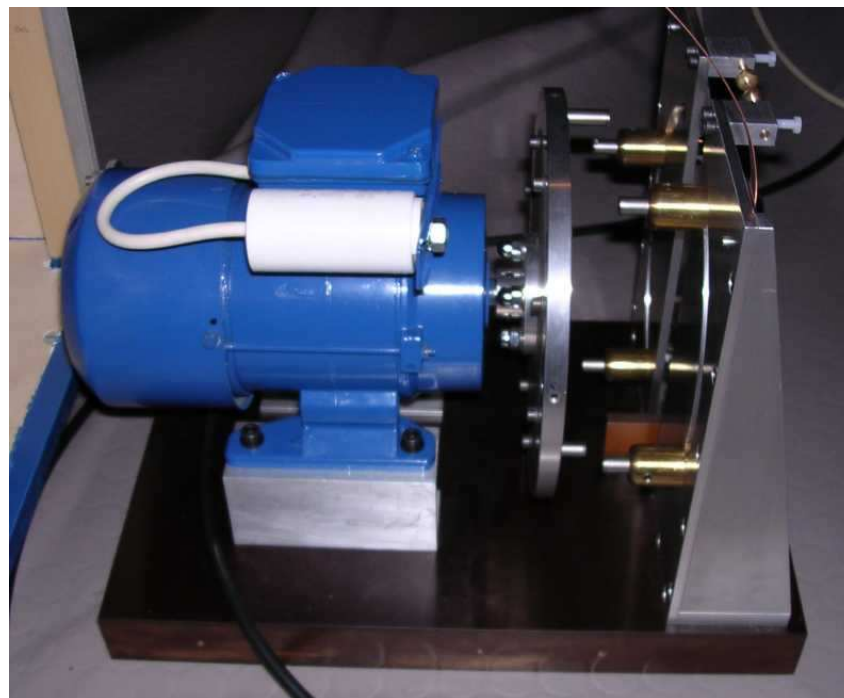
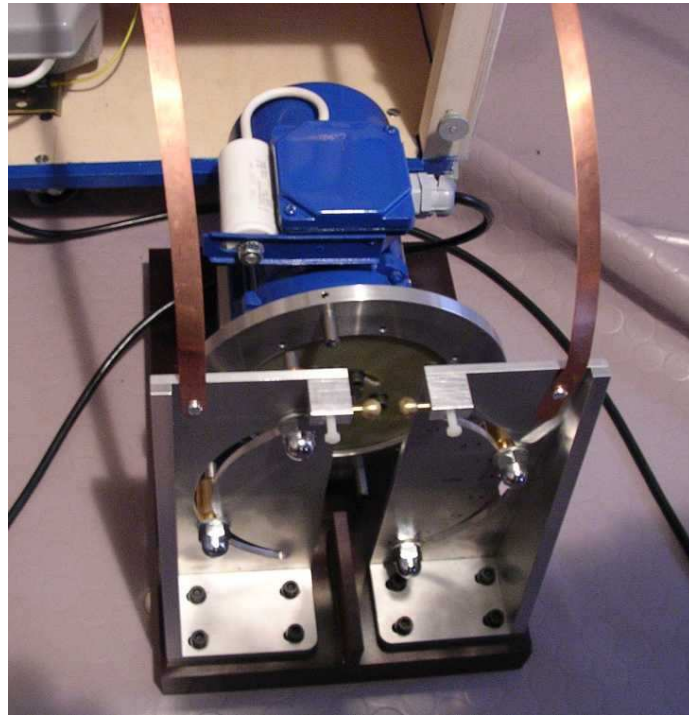


Mehr zur Entwicklung und Begründung des Filters kann auf **Terry Fritz's** Website nachgelesen werden:

- <http://hot-streamer.com/TeslaCoils/MyPapers/rcfilter/rcfilter.html>
- <http://hot-streamer.com/TeslaCoils/MyPapers/rlcfilter/rlcfilter.html>
- <http://hot-streamer.com/TeslaCoils/MyPapers/primarycircuits/pricir.html>
- <http://hot-streamer.com/TeslaCoils/MyPapers/modact/modact.html>
- <http://hot-streamer.com/TeslaCoils/MyPapers/NSTWindingStress/NSTWindingStress.html>
- <http://hot-streamer.com/TeslaCoils/Misc/NSTFilt.jpg>

3.5) Rotierende Funkenstrecke SRSG (Synchronous Rotary Spark Gap)

Die UBTT ist mit einer sehr leistungsfähigen rotierenden Funkenstrecke ausgestattet, die auch noch für TC's höherer Leistung (bis etwa 10kW) genügen würde. Für die UBTT wird sie mit je einem rotierendem und einem stationärem Wolframelektrodenpaar betrieben, was zu je einer Zündung pro Halbwelle des 50Hz Netzes führt, da der Synchronmotor mit 3000 U/min dreht. Es ergeben sich also 100 Zündungen pro Sekunde, oder, wie die Coiler sagen BPS=100 (BPS=Breaks Per Second). Die Rotary könnte auch mit 2 oder gar 3 Zündungen pro Halbwelle arbeiten (BPS=200 oder 300), wenn man die weiteren stationären Elektrodenpaare montiert. Die Konstruktion erlaubt es, ungleichmässig über die Netz-Periode verteilte Zündwinkel einzustellen, wie sie sich aus Simulationsergebnissen von TC's empfehlen lassen (siehe auch [7]), Konstruktionsidee nach Finn Hammer [10], Variante Kurt Schraner [11], ausgeführt nach Konstuktion + Autocad-Zeichnung von Stefan Bauer [12]).



Die Bilder zeigen die Rotary mit 4 stationären + 2 rotierenden Elektroden, was für BPS=200 wäre. In der UBTT werden nur 2 stationäre Elektroden, für BPS=100, eingesetzt. Oben an den Festelektrodenhaltern ist auch die Schutzfunkenstrecke, bestehend aus 2 Messingkugeln, Durchmesser 5mm, zu erkennen.

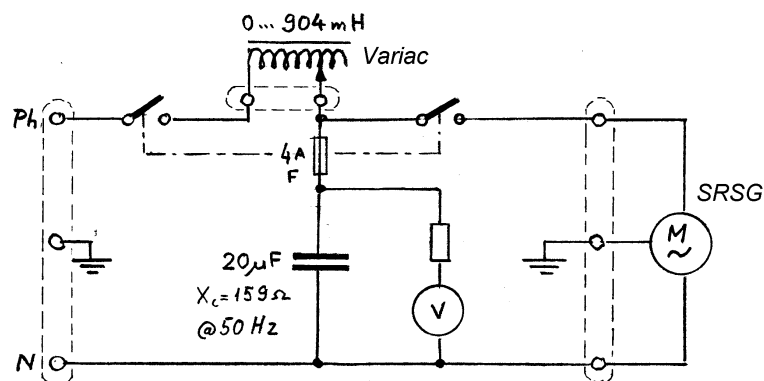
3.6) Phasenschieber für Synchronmotor der SRSG

OPTIONAL !

Wenn die TC auf maximale Funkenlänge optimiert werden soll, kann es vorteilhaft sein, nebst dem 10A Variac zur Speisung, auch einen Phasenschieber zur elektrischen Einstellung des Zündwinkels der (50Hz-) synchronen rotierenden Funkenstrecke zu verwenden. Dieser ist im Prinzipschema gestrichelt angedeutet. Wie dort angedeutet ist die Verwendung dieser Elemente, für den brauchbaren Betrieb der UBTT nicht notwendig, und sie sind deshalb auch nur auf speziellen Wunsch im UBTT-Set enthalten. Der Phasenschieber für SRSG's ist eine Erfindung von John Freau [9].

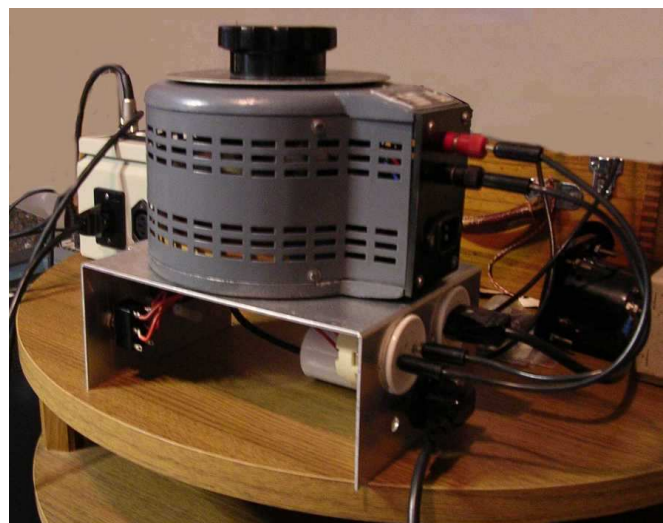
23.10.03 / JF

PHASENSCHIEBER für SRSG



Für den Aufstart Variac auf min. Induktivität setzen!
 Achtung: $f_{res} = 37.4 \text{ Hz}$ bei max Induktivität, d.h.
 Resonanz bei 50 Hz ist innerhalb des L-Bereiches.
 NIE OHNE ANGESCHLOSSENEN MOTOR BETREIBEN !

Der Phasenschieber erlaubt es, den Zündwinkel der synchronen Funkenstrecke, entlang der Sinusform des 50Hz Netzes, im Betrieb der TC, *live* zu justieren. Optimale Funkenleistung kann damit eingestellt werden. Um mechanische Schläge auf den Motor zu verhindern, ist die Doppel-Ausschaltung desselben, wie im Schema eingezeichnet, wichtig. Die flinke 4A Sicherung schaltet den Kondensator ab, bevor "resonante Katastrophen" mit dem Phasenschieber passieren können. Mit den eingetragenen Werten, und bei angeschlossenem Motor, führt der Phasenschieber nicht zu Spannungsüberhöhungen an demselben, sondern nur zu reduzierter Spannung, was gut für die Reduktion der Erwärmung des Motors ist. Ein Phasenschieber wurde wie abgebildet realisiert:



3.7) Kondensator: MMC (Multi-Mini-Capacitor)

Der Primärkondensator besteht aus einer Serie-Parallel-Matrix von Polypropylen-isolierten Pulscondensatoren (~"Snubber Caps"). Die Entwicklung dieser sogenannten MMC's wurde erst in den letzten Jahren, v.a. durch Reinhard W. Buchner und Terry Fritz vorangetrieben. Während eine Parallelschaltung von mehreren Strängen seriegelagerter Kleinkondensatoren trivial erscheint, ist die Auswahl der geeigneten Kleinkondensatoren, für unseren Zweck, nicht ganz selbstverständlich. Diese müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Pulsfestigkeit, d.h. die Anschlüsse müssen hohe Spitzenströme vertragen
(nicht zu hohe Serieinduktivität für schnelle Entladung)
- Spannungsfestigkeit, damit nicht zu viele Serielemente benötigt werden
(möglichst auch gute Festigkeit gegen Spannungs-Reversierung und Koronaschäden. Selbstheilung)
- Geringer Verlustfaktor, damit die Erwärmung sich in Grenzen hält, und wegen geringem Leistungsverlust.

Es hat sich gezeigt, dass Polypropylen „extended Foil“ Kondensatoren, wie sie in der Leistungselektronik von Schaltnetzteilen verwendet werden, diesen Anforderungen zu genügen vermögen (z.B. Snubber Caps). Hinzu kommen ökonomische Kriterien, welche die Caps erfüllen müssen, um der ewig geizenden Coiler-Gemeinde erschwingliche MMC's zu ermöglichen. Durch ausführliche praktische Tests hat sich dann eine Reihe von geeigneten Caps, sowie eine Dimensioniermethode herausgeschält, die unter

<http://hot-streamer.com/TeslaCoils/MMCInfo/mmcinfo.htm>
<http://hot-streamer.com/TeslaCoils/MMCInfo/good-bad.txt>

eingesehen werden kann.

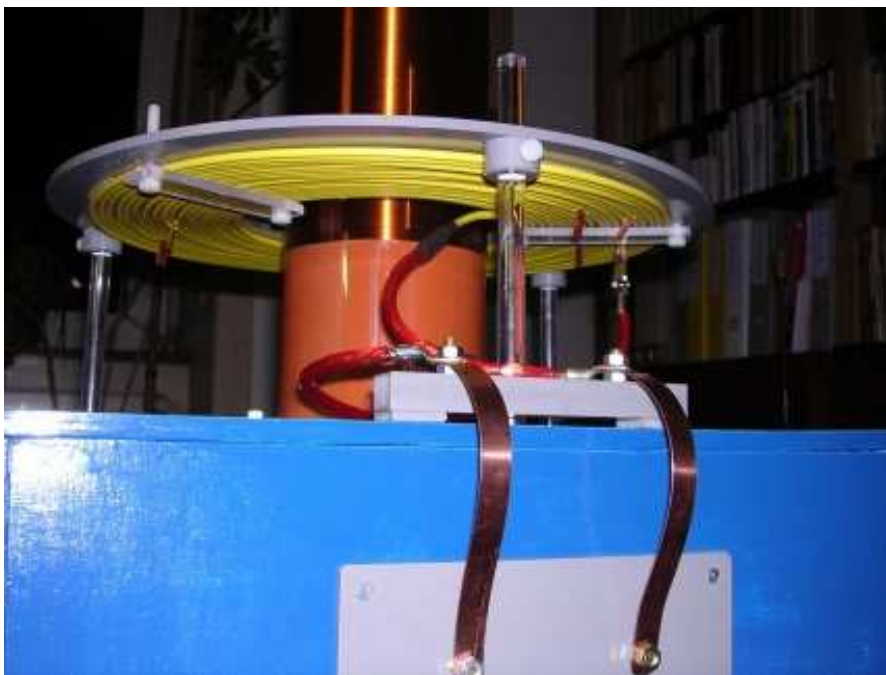
Unser UBTT MMC besteht aus 2 Reihen à 12 seriegelagerter 150nF/2000V + 1 Reihe à 12 seriegelagerter 100nF/2000V Cornell Dubilier Kondensatoren, mit einer Gesamtkapazität von 33.3nF, und sieht wie folgt aus:



Über jedem Cap ist noch ein Bleeder-Widerstand von 39Mohm eingelötet, um sicherzugehen, dass sich die gefährliche Hochspannung nach Ausschaltung der TC in kurzer Zeit abbaut. (Zeitkonstante der Entladung: $39M \cdot 150nF = 5.85s \rightarrow$ Cap gefahrlos nach ca. 30s). Im Normalfall wird der MMC allerdings via den angeschlossenen HV-Trafo sofort entladen.

3.8) Primärspule 1: PVC Draht (erste Version, auf welcher auch die Berechnungen basieren)

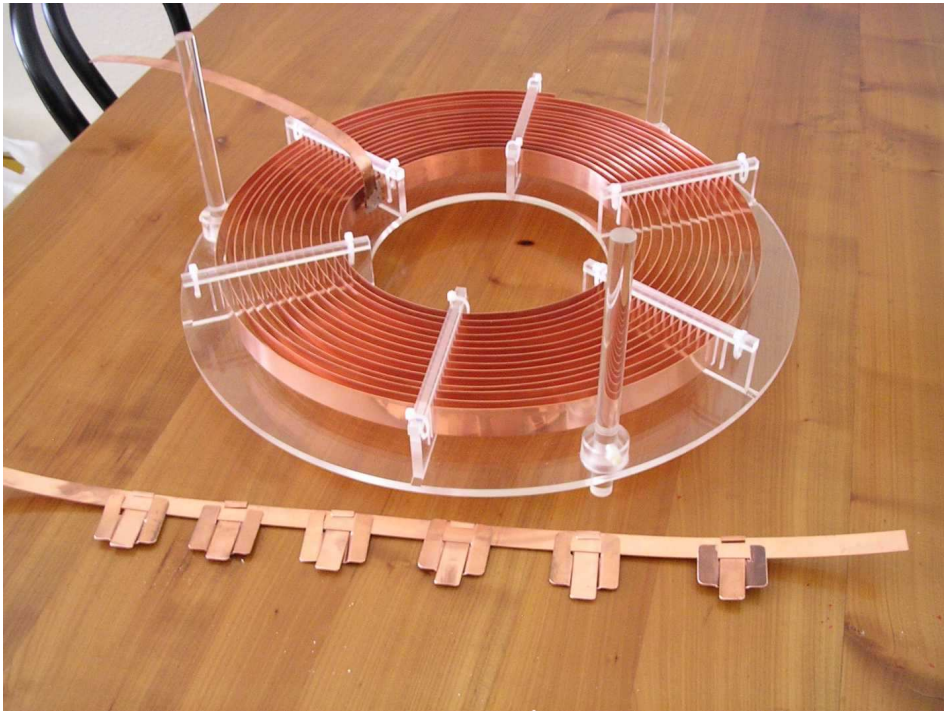
Die Primärspule wurde mit einer für TC's relativ grossen Induktivität ausgelegt, aber so, dass sie dennoch nicht einen zu grossen Durchmesser ergibt, um Überschlüge vom Oberende der TC auf die Primärspule durch gute Gestaltung des elektrischen Feldes zu minimieren. Grosse Induktivität ist erwünscht, weil dadurch die Primärkreis Impedanz $Z_{\text{prim}} = \sqrt{L_{\text{prim}}/C_{\text{prim}}}$ erhöht wird, und damit der Primärstrom, der seinerseits einen Hauptverlust, als $I^2 \cdot R$ über der Funkenstrecke, ins System einbringt, erniedrigt wird. (In unserem Fall z.B. $L_{\text{prim}}=57.6\mu\text{H}$; $C_{\text{prim}}=33.3\mu\text{F} \rightarrow Z_{\text{prim}}=41.6 \text{ Ohm}$; mit $V_{\text{prim}}=21\text{kV}(\text{peak}) \rightarrow I_{\text{prim}}=510\text{A}(\text{peak})$. Bei angenommenem Gap-Widerstand von 2 Ohm \rightarrow Verlust=520kW(peak)...um eine Grössenordnung zu haben). Der Gap ist die Haupt-Verlustquelle einer klassischen TC! Diese Gesichtspunkte führten dazu, dass die 18 Windungen der Primärspule, nicht aus dem öfter verwendeten 6mm ϕ Kupferrohr gemacht wurde, sondern mit PVC-isoliertem, 2.76 mm ϕ , Installationsdraht, der kompakt auf die Unterseite einer PVC-Ring-Plattform aufgebracht ist, wie folgende beiden Bilder zeigen:



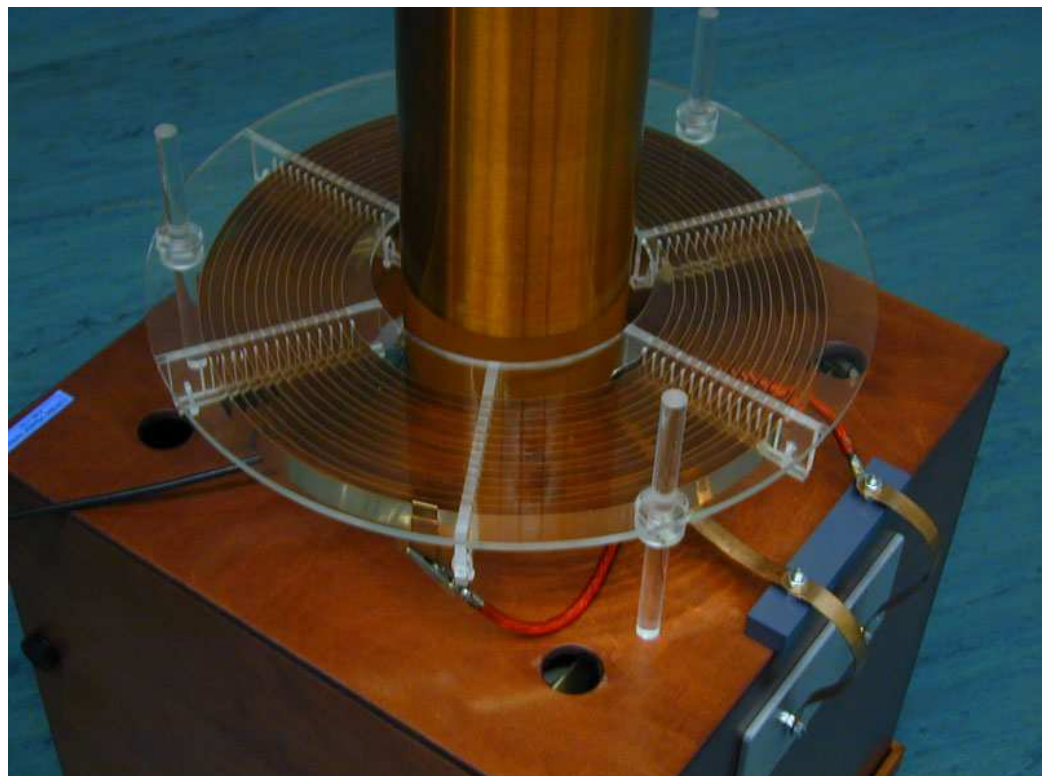
Das obere Bild zeigt auch, wie die Primärspule so konstruiert ist, dass sie in der Höhe, relativ zur Sekundärspule verstellt werden kann \rightarrow Veränderung der Kopplung. Im unteren Bild erkennt man die Abgriffe, welche eine Anpassung der Primärinduktivität, zwecks Resonanzabstimmung ermöglichen.

Primärspule 2: Kupfer-Flachband (Verbesserung elektrisch und ästhetisch)

Weil obige PVC-Drahtspule für eine Demonstrations-TC nicht so anschaulich und ästhetisch weniger befriedigend ist, wurde eine Spule mit 20 x 0.5mm Flachkupferband-Leiter entworfen und gefertigt. Diese ist nicht nur schöner, sondern weist auch geringere ohm'sche Verluste auf, was sich vorteilhaft auf die Funktion der TC auswirkt: kräftigere und ein paar cm längere Sekundärentladungen.



Im Bild ist diese Spule von unten zu sehen. Die Plexiglas Abdeckung ist nicht bloss „schön“, sondern schützt die Primärspule auch wirksam vor Funkenüberschlägen von der Sekundärspule. Da der Leiterabstand nur 6mm beträgt, wurden auch ultraflache Abgriffe entwickelt, welche, an ein Stück Band montiert, unten im Bild zu sehen sind. Hinweis: die Spule muss anders berechnet werden, als eine aus Runddraht; bei gleicher Windungszahl hat sie weniger Induktivität! – Die Flachbandspule ist ebenso kompakt wie jene aus PVC-Draht.



Hier ist nun die neue Primärspule, für den Betrieb auf den Unterbau der TC montiert. Anmerkung: Sekundärüberschläge geschehen zwar nicht auf die Primärspule, jedoch gelegentlich auf deren Anschlüsse (rechts im Bild)!

3.9) Sekundärspule

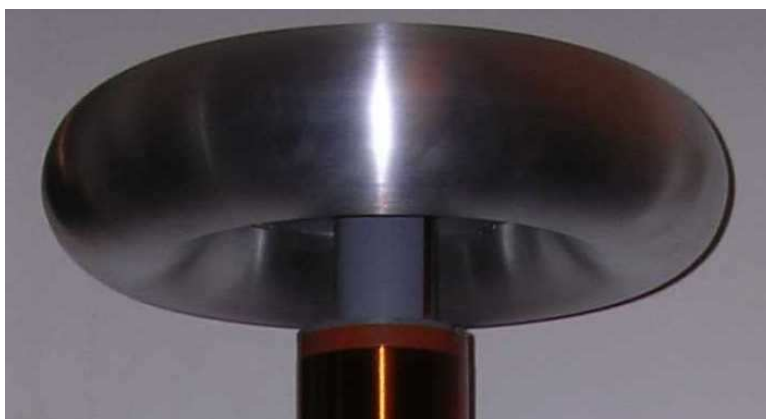
Die Sekundärspule ist ein Kompromiss aus Spannungsfestigkeit und Güte, bei Einhaltung einer Induktivität, die auch die Einhaltung der oben, bei der Primärspule erwähnten Primärkreisimpedanz ermöglicht. Ein Längen/Durchmesser Verhältnis von etwa 4 bis 5 hat sich da als günstig erwiesen. Die Windungszahl, und damit der Drahtdurchmesser, ergibt sich dann aus der Forderung der Resonanz des Systems „Sekundärspule + Toroid“ mit dem Primärkreis (bei der UBTT: 1680 Windungen aus 0.3mm Kupferlackdraht, auf einem Spulenkörper mit ϕ 12.5cm, bei einer Wicklungslänge von 60.3cm, was zu einer Induktivität von 66.6mH / $Q \sim 212$ führt).



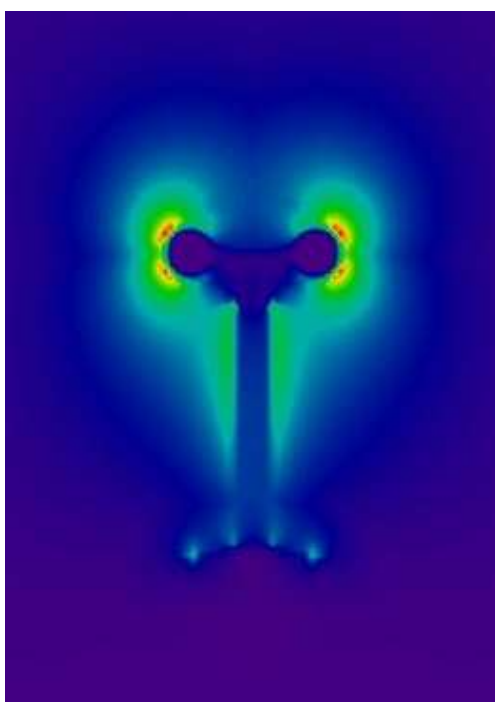
Ohne aufgesetztem Toroid beträgt die Viertelwellen-Eigenresonanzfrequenz dieser Spule 196kHz; mit einem Toroid von 50cm ϕ / 12.5cm Wulst ϕ erniedrigt sie sich auf 122 kHz. Auf diese Frequenz muss also auch der Primärkreis abgestimmt werden. Das Sekundärsystem wird auf dieser Frequenz betrieben; im Single-Betrieb als elektrischer Viertelwellenresonator, im Twin-Betrieb (also mit 2 Sekundärspulen) als elektrischer Halbwellenresonator. Tesla-Resonatoren sind verwickelter in ihrem Verhalten, als so einer „harmlosen“ Spule anzusehen ist. Die dynamischen Vorgänge in diesen Systemen sind, was die „linearen“ Vorgänge angeht, erst in jüngerer Zeit von **Paul Nicholson [6]** sachgemäß untersucht worden, dessen Website zu besuchen sich für jeden wirklich Interessierten lohnt..

3.10) Toroid

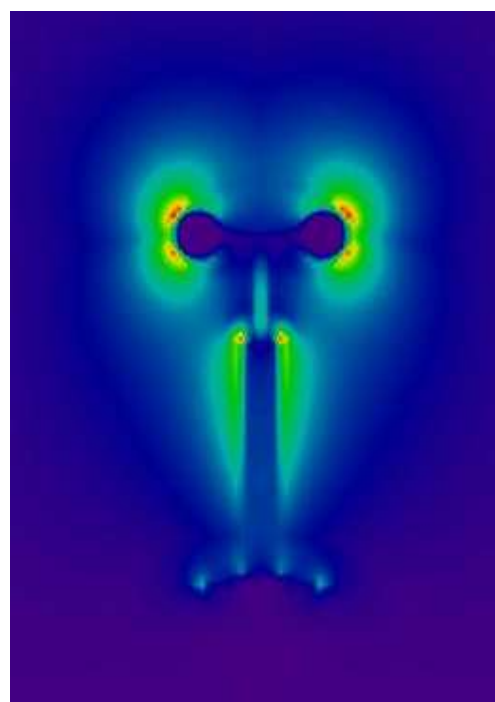
Kombiniert mit der Eigenkapazität der Sekundärspule stellt das Toroid die Sekundärkapazität der TC dar. Im Falle der UBTT (im Single-Betrieb) beträgt die Sekundär-Eigenkapazität etwa 10pF, jene des Toroids etwa 22pF. Diese kombinieren sich dann zu gemeinsamen 25pF. Die Verwendung von Toroiden als „Topload“ in TC's wurde von Bill Wysock [4] eingeführt, und hat bedeutend zur Erzeugung langer Funken beigetragen, obwohl die maximale, verlustfreie Sekundärspannung $U_s = U_p \cdot \sqrt{C_p / C_s}$ durch höhere Sekundärkapazität verringert wird. Dies kann damit plausibel gemacht werden, dass das Toroid genügend Energie – mit niedriger Impedanz zum sich bildenden Funken – bereitstellt, so dass dieser sich als „stepped Leader“ weiter ausbreiten kann, während die hohe Sekundärinduktivität allein, dem eine hohe Impedanz in den Weg stellen würde. Ausserdem verhindert der relativ grosse Kurvenradius des Toroids einen vorzeitigen Ausbruch der Leader durch Reduktion der Maximal-Feldstärke. Gelegentlich angebrachte Ausbruchstellen machen dies zwar wieder zunichte, ermöglichen aber eine bessere „Kanalisation“ der Entladungen.



Eine weitere wichtige Funktion des Toroids besteht in seinem Beitrag zur „guten“ Feldformung um die TC. Diese verhindert, durch Schirmwirkung, eine unerwünschte Koronabildung am Oberende der Sekundärwicklung, und damit auch Sekundär-Primär Überschläge - je nach Positionierung des Toroids. Zwei simulierte Darstellungen des elektrischen Feldes um die TC können dies veranschaulichen:



Toroid Unterkante 0.5* Sec.φ oberhalb
Sekundärspulen-Oberende



Toroid Unterkante 1.5* Sec.φ oberhalb
Sekundärspulen-Oberende

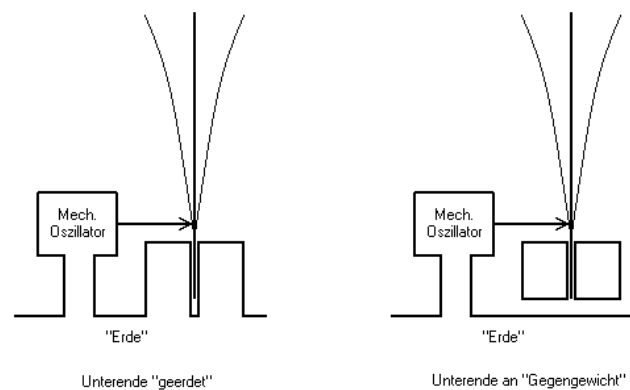
Ein Toroid muss in Relation zu der Leistung der TC dimensioniert werden. Es soll (ohne provozierenden Ausbruchspunkt am Toroid) etwa 1...3 „freie“ Leader in den Raum ermöglichen. Die Wahl der Höhe erfolgt gemäss der Schirmwirkung bezüglich der Koronabildung am Oberende der Sekundärspule. Die Feldberechnungen wurden mittels **Terry Fritz's E-Tesla 6** Programm durchgeführt [8].

3.11) Erdung

Die Erdung der TC ist hier als eine von deren „Baueinheiten“ aufgeführt, weil sie wesentlich zum funktionieren derselben beiträgt. Ein Analogievergleich des Sekundärsystems mit einer mechanischen Anordnung mag dies *veranschaulichen*:

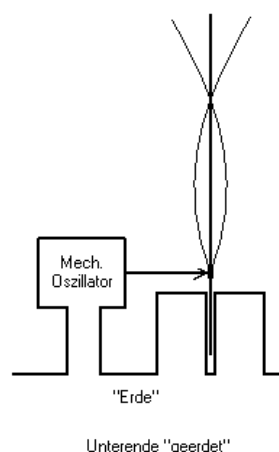
Man stelle sich eine Blattfeder vor, die nahe am Unterende, periodisch, in ihrer Grund-Eigenfrequenz erregt wird, so dass sich darauf eine stehende Viertelwelle ausbildet, die das Oberende mit maximaler Amplitude ausschlagen lässt, obwohl unten nur sehr geringe Bewegungen stattfinden. Dies kann nur so stattfinden, wenn das Unterende eingespannt ist, z.B. in einem Schraubstock. Würde es sich frei bewegen können, so würde sich die Blattfeder *irgendwie* bewegen, jedoch ohne Ausbildung einer definierten Viertelwelle, je nach Eigenschaften der Feder. Die Einspannung der Feder kann auch ersetzt werden durch anbringen einer relativ grossen Masse am Feder-Unterende – eines sogenannten Gegengewichts. Die folgende Figur macht dies plausibel:

Erregung mit der Viertelwellen-Eigenfrequenz der Blattfeder



Nebenbei: die Blattfeder-Analogie taugt auch zur Veranschaulichung anderer möglicher, allerdings praktisch unerwünschter, Schwingungszustände des TC Sekundärsystems, in höheren Eigenwert-Modi, z.B. jenem im $\frac{3}{4}$ -Wellen Modus:

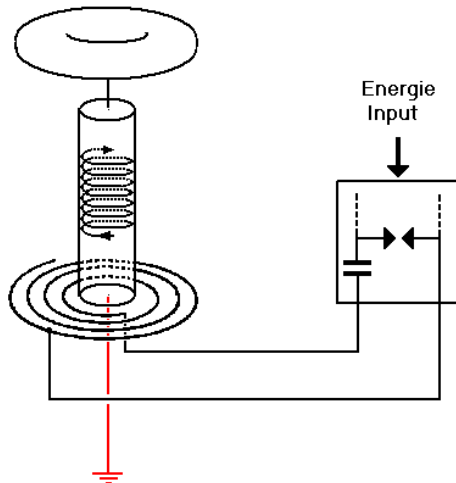
Erregung mit der $\frac{3}{4}$ -Wellen Eigenfrequenz der Blattfeder



Praktisch gesehen, ist es vernünftig, für die Erdung des TC Sekundärsystems eine separate HF-Erdung vorzusehen, z.B. durch Erdung an einer Wasserleitung, da – im Falle der UBTT – Spitzenströme von etwa 6A zur Erde erwartet werden müssen (Viertelwellen = „Single“ Betrieb). Durch Einkopplung via die Erdleitungs-Impedanz können sonst hochfrequente Störspannungen in das Netz-Erdsystem eingekoppelt werden, die schädlich auf andere angeschlossene Apparate einwirken könnten (EMV Problematik). Es ist streitig, ob man das Primärsystem auch an die HF-Erde anschliessen sollte: die EMV Verträglichkeit spricht dafür; die Sicherheit elektrischer Anlagen eher dagegen. Bei der UBTT haben wir uns hier für die Netzerde entschieden. Beim Twin-Betrieb spielt die Erdung des Sekundärsystems eine geringere Rolle, da hier die zweite Spule sozusagen die Funktion der Erde der ersten übernimmt. Auch hier wäre eine Blattfederanalogie möglich.

4.) „Single“- im Vergleich zum „Twin“-Betrieb / 2 Funkenbeispiele

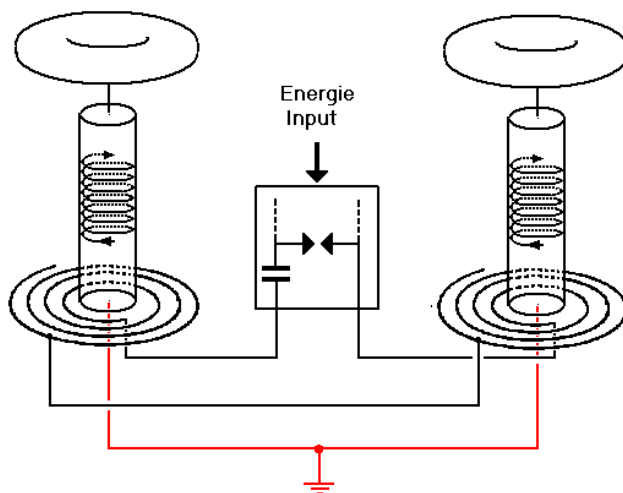
Wie eben unter „Erdung“ erwähnt, arbeitet die TC im Single-Betrieb als Viertelwellenresonator. Die Twin-Konfiguration kann so vorgestellt werden, dass 2 Viertelwellen Resonatoren im Gegentakt erregt werden, und dabei die Erde durch Zusammenschalten der Sekundärspulen-Unterenenden ersetzt wird, so dass eigentlich die jeweilige andere Spule das „Gegengewicht“ der einen bildet (die vorherige Erde bildet so einen Punkt der Symmetrie zwischen beiden Resonatoren). Man erhält somit einen Halbwellenresonator, der einfach auf 2 örtlich getrennte Spulen aufgetrennt ist. – Um elektrische Unsymmetrien auszugleichen – diese entstehen etwa aus unterschiedlichen Kapazitäten der Spulen zur Umgebung, oder durch die unterschiedliche Funkenentwicklung –, wird die Verbindung zwischen den beiden Sekundärspulen, in der Praxis *dennoch* geerdet. Die „Unsymmetrie-Erdströme“ sind aber bedeutend geringer, als der volle Erdstrom einer Single TC, und damit auch weniger störrächtig.



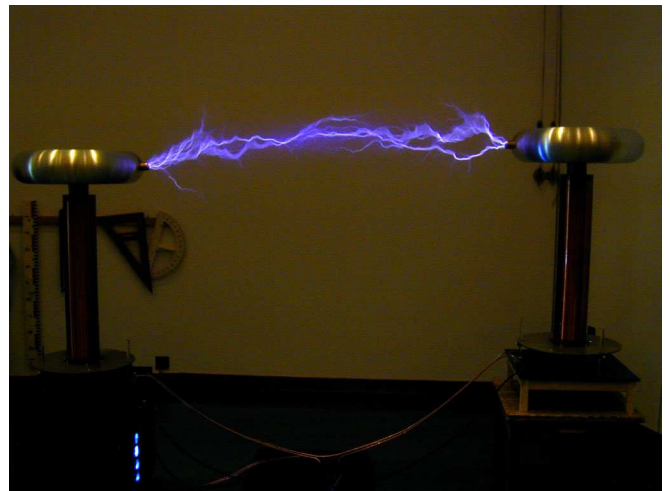
Single TC HF-Schaltung



Typischer 1.06m Power-Arc der SingleUBTT auf geerdetes Objekt im TC-Labor am 27.12.2003



Twin TC HF-Schaltung
(Voraussetzung: Wicklungssinne wie im Bild)



1.3m Funken der UBTT anlässlich der ersten Vorführung an der Uni-Bern am 10.3.2004

Obwohl für die Energie-Einbringung in das Twin-System prinzipiell auch eine Primärspule *allein* genügt, habe ich die Erfahrung gemacht, dass die Energie besser gleichmässig auf die beiden Spulen verteilt werden kann, wenn beidseitige induktive Einkopplung gewählt wird. Die gleiche Primärinduktivität wie bei einer Single TC wird dann einfach hälftig auf beide Spulen verteilt. Eine Twin gibt etwa 1.4 Mal längere Funken als eine Single, da die Funkenlänge etwa mit der Wurzel aus der Leistung wächst, und die gleiche Eingangsleistung nun hälftig auf 2 Spulen verteilt ist, denn $2 \cdot \sqrt{0.5} = 1.4142\dots$

Twins, obwohl nicht offensichtlich, sind besser geeignet, wenn man lange Funken in beengter Umgebung zeigen will, denn der Funkenkanal kann besser kontrolliert werden. Singles, mit freien Entladungen in den umgebenden Raum sehen dagegen „wilder“ aus, und geben stärkere, weisse Power-Arcs auf Erdoobjekte.

5.) Sicherheit, EMV

Sicherheit

Eine gewisse Vertrautheit im Umgang mit Hochspannung ist Voraussetzung für Bau und Betrieb von Teslaspulen, besonders solcher mit Leistungen über etwa 1kW. Wer kein Verhältnis dazu hat, sollte von TC's besser die Finger lassen, denn sie „offerieren“ verschiedene Gefahren, welche allerdings nicht überbewertet werden müssen: bisher sind lediglich 3 Todesfälle bekannt, die auf *grobe* Fehler im Umgang mit TC's zurückzuführen sind.

<http://hot-streamer.com/TeslaCoils/Misc/Deaths.txt>

Für die unterschiedlichen Gefahren sei hier auf die Zusammenstellung auf der Tesla Mailliste verwiesen, die ich dem Anwender zu lesen empfehle:

<http://www.pupman.com/safety.htm> (in Englisch)

CONTENTS

- 1.0) Electrical Hazards, Fuses and Safety Switches
- 2.0) Burns
- 3.0) Induction Field Effects
- 4.0) Ozone, NOx, and Vapors
- 5.0) Ultraviolet Light and X-ray Production
- 6.0) Radio Frequency Interference
- 7.0) Fire Hazards
- 8.0) Chemical Hazards
- 9.0) Explosion Hazards
- 10.0) Noise Hazards
- 11.0) Neighbors, The Spouse, and Children
- 12.0) Other

Auf der German Tesla List (GTL) gibt es auch einige Hinweise zur Sicherheit von TC's, welche vom deutschen Coiler **Stefan Kluge**[13] redigiert (und meist auch selber geschrieben!) wurden:

<http://beam.to/gtl> (in Deutsch)

Darin sei dem Leser empfohlen, vor allem die Hinweise zum Skineffekt zu lesen. Der „Skineffekt-Aberglaube“, bezüglich Unschädlichkeit der Tesla-Entladungen auf den menschlichen Körper, ist nämlich weiterhin weit verbreitet. Zwar reagiert unser Nervensystem auf HF-Entladungen nicht unbedingt mit Schmerz, - und gibt es einige professionelle Coiler, die spektakuläre Stunts mit ihrem Körper veranstalten (Robert Krampf, Ed Wingate), aber Schädigungen unseres Organismus durch HF-Ströme sind deshalb doch nicht auszuschliessen (die genannten Stunt-Profis haben grosse Erfahrung erworben, welche nicht unbedingt von Laien nachvollzogen werden sollte). Auch kann ein zufälliger Überschlag von der Sekundär- auf die Primärseite eine leitende Plasma Verbindung zur 50Hz Hochspannung des Primärkreises schaffen, und den allenfalls angeschlossenen Menschen eventuell sofort töten.

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

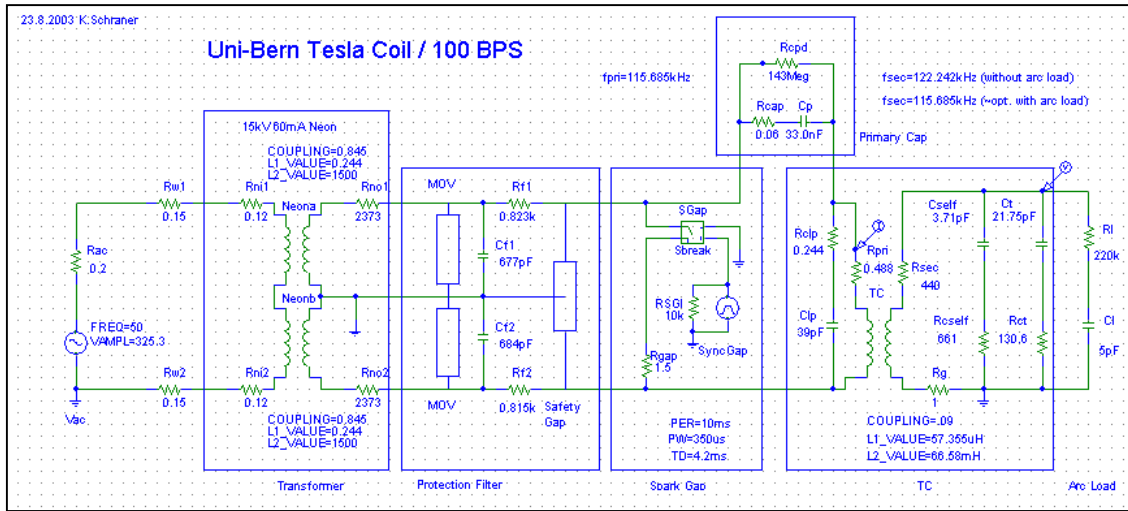
Durch die klassische (=disruptive) Arbeitsweise, im HF-Langwellenbereich, haben Teslaspulen ein Potential, andere elektrische Einrichtungen zu stören. Das Spektrum störender Frequenzen ist aber nicht bloss langwellig, sondern erstreckt sich weit in den MHz Bereich hinein. Auch werden, besonders von der mit hohen Strömen operierenden Primär-Funkenstrecke herrührend, leicht starke Störungen ins angeschlossene Stromnetz zurückgespielen, falls nicht Filter- und Erdungsmassnahmen dagegen unternommen werden.

Die Übertragung von Störungen durch direkte Antennenwirkung der TC als Radiosender wird allerdings meist überschätzt, da TC's glücklicherweise „schlechte“ Sender sind, besonders wenn sie, gut abgestimmt, grosse Funken produzieren. Die meisten EMV Probleme scheinen von Rückspeisung und erdbedingter Einkopplung ins Stromversorgungsnetz herzustammen. Leider sind nur aus der (-schlechten-) Erfahrung wirklich konkrete Ergebnisse zur EMV zu erlangen. Auch die einigermaßen gute Filterung der UBTT kann nicht absoluten Schutz davor bieten. Folgende Massnahmen, um Schäden durch EMV zu minimieren, seien hier aufgelistet:

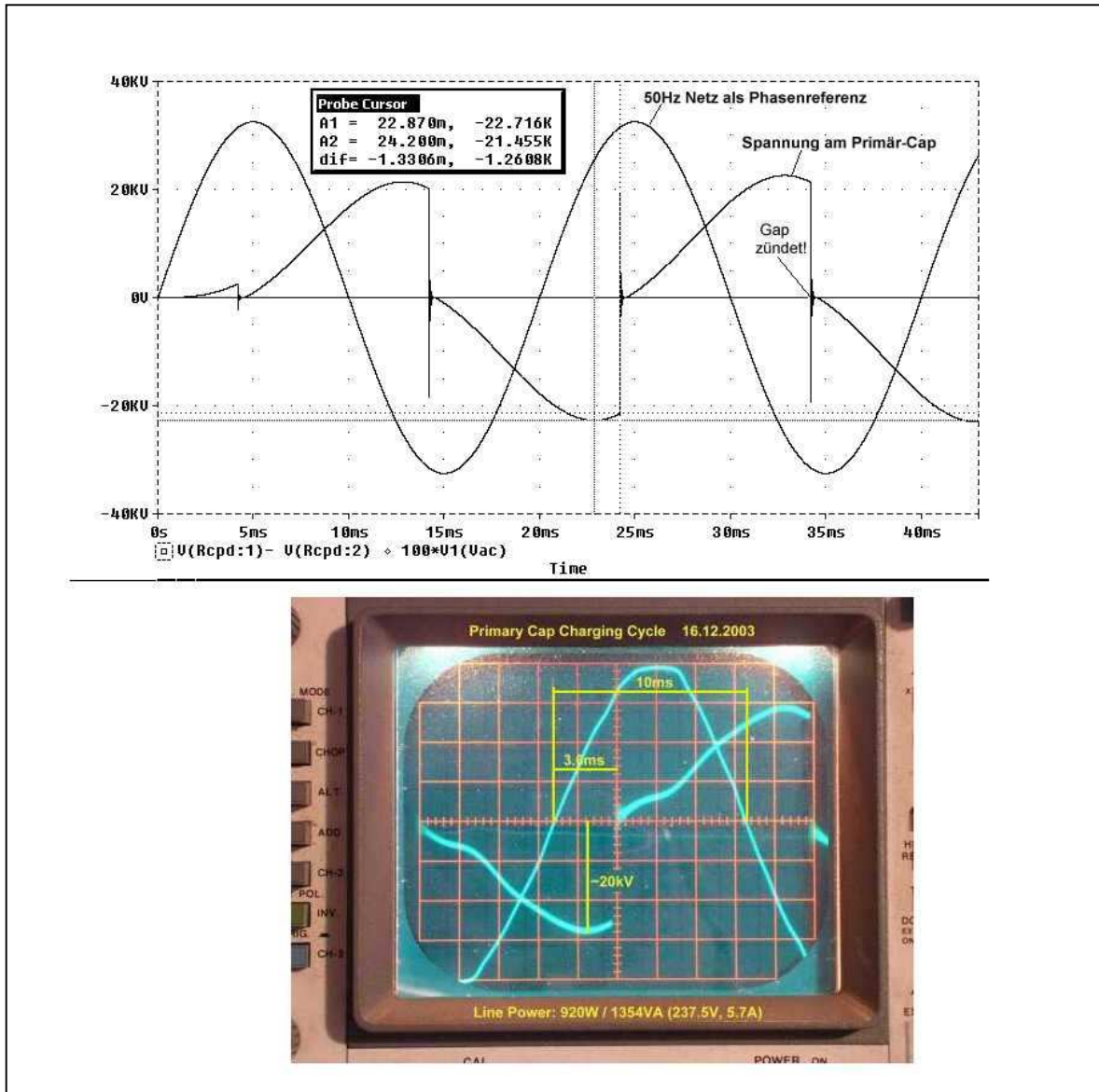
- Getrennte Erdung des Sekundärsystems auf HF-Erde oder Gegengewicht
- Niedrige Impedanz zur HF-Erde: kurze, induktionsarme Leitung; falls unmöglich: besser ein Gegengewicht
- „Terry Fritz-Filter“ im HV Speiseteil.; EMI Filter in den Speiseleitungen des 50Hz Netzes
- Ausschalten (-ausstecken-) empfindlicher Elektronikgeräte, die Schaden nehmen könnten.
- Distanz zu Computer Netzen, Telefonleitungen und ähnlichen informationsführenden Leitungen beachten.
- Wenn bekannt und verfügbar: TC aus einem anderen Strang des 50Hz Versorgungsnetzes speisen.

6.2) Simulation

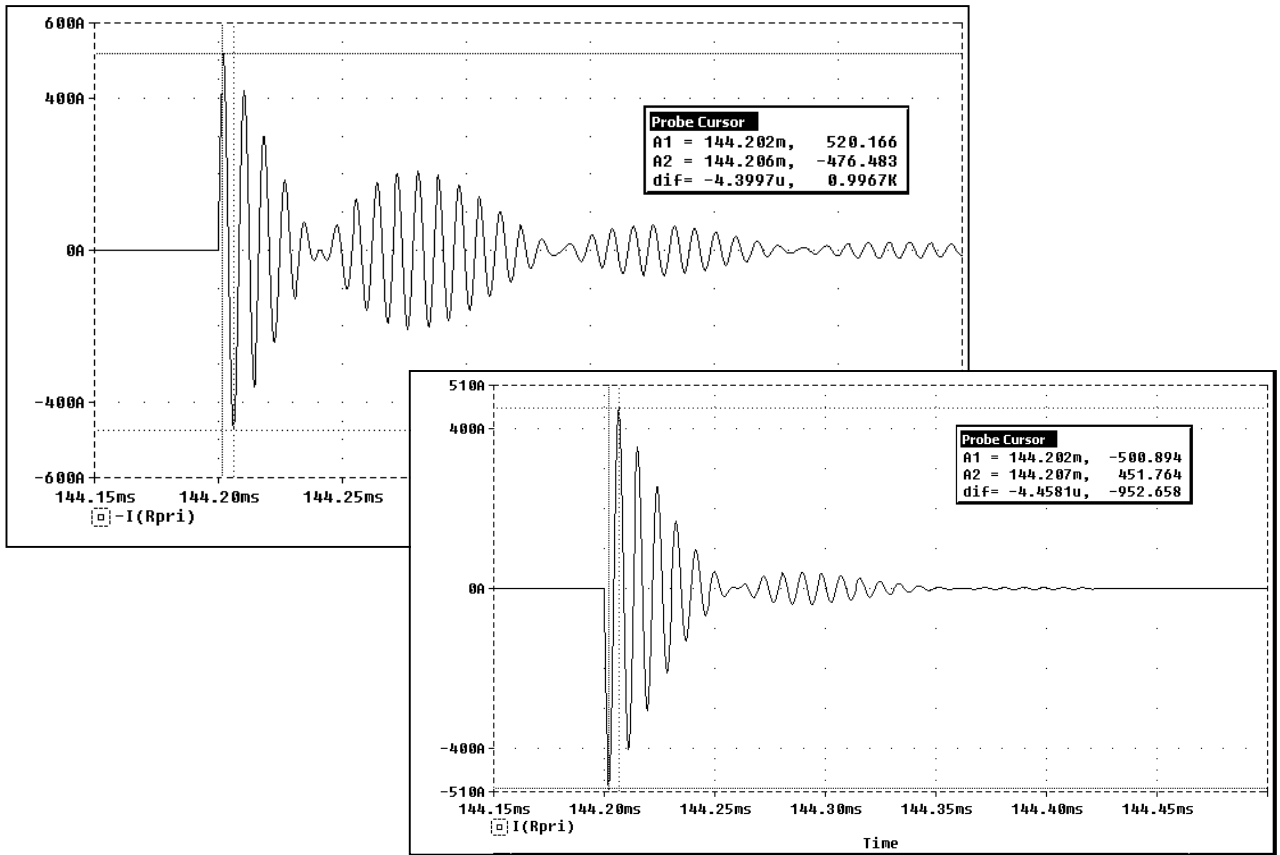
Die Schaltvorgänge einer TC, sowie Schaltungs- und Parametervarianten können gut in einem Spice-Modell der TC untersucht werden. Hier das UBTT-Modell in Pspice / Microsim 8 (heute: Orcad):



Die Nützlichkeit der Simulation ist aus einigen Resultat-Auszügen ersichtlich. Vorerst die Simulation des Lade-/ Entlade Zyklus des Primärkondensators, im Vergleich zu einem Oszillogramm, welches bei 920W 50Hz Netz-Input-Leistung, mittels fiberoptischer Spannungsmessung, aufgenommen wurde.

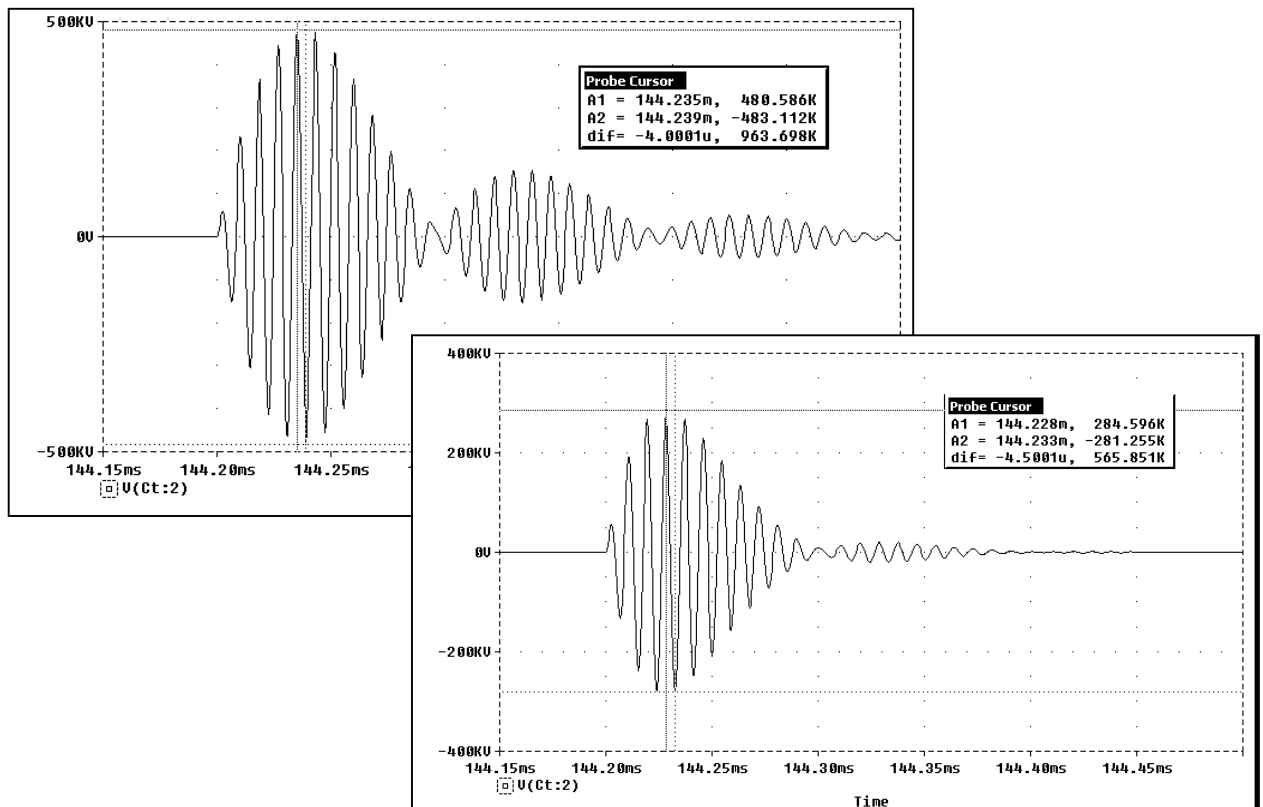


Der Primär-Entladestrom (in Zeit-axial gezoomter Form, fres = 122kHz) sieht wie folgt aus:



...und so, falls eine Leader-Entladung (-ohne Erdverbindung = Power Arc), das System belastet (fres = 116kHz):

Die Sekundärspannung erreicht vor dem Ausbruch der Funken, d.h. ohne Sekundärbelastung, hohe fast 0.5MV:



..bricht jedoch auf eher < 300kV zusammen, sobald eine Leader-Entladung (-ohne Erdverbindung = Power Arc), das Sekundärsystem belastet (fres = 116kHz). Leider ist für die Dynamik der TC-Funkenbildung bisher keine Simulation möglich. Das plasmaphysikalische Thema ist viel komplexer als der ganze Rest, und mehr Experimente dazu sind nötig. Einige Ideen zur Weiterentwicklung finden sich wiederum bei Paul Nicholson[6].

6.3) Messungen

Zwecks gelegentlicher Referenz seien hier Messergebnisse am UBTT-Prototypen protokolliert.

Messinstrumente, die in den folgenden Messungen Verwendung fanden:

- 1.) LCR Meter ELC-131D von ESCORT Instruments Ltd. (Taiwan)
- 2.) Siemens W2087 Pegelsender 200Hz-1620kHz, mit eingebautem 6-Digit Frequenzzähler
- 3.) Hewlett Packard HP5216A 7-Digit Frequenzzähler
- 4.) Leader LBO-520 Dual Trace Oscilloscope / 30MHz
- 5.) Low Z Amplifier mit Leistungs-OpAmp, max. ~700kHz, Eigenbau nach Terry Fritz [8]
- 6.) Fiberoptisches, Analog-HV-Messsystem, Eigenbau nach Terry Fritz[8]
- 7.) Cambridge Instr.Co., elektrodynamisches Präzisions-Wattmeter, 20-2000Hz, max.500V / 25A No. L398687
- 8.) Digital Multimeter, Voltcraft (=Metex) M-3860M

Primärkondensator MMC aus 2 Reihen à 12 seriegeschalteten 150nF/2000V + 1 Reihe à 12 seriegeschalteten 100nF/2000V Cornell Dubilier Polypropylen Kondensatoren, gemessen mit LCR Meter Typ ELC-131D:

Datum	Kapazität	Güte Q	Messfrequenz
23.1.2004	33.31nF	771	1kHz
23.1.2004	33.36nF	?	120Hz
12.2.2004	33.35nF	875	1kHz
12.2.2004	33.39nF	~690	120Hz

Primärspulen Induktivitäts-Messungen vom 17.2.2004, mit LCR-Meter (Spulen sind numeriert):

Abgriff auf 8.5 Wdg.: Messung bei 1kHz

Primärspule	L[uH]	Q
1	26.6/26.8/ 26.9	1.3/1.62/2.44
2	26.6-27.1	1.98-2.55
3	28.1	2.08-2.95
4	27.4	2.56

Abgriff auf 13 Wdg. und Total ~18Wdg; Messung bei 1kHz

Primärspule	L13[uH]	Q13	Ltotal[uH]	Qtotal
1	55.7/56/56.2	2.94/1.0/3.2	104.7	5.11
2	56.9/56.9	3.97/4.44	107.8	6.45
3	58.6/58.7	4.29	108.1	5.63
4	57.3/57.4	4.01	110.3	3.37

Primärspulen mittels T-Kabel verbunden für Twin-Betrieb, Messung bei 1kHz

Primärspulen	L[uH]	Q
1+2	56.7/56.8/56.8	2.88/3.20/2.90
3+4	58.2/58.2	3.20/3.11

An Primärspule 2 wurden mehrere Abgriffe angebracht, die folgende Messergebnisse bei 1kHz zeigten:

Abgriff Wdg.	L[uH]	Q	Lcalc[uH] ← berechneter Wert, zum Vergleich
7.5	21.3	1.85	
8	23.2/23.3	1.9/2.2	22.70
8.5	27.3	2.01	25.47
9	28.2	1.91	28.40
11	42	3.68	
11.5	47.5	4.3	
12	48.9	3.2	49.30
12.5	55.1	4.5	53.50
13	56.3	3.36	57.56
15	74.9	5.40	
15.5	83.7	5.35	
16	85.8	5.1	
17.8 (total)	107.1	4.6	106.73

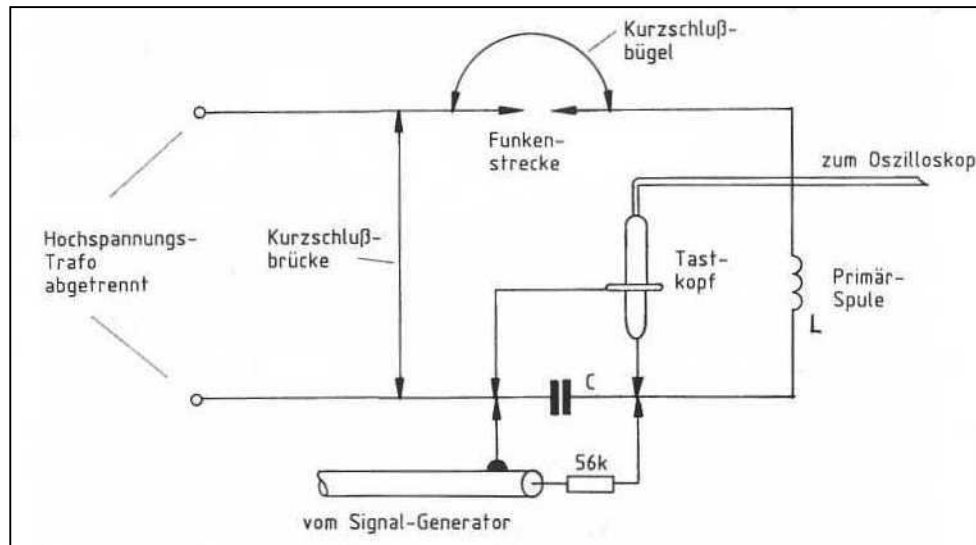
Bei Kurzschluss der Mess-Schleife am LCR Meter wurden 0.3uH abgelesen.

Primär-Induktivitätsmessungen an Prim. 1+ 2 vom 26.9.2003 bzw. 30.9.2003 sind hier nicht reproduziert.

Bemerkung: Da das LCR Meter mittels Krokodilklemmen an die Primärspulen angeschlossen wurde, sind die Messergebnisse des Gütefaktors Q von grosser Varianz betroffen, und deshalb unzuverlässig.

HF Primärkreis Resonanzmessung (für UBTT Prototyp)

Die Bestimmung der Primär Resonanzfrequenz erfolgte am 29.10.2003, unter Verwendung der folgenden Messanordnung, gemäss dem neuseeländischen Coiler Malcolm Watts [14]:



Die Primärspulen wurden in Arbeitsposition gemessen, Höhe = unterste Windung der Sekundärspule. Zuerst die separate Vermessung der einzelnen Primärspulen 1 und 2; sodann die mittels T-Kabel verbundenen Primärspulen, so wie sie im Twin-Betrieb verwendet werden (4.Kolonne der folgenden Tabelle):

Abgriff	<u>Prim.1</u>	<u>Prim.2</u>	<u>...Prim.1+Prim.2 (+T-Kabel)</u>
[Wdg.]	fres	fres	fres
	[kHz]	[kHz]	[kHz]
13	114.785	114.25	...
12.5	118.165	117.09	...
12	123.49	122.45	...
9	160.53	159.3	112.56
8.5	165.20	164.47	116.36
8	175.57	174.03	123.67

Das T-förmige Verbindungskabel ist aus flexiblem Auto-Lautsprecher Flachkabel grösseren Querschnitts(10mm²) gefertigt. Länge des T-Querbalkens 1.55m, Länge des T-Vertikalbalkens 1.8m. Es muss die primäre Hochspannung von ca.25kV_{peak} isolieren können. Die Reaktanzen des Kabels wurden am 21.10.2003 mittels LCR Meter, bei 1kHz, gemessen.:

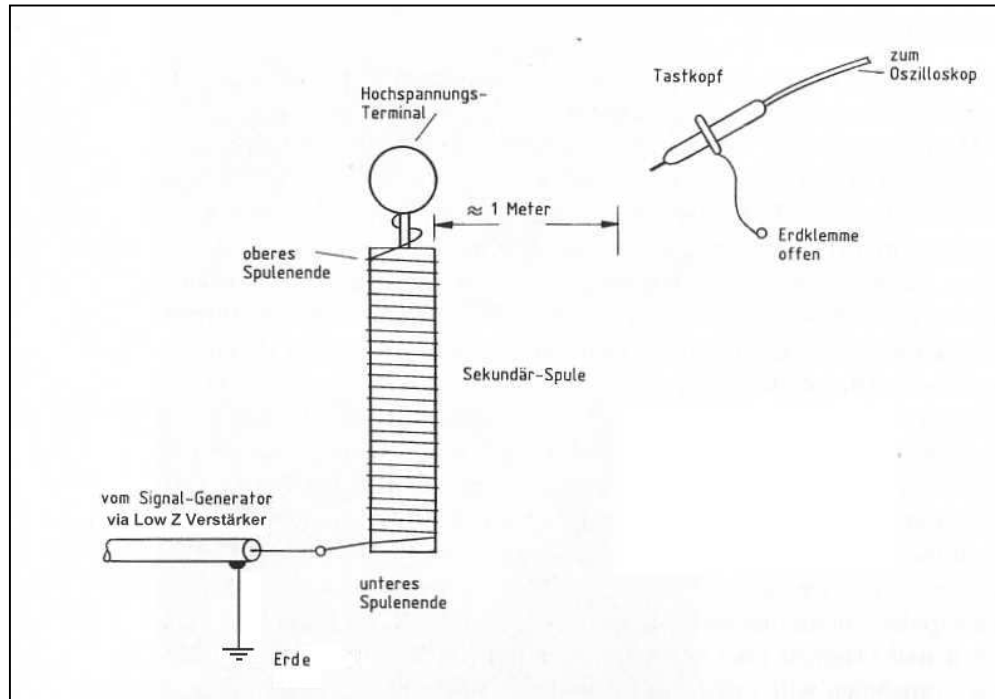
Kapazität (mit offenen Primärspulen-Anschluss Enden) C = 88pF
 Induktivität (mit kurzgeschlossenen Primärspulen-Anschluss Enden) L = 2.6uH

Bemerkung: Die Messung des unverarbeiteten (=gestreckten) 3.35m Kabels ergab ein unterschiedliches Resultat:

Kapazität (mit offenem Ende) C = 160pF
 Induktivität (mit kurzgeschlossenem Ende) L = 1.7uH

Sekundärspulen Messungen (Tesla Resonator)

Es wurden bisher 4 Sekundärspulen hergestellt, die, ~ gemäss [14], nach folgendem Schema vermessen wurden:



Die Umgebung der Spule kann das Messergebnis durch kapazitive Wirkung beeinflussen. Deshalb wird hier die geometrische Situation der Messung (→ in meinem Wohnzimmer) festgehalten:

- Abstand „Antenne“ zur Spule = 1.03m; zum montierten Toroid = 0.86m
- Abstand Spule zu Wand (hinter Büchergestell) = 1.75m
- Abstand Spule zu Wand vis à vis (mit Schreibtisch) = 2.6m
- Abstand zur Zimmer Fensterfront + Zentralheizungs radiator = 1.54m
- Abstand zur Zimmerdecke, Spulen-Oberende = 1.6m; Toroid Oberkante = 1.4m
- Abstand Spulen-Oberende zu herabhängender Japanlampe = 1m

Messergebnisse vom 23.8.2003. Alle Frequenzangaben in [kHz]. Fo=Grundresonanz; F3,F5=Oberwellen. Die 70% Frequenzen sind jene zur Bestimmung der Bandbreite, aus welcher auch der Gütefaktor Q berechnet wurde.

a) Ohne Toroid = blosse Sekundärspulen

	Spule 1	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q	Spule 3	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q
Fo	206.074	206.57	205.60	213.1	205.44	205.94	204.97	211.8
F3	500.92				500.3			
F5	717.8				717.66			
	Spule 2	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q	Spule 4	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q
Fo	206.23	206.71	205.77	219.4	206.16	206.64	205.68	215.3
F3	501.2				501.04			
F5	719				718.3			

b) Mit Toroid

	Spule 1	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q	Spule 3	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q
Fo	123.03	123.45	122.67	157.7	123.105	123.51	122.71	154.8
F3	434.39				434.41			
F5	673.45				673.58			
	Spule 2	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q	Spule 4	Fo+ 70%	Fo- 70%	Q
Fo	123.33..4	123.725	122.92	153.2	123.18	123.59	122.76	148.4
F3	435.08				434.57			
F5	674.87				673.41			

Sekundärspulen-Messungen (Fortsetzung)

Abmessungen [mm] und Windungszahlen der eigentlichen Wicklung (15.8.2003):

Spule 1	unten	Mitte	oben
	blosser Spulenkörper	über Wicklung	blosser Spulenkörper
Durchmesser	125.2/125.1/125.0	125.9/125.8	124.8/125.3/125.4
Wicklungslänge	603...603.5		Windungszahl 1682 (später 2 Wdg entfernt → 1680)
Spule 3	unten	Mitte	oben
	blosser Spulenkörper	über Wicklung	blosser Spulenkörper
Durchmesser	124.9/125.1/125.0	126.1/126.2	125.1/124.9/125.0
Wicklungslänge	603		Windungszahl 1680

Vermessung von Induktivität und DC Widerstand (mit LCR und Digital-Multimeter am 19.8.2003):

Spule 1 mit Windungszahl N=1682 Rdc=148.6 Ohm bei T=20C		
L [mH]	Q	Messfrequenz
66.72	2.90	1kHz
66.67	0.352	120Hz
Spule 1 mit Windungszahl N=1680 Rdc=145.4 Ohm bei T=20C		
L [mH]	Q	Messfrequenz
66.64	2.89	1kHz
66.59	0.351	120Hz
Spule 3 mit Windungszahl N=1680 Rdc=145.0 Ohm bei T=20C		
L [mH]	Q	Messfrequenz
66.62	2.91	1kHz
66.57	0.353	120Hz
Spule 2 0 Rdc=144.8 Ohm bei T=20C		
L [mH]	Q	Messfrequenz
66.40	2.90	1kHz
66.35	0.352	120Hz
Spule 4 Rdc=144.8..145.0 Ohm bei T=20C		
L [mH]	Q	Messfrequenz
66.55	2.90	1kHz
66.50	0.353	120Hz

UBTT Gesamtsystem im Twin-Betrieb: Leistungs und Funkenlänge-Messungen (26./27.12.03):

Funkenlänge[m]	Netz U / I	Scheinleistung	Wirkleistung	Leistungsfaktor
1.4m	230V / 6.7A	1541VA	1220W	0.792
1.5m	230V / 7A	1610VA	1300W	0.807

Bemerkungen:

@ 1.4m Sparks: Safety gap 9.5mm; Phaseshift Variac auf ~15

@ 1.5m Sparks: Safety gap 10mm; Phaseshift Variac auf ~18, häufiges „Handshake“ der Twin sparks; 3 Photos

FART 15kV/60mA Neontrafo Kurzschlussversuch (28.10.2003)

Primärspg.	Sekundär-Kurzschlussstrom
200V	50mA
230V	60mA

Einstellung der Schutzfunkenstrecke (blosser NST, ohne Tankkreis-Cap, angeschlossen):

Primärspg.	Primärstrom	Schutzfunkenstrecke	Leerlauf HV sekundär (nur berechnet aus ü -Verh.)
250V	4.4A	7.3mm	16.3kV (23kVpeak)

7.) Literatur / Internet Links

- [1] Margaret Cheney, Tesla, Man out of Time 1981, dt. Omega 1997, ISBN 3-930243-01-6
- [2] David H. Sloan, A Radiofrequency HV Generator, Physical Review Vol.47, 1.1.1935, P.62-71
- [2a] C.R.J. Hoffmann, A Tesla transformer HV generator, Rev.Sci.Instrum. Vol.46, Jan.1975,P.1-4
- [3] Filme: Frankenstein, Terminator II
Greg Leyh: <http://www.lod.org/index.html>
- [4] z.B. Show anlässlich Sun Computer Meeting 2000
Bill Wysock's Tesla Technology Research: <http://www.ttr.com>
kVA Effects <http://www.teslacoil.com/>
- [5] Tesla Coil Mailing List, Coiler Erfahrungsaustausch-Forum: <http://www.pupman.com/>
- [6] Paul Nicholson's TSSP, Physik der TC's: <http://www.abelian.demon.co.uk/tssp/>
- [7] Ritchie Burnett, beste System-Erklärungen: <http://www.richieburnett.co.uk>
- [8] Terry Fritz, moderner Tesla-Forscher, exzellenter Experimentator: <http://hot-streamer.com/>
- [9] John Freau, effiziente TC's (lange Funken): <http://hometown.aol.com/futuret/page3.html>
- [10] Finn Hammer <http://home5.inet.tele.dk/f-hammer/tesla/tesla.htm>
- [11] Kurt Schraner <http://home.datacomm.ch/k.schraner/index.htm>
- [12] Stefan Bauer <http://home.t-online.de/home/SuE.Bauer/home.htm>
- [13] Stefan Kluge <http://www.stefan-kluge.de/>
- [14] Malcolm Watts in: Electronics- + Wireless World, March 1995, P.190-195

8.) Anhang: Praktische Installation & Inbetriebnahme

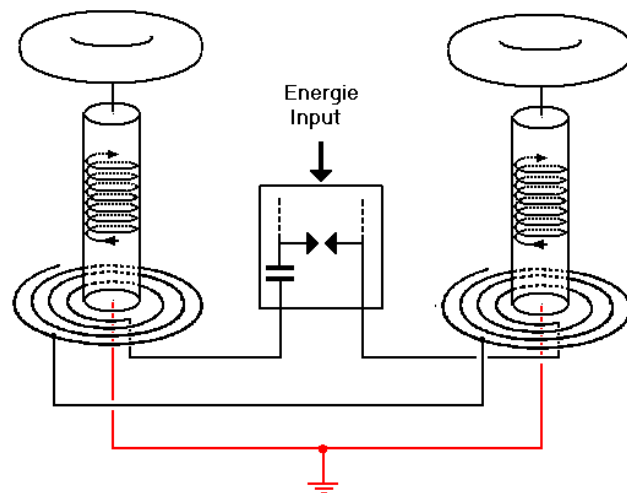
Urs Lauterburg

hat anlässlich der ersten Vorführung der UBTT im Physik-Hörsaal der Uni Bern, am 10.3.2004, ein Protokoll aufgenommen, das für folgende Installationen und Vorführungen nützlich sein kann. Es wird hier, praktisch unverändert, wiedergegeben:

8.1) Installation für Twin-Betrieb

Achtung: Basiseinheit der TC so aufstellen, dass die Rotationsebene der Rotary *nicht* ins Publikum weist!

- 1.) Die Spulen im Abstand $< 1.5\text{m}$ (Toroid-Aussenrand-Abstand) auf ca. gleicher Höhe aufstellen.
- 2.) Ausbruchstellen an die Toroide montieren.
- 3.) Die beiden TC's gemäss folgendem Schema verbinden:



- **Wichtig:** Die Abgriffe im Twin-Betrieb, mit Krokodilklemmen auf **8.5 Windungen!**
- Das Verbindungskabel sollte nicht direkt am Boden aufliegen: Eventuell mit Kunststoff unterlegen.

- 4.) HF Erdleitung: Wasserhahn \rightarrow 1.TC \rightarrow 2.TC Sekundärspule unten. - Dickes Erdkabel benutzen!
- 5.) Steuergerät: Im Prinzip \rightarrow Apparatesteckdose für Rotary
 \rightarrow Normale Steckdose für HV-Trafo der TC

Verbindungen:

- Apparatesteckdose am Steuergerät auf „Netzeingang“ von Phasenschieber
- Phasenschieber-Variac mit kurzen Bananenstecker-Kabeln anschliessen an „Variac-Ausgang“ des Phasenschiebers (weisse Steckdose, hinten links am Phasenschieber).
- „SRSG“ (Sync.Rotary Spark Gap)-Motorspeisung verbinden mit „Rotary“ am Phasenschieber (weisse Steckdose, hinten rechts am Phasenschieber).

Schema des Phasenschiebers für TC: siehe Seite 10 des Berichts.

- 6.) Auslöse-Taster mit Steuergerät verbinden.

8.2) Installation für Single-Betrieb

Achtung: Basiseinheit der TC so aufstellen, dass die Rotationsebene der Rotary *nicht* ins Publikum weist!

Die Leitung zwischen den TC's wird ersetzt durch die beiden kurzen direkt-Verbindungsbügel zwischen TC Primärspule und Basiseinheit.

Wichtig: Abgriff der Primärspule muss jetzt auf **13 Windungen** geändert werden.

Alles übrige wie unter **8.1)**

8.3) Inbetriebnahme der Teslaspulen.

- 1.) Hauptschalter am Steuergerät einschalten (grüner Schalter links)
Wichtig: die Rotary wird am Phasenschieber ein- und vor allem AUS-GESCHALTET !
- 2.) Sicherstellen dass der Phasenschieber-Variac beim Einschalten der Rotary auf der Nullstellung steht.
- 3.) Einschalten der Rotary am Phasenschieber.
- 4.) Wenn die Rotary ganz hochgefahren ist und regelmässig(=synchron) läuft, kann die HV mit dem roten Schalter bereitgestellt werden. Die HV wird dann durch Drücken des Tasters aktiviert (= auf die TC geschaltet)

Ampèremeter sollte zwischen 5 – 6A anzeigen (5.5A).

- 5.) Phasenschieber-L mit Variac erhöhen, auf **maximal 7.5A** Strom zum HV-Trafo, oder bis die Schutzfunkenstrecke zündet, oder bis „Racing Sparks“ entlang der Sekundärspule auftreten. In diesem Fall HV sofort deaktivieren und L zurücknehmen (→ Einstellung am Variac reduzieren).
- 6.) Dauer der Taster Betätigung eher < 1..2 Minuten, wegen dem hohen Stress, dem die TC Komponenten ausgesetzt sind.