

Tesla Trafo # 2 (Stand 8.5.2020)

1. Vergleich des Tesla-Trafo mit einem Netz-Trafo

Tesla-Trafo



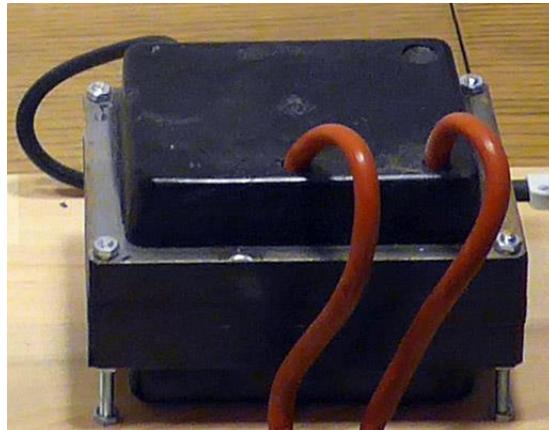
- > grosse, offene Bauform
- > kleine Leistungsdichte
- > einlagige Spulen
- > Luftkopplung

Der Tesla-Trafo **nutzt Resonanzgesetze** zur Transformation der Spannung

Betrachten wir zunächst einmal einen herkömmlichen Netz-Trafo, der übrigens auch auf dem von Tesla eingeführten Wechselstromsystem basiert. Er ist ein sehr kompaktes Bauteil, das große Leistungen auf kleinem Raum übertragen kann. Als auffälligstes Merkmal sticht natürlich sofort der große und schwere Eisenkern heraus, der den Großteil des Volumens einnimmt. Im Weiteren besitzt der Netz-Trafo kompakte Spulen, die auf kleinem Raum verdichtet und mehrlagig gewickelt sind.

Im Gegensatz dazu sieht ein Tesla-Trafo völlig anders aus. Er ist leicht und groß gebaut. Die Leistungsdichte ist bedeutend weniger hoch als beim Netz-Trafo. Auffällig ist zudem, dass es keinen Eisenkern gibt und die Spulen nur lose miteinander gekoppelt sind. Weiter sind die Spulen, oder zumindest die Sekundärspule sehr groß und immer einlagig gewickelt.

Netz-Trafo



- > kompakte Bauform
- > grosse Leistungsdichte
- > enge, mehrlagige Spulen
- > Eisenkopplung

Der Netztrafo **nutzt die magnetische Kopplung** von Spulen zur Übertragung der Spannung

Dadurch ist auch klar, dass die grundsätzliche Funktion dieser beiden Transformationsverfahren unterschiedlich sein müssen.

Der Netz-Trafo wandelt mit Hilfe der Primärspule die elektrische Energie zunächst in magnetische Energie um. Zur Weiterleitung dieser magnetischen Energie benötigt er unbedingt die großen Eisenmengen. Da Eisen nur bis zu einem gewissen Punkt magnetisch belastet werden kann, werden sehr große Mengen benötigt, was den Netz-Trafo zu einem sehr schweren Bauteil macht.

Die eigentliche Transformation, d.h. die Änderung des Spannungs- bzw. Stromniveaus ist nur ein Nebeneffekt, der aus der Umsetzung in die magnetische Energieebene herrührt. Bei der Rückverwandlung der magnetischen Energie in elektrische wird normalerweise eine andere Windungszahl verwendet. Eine höhere Windungszahl bewirkt, dass eine höhere Spannung bei geringerem Strom entsteht, eine niedrigere Windungszahl führt zu einer geringeren Spannung bei höherem Strom.

Durch dieses Verfahren, ist der Ausgang relativ fest mit dem Eingang verkoppelt. Jede Änderung am Ausgang wirkt sich sofort auf den Eingang aus. Man sagt der Trafo besitzt ein spannungssteifes Verhalten. Ein Kurzschluss an der Sekundärwicklung lässt auch die Primärwicklung wie eine kurzgeschlossene Spule erscheinen.

Dieses Verhalten ist über einen weiten Frequenzbereich vorhanden, so dass der Netz-Trafo immer breitbandig ist. Die Grenzfrequenz wird nur vom verwendeten Magnetmaterial bestimmt und liegt im Allgemeinen im unteren Frequenzbereich.

Ganz im Gegensatz dazu ist **beim Tesla-Trafo nur eine sehr lose Kopplung** der beiden Spulen vorhanden. Eine Transformation auf magnetischem Wege kann hier überhaupt nicht stattfinden. Die Sekundärspule ist besonders in ihrem oberen Teil überhaupt nicht magnetisch an die Primärspule gekoppelt.

Die **Sekundärspule ist in Realität ein Resonator**, der genau auf seiner Resonanzfrequenz betrieben werden muss. Das ist ein sehr wesentlicher Unterschied zum normalen Trafo. Der Tesla-Trafo hat daher eine fest eingestellte Arbeitsfrequenz, die Resonanzfrequenz. Die eigentliche **Transformation** der Spannung wird nicht durch die Windungszahlen, sondern **durch geschickte Ausnutzung der Resonanzgesetze** hervorgerufen.

2. Konstruktionsdaten des verwendeten Tesla-Trafo

2.1 Mechanische Daten

- Sockel mit 70 mm PVC-Rohr und 4 Stützen zur Stabilisierung der Sekundärwicklung
- Länge der Sekundärspule 400 mm
- Oberes Ende der Sekundärspule besitzt einen 150 mm Toroid
- Unterer Abschluss der Sekundärspule ist eine 20 x 20 cm Alu-Erdungsplatte
- Der Hochspannungsgenerator besteht aus einem Zündtrafo 2 x 6 kV ($\hat{U} = 17$ kV)
- Funkenstrecke: 2 Winkel mit einstellbaren Schrauben (4 – 7 mm Abstand). Eventuell später einmal eine bessere Löschfunkenstrecke.
- Primärkondensator: sieben durch 2 mm Glasplatten isolierte Alufolien (ca. 2nF)

2.2 Daten der Sekundärseite

- 800 Windungen gewickelt auf 70 mm PVC-Rohr mit 0.5 mm Kupferlackdraht
- Drahtlänge der Sekundärspule: $7 \text{ cm} \times 3.14 \times 800 = 175.8 \text{ m}$ (ist ca. $\lambda/4$)
- Geschätzte Kapazität zwischen Toroid und Erde: 15 pF
- Gemessene Resonanzfrequenz: 714 kHz
- Berechnete Induktivität: **3.3 mH**

2.3 Daten der Primärseite

- 11 Windungen von 4 mm²-Draht auf Ebene mit einem Durchmesser von 25 cm
- Berechnete Induktivität: **25 μ H**
- Drahtlänge Primärspule: 8 bis 8.5 m (ist ca. $\lambda/4$)
- Benötigte Primärkapazität zum Erreichen der gewünschten Resonanzfrequenz von 714 kHz = 1980 pF

3. Berechnung der Spulen

Damit ein Tesla-Trafo einwandfrei funktioniert, muss er (d.h. der Primär- und der Sekundärkreis) auf Resonanz arbeiten. Diese lässt sich wie folgt errechnen:

$$\text{Resonanzfrequenz } f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

Dies ergibt für die Sekundärseite mit den Elementen $L = 3,3 \text{ mH}$ und $C = 15 \text{ pF}$ (Toroid) eine Resonanzfrequenz von:

$$\begin{aligned} \text{Sekundärresonanz} &= \frac{1}{(2 * \pi * \sqrt{3,3 * 10^{-3} [1/s] * 15 * 10^{-12} [1/s]})} \\ &= \frac{1}{(6,28 * \sqrt{4,95 * 10^{-14} [1/s^2]})} \\ &= \frac{1}{(6,28 * 2,225 * 10^{-7}) [1/s]} \\ &= \frac{1}{13,972 * 10^{-7} [1/s]} \\ &= 0,0715 * 10^7 [1/s] \\ &= \underline{\underline{715 \text{ kHz}}} \end{aligned}$$

Damit die Primärseite auf der gleichen Frequenz schwingt, muss der Term unter der Wurzel $\sqrt{L * C}$ ($= 4,95 * 10^{-14}$) gleich gross sein. Damit lässt sich bei einem Primärkondensator von 1500 pF eine Primärinduktivität von

$$\begin{aligned} \text{Primärinduktivität } L_p &= \frac{4,95 * 10^{-14} [1/s^2]}{1,98 * 10^{-9} [1/s]} \\ &= 2,5 * 10^{-5} * [1/s] \\ &= 25 * 10^{-6} \text{ H} \\ &= \underline{\underline{25 \mu\text{H}}} \end{aligned}$$

berechnen.

4. Energieoptimierungs-Studien

Zu Beginn des Schwingvorganges muss der Kondensator eine möglichst hohe Energie aufweisen. Die Energie eines Kondensators lässt sich wie folgt berechnen:

$$E_c = \frac{1}{2} * C * U^2$$

Wie die Formel zeigt, steigt die Energie im Quadrat mit der Spannung. Es ist daher sehr wichtig, dass der Kondensator zu Beginn des Schwingvorganges eine **möglichst hohe Spannung** besitzt was sich mit dem **Abstand der Funkenstrecke** einstellen lässt.

Damit diese Energie beim Schwingen von der Spule auch optimal übernommen werden kann, müssen die Energiebedingungen einer Spule richtig interpretiert werden. Die Energie einer Spule lässt sich wie folgt berechnen:

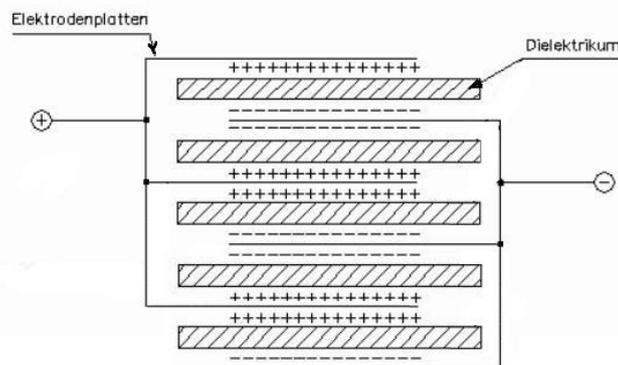
$$E_s = \frac{1}{2} * L * I^2$$

Wie die Formel hier zeigt, steigt hier die Energie im Quadrat mit dem Strom. Es ist daher äusserst wichtig, dass zu Beginn des Schwingvorganges ein **hoher Strom durch die Primärspule** fließen kann. Dies lässt sich mit einem grossen Leiterquerschnitt und kleinen Zuleitungswiderständen erreichen.

5. Bau des Hochspannungskondensators

Die Erstellung eines variablen Primärkondensators mit einer Kapazität von einigen nF und einer Spannungsfestigkeit von über 60 kVolt ist eine kleinere Herausforderung, da variable Luftkondensatoren von alten Radios nur ca. 2 kV Durchschlagsspannung besitzen und Keramik-kondensatoren nur bis zu 10 kVolt aushalten.

Die einfachste Art, einen solchen spannungsfesten und relativ leicht zu verändernden Kondensator aufzubauen, ist eine mehrschichtige Plattenkondensator-Konstruktion mit Glasisolation.



Die Kapazität eines solchen Kondensators lässt sich mit der folgenden Formel relativ einfach berechnen:

$$C = \epsilon_0 * \epsilon_r * A / D$$

Darin bedeuten:

ϵ_0 = elektr. Feldkonstante des Vakuums (-> $8,85187 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$)

ϵ_r = rel. Permittivität des verwendeten Dielektrikums. Gibt den **Faktor** an, um den die Spannung an einem Kondensator sinkt, wenn man bei gleicher Geometrie ein zwischen den Kondensatorelektroden angenommenes Vakuum durch ein dielektrisches, nicht leitendes Material ersetzt.

A = Fläche (-> cm^2)

D = Plattenabstand (-> mm)

Zur Verfügung stehende Permittivitäten ϵ_r :

Luft:	1	PVC:	2	Papier:	1 - 4
Acryl:	4.3	Glas:	6 ** 7.5 **9	Polystyrol:	1.03

Berechnungsbeispiel für 1 cm^2 :

Glaskondensator mit $A = 1 \text{ cm}^2$, $D = 2 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 7.5$:

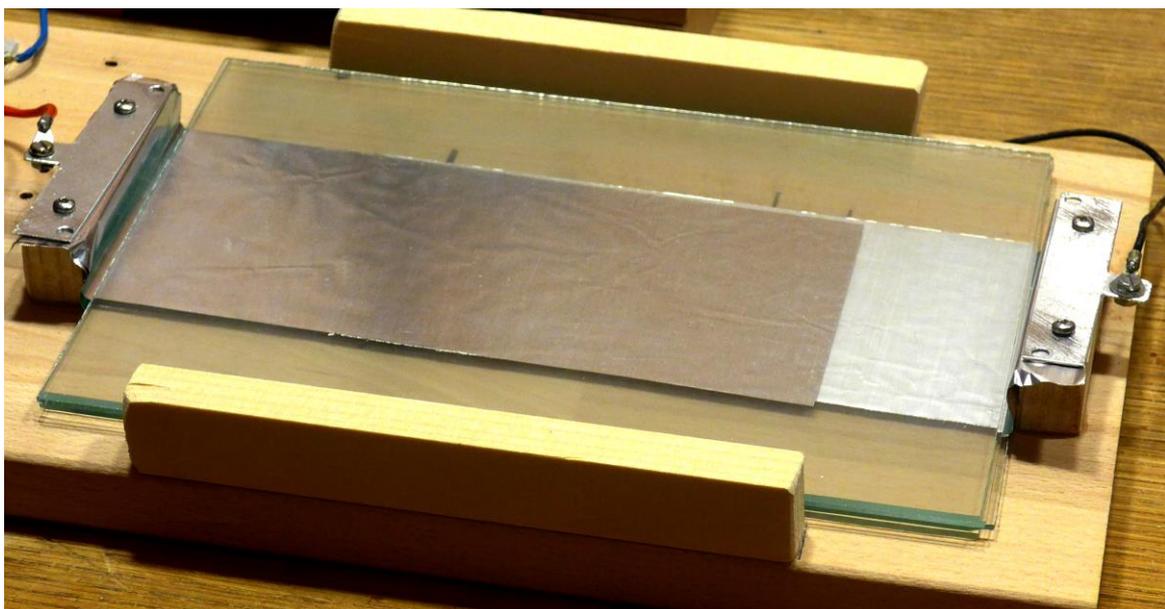
$$C_p = 8.8 \times 10^{-12} [\text{As/Vm}] \times 7.5 [1] \times 10^{-4} [\text{mm}] / 2 \times 10^{-3} [\text{m}]$$

$$8.8 \times 0.5 \times 10^{-13} \times 7.5 [\text{Asmm/Vmm}]$$

$$33 \times 10^{-13} \text{ F}$$

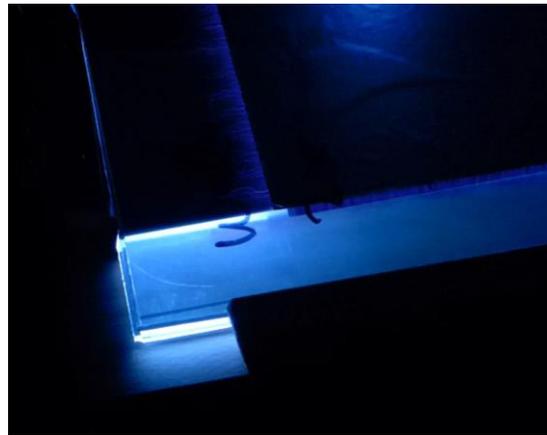
$$3,3 \text{ pF} / \text{cm}^2$$

Der benötigte Primärkondensator von 2nF benötigt daher 606 cm^2 und kann mittels 5 Aluschichten, einer Überdeckungsfläche von je 121 cm^2 und 7 darunter-, dazwischen- und darüberliegenden Glasplatten von je $165 \times 215 \times 2 \text{ mm}$ realisiert werden. Aus Überspannungsgründen wurde vorerst auf allen Seiten mindestens 5 cm Überhang eingehalten, was zu einer Überspannungsfestigkeit von ca. $50 \times 1200 = 60 \text{ kV}$ führte.



Wie sich in den ersten Versuchen herausstellte, erreicht der Tesla-Trafo auf der Primärseite eine Überspannung von beinahe 70 kV, welche den Kondensator zu unerwünschtem Durchschlagen brachte. Der Kondensator wurde neu auf 8 cm Schutzabstand umgebaut womit er nun Überspannungsspitzen von ca. $80 \times 1200 = 96\text{kV}$ aushalten sollte.

Der Grund dieser 3,5 fachen Spannungsüberhöhung - der Trafo gibt max. $2 \times 6 \times 1,4 \text{ kV} = 17 \text{ kV}$ Spitzenwert ab - ist nicht klar und soll zu einem späteren Zeitpunkt ermittelt werden!



festgestellter Durchschlag bei 5 cm!

Um die angestrebte Kapazität von 2 nF trotzdem zu erreichen wurden neu 7 Aluschichten mit einer Überdeckungsfläche von je 100 cm^2 vorgesehen. Damit lassen sich nun folgende Kapazitätswerte erstellen:

2 Lagen:	330 pF
3 Lagen:	660 pF
4 Lagen:	990 pF
5 Lagen:	1320 pF
6 Lagen:	1650 pF
7 Lagen:	1980 pF

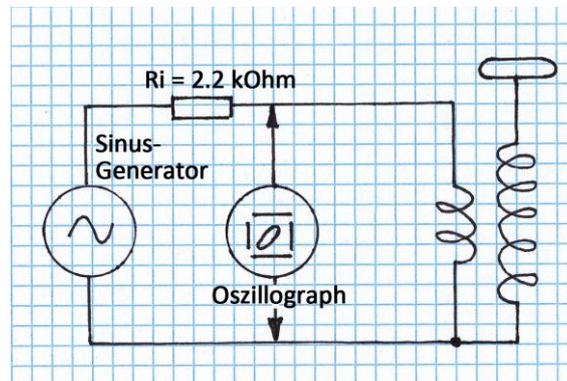
6. Dimensionierung und Bau der Spulen

Beim Bau der Spulen muss darauf geachtet werden, dass die Resonanzfrequenzen der beiden Tesla-Spulen gleich gross sind. Es ist von Vorteil, wenn diese Resonanzfrequenz relativ tief gehalten wird, da sich die Leistung des Trafos erhöhen lässt.

Beim Aufbau wurde daher eine **grosse Sekundärspule mit 800 Windungen** gewählt. Sie wurde mit Kupferlackdraht mit 0.5 mm Durchmesser auf ein 7 cm PVC-Rohr gewickelt.

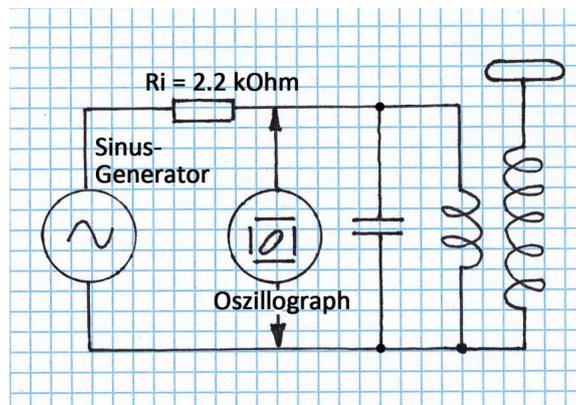
Es ist zudem äusserst wichtig, dass **durch die Primärspule ein hoher Strom fließen kann**, was mit einer relativ kurzen Wicklung und einem grossen Leiterquerschnitt erreicht wird. Die Primärspule besteht daher aus 11 Windungen eines 4 mm^2 -Drahtes, welcher auf einer Ebene aus Kunststoff mit einem Durchmesser von 25 cm flach aufgewickelt ist. Die Drahtlänge liegt zwischen 8 bis 8.5 m. Zur **Sicherstellung der Durchschlagsfestigkeit** müsste der innere Abstand zur Sekundärspule bei Luftisolation mindestens 80 cm betragen. Bei mir wurde zur Verkleinerung dieses Abstandes ein Plexiglasrohr mit 3mm Dicke eingeschoben.

Eine erste Messung der **Resonanzfrequenz der Sekundärspule** (inkl. Toroid) erfolgte unter Verwendung eines Sinusgenerators und eines Oszillographs via die Primärwicklung (ohne Kondensator!), welche einzig die Funktion als Einkopplung hatte. Aufgrund des mit einigen $k\Omega$ erweiterten Innenwiderstandes des Oszillators kann via die Kopplung der kondensatorlosen Primärspule der Resonanzpunkt des Sekundärkreises als Spannungsmaximum am Oszillograph erkannt werden.



Die gefundene Sekundärresonanz liegt mit Toroid (ca. 15 pF) bei 714 kHz, was heisst, dass sie eine Induktivität von 3,3 mH aufweisen muss.

Der erste **Abgleich des Primärkreises** erfolgte mit beinahe demselben Messaufbau. Die Primärseite enthielt neu zusätzlich einen Kondensator:



Um genauere Angaben über die optimale Grösse des Kondensators zu erhalten, wurde die Resonanzpunkte des Primärkreises bei sechs unterschiedlichen Kapazitäten gemessen. Hier das Resultat:

C [pF]	Lagen	Resonanz [kHz]
330	2	1333
660	3	1000
990	4	952
1320	5	769
1650	6	714
1980	7	680

Daraus sieht man, dass die optimale Grösse des Primärkondensator bei 1650 pF liegt und die Primärspule eine Induktivität von 25 μ H aufweisen sollte.

7. Erste Inbetriebnahme

Die verschiedenen Einzelteile des Teslatransformers werden zusammengehängt und einer ersten Funktionskontrolle unterzogen. Dabei wird der Teslatransformer vorerst mit einer kleinen Funkenstrecke von 5mm betrieben, damit anfänglich noch keine allzu grosse Überspannungen auftreten können. Es zeigte sich folgendes Verhalten:

- Keine Spannungsüberschläge zwischen den Spulen
- Frequenz: ca. 700 kHz (mit dem Oszillograph gemessen)
- Wirkung auf in die Nähe gehaltene Leuchtstoffröhren vorhanden
- Direktentladung zu Toroid bei ca. 50 mm
- Die Ausgangsspannung entspricht noch nicht den Vorstellungen

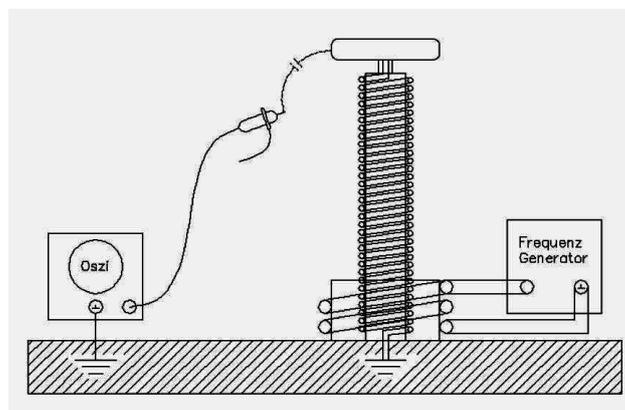
8. Abstimmen des Tesla-Trafos mit Messgeräten

Die Resonanzfrequenz des Primärkreises muss mit der Resonanzfrequenz des Sekundärkreises übereinstimmen! Da beim Sekundärkreis praktisch nichts verändert werden kann, muss der Primärkreis mit einem geeigneten Primärkondensator auf die Resonanzfrequenz des Sekundärkreises abgestimmt werden. Das heisst, die **Resonanz der Sekundärspule entspricht der Arbeitsfrequenz des Tesla-Transformers.**

8.1 Messung der Resonanz der Sekundärspule

Zur Messung der Sekundärresonanz benötigt man ein Oszillator und einen Sinusgenerator. Der Generator wird mit der Primärspule ohne Verwendung des Primärkondensators verbunden und der Tesla-Trafo so aufgestellt, wie er auch im Betrieb stehen wird. Der Fusspunkt der Sekundärspule wird geerdet. Nun gibt es zwei unterschiedliche Messmethoden:

Messung via kapazitive Kopplung der Oszillographen-Messsonde:



Der Oszillographen-Tastkopf wird wie eine Antenne in einiger Entfernung zur Sekundärspule aufgehängt. Die Masse des Tastkopfes bleibt unbeschaltet. Aufgrund der unsichtbaren, kapazitiven Kopplung kann man so die Spannung an der Sekundärspule ohne große Veränderung des Resonanzpunktes messen

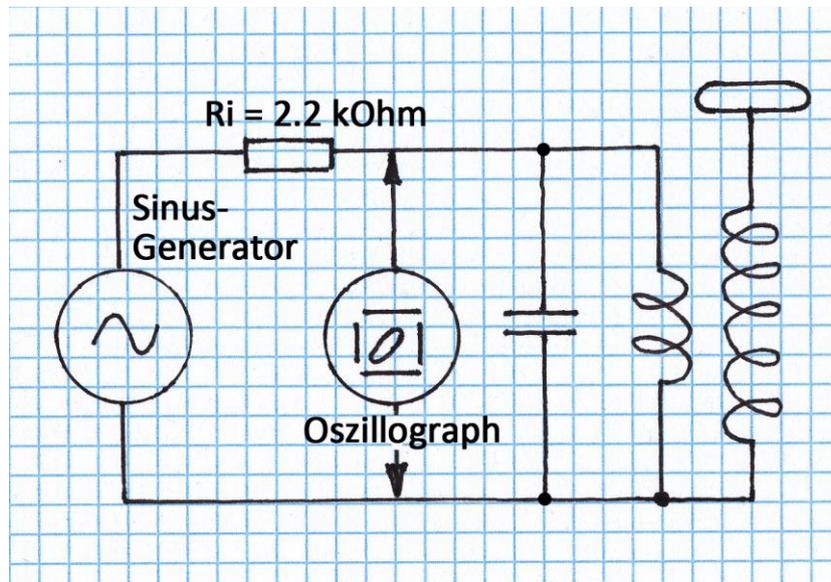
Aufgrund des mit einigen $k\Omega$ erweiterten Innenwiderstandes des Oszillators kann via die Kopplung der kondensatorenlosen Primärspule der Resonanzpunkt des Sekundärkreises als Spannungsmaximum am Oszillograph erkannt werden.

Die gefundene Resonanzfrequenz beträgt: **714 kHz** (daneben existierte noch eine bei 1470 kHz)

8.2 Einstellung des Resonanzpunktes beim Primärkreis

Da beim Sekundärkreis praktisch nichts verändert werden kann, muss der Primärkreis mit einem geeigneten Primärkondensator auf die Resonanzfrequenz des Sekundärkreises abgestimmt werden.

Messmethode:



Bei der neu verwendeten flachen Primärspule gab es folgende Messresultate:

Spulendaten: $12 \text{ Wdg}/d_i=105 \text{ mm}/d_a = 220 \text{ mm}/\text{Draht} = 4 \text{ mm}/\text{Querschnitt} = 4 \text{ mm}^2$

Lagen	C [pf]	L ₁₂ [μH]	L ₁₂ [kHz]
2	330	43	1333
3	660	38	1000
4	990	28	952
5	1320	32,5	769
6	1650	30	714
7	1980	34	680

Die Messung zeigte, dass bei 12 Windungen und einem Kondensator mit sechs Lagen ($C = 1650\text{pF}$) wirklich die gewünschte Resonanz von 714 kHz erreicht werden konnte. Bei der Messung wurde ausserdem festgestellt, dass die gemessenen Resonanzen bei vorhandener Erdverbindung zwischen der Primär- und Sekundärspule rund 100 kHz tiefer liegen. Dies vermutlich weil die Toroidkapazität durch die Verschiebung des Erdpotentials vergrössert wurde.

9. Feinabstimmung des Tesla-Trafos

Die Feinabstimmung des Trafos kann mittels Oszillatormessung via Primärkreis (s. auch Pt. 8.2) oder mittels Messung der Direktentladungsdistanz im reellen Funkenbetrieb gemacht werden.

Bei der Oszillatormessung via den Primärkreis wird der Primärkondensator soweit verändert, bis die in der Sinuswelle bei Resonanz gemessenen überlagerten Verzerrungen und überlagerten Störschwingungen so klein wie möglich werden. Diese Störschwingungen deuten darauf hin, dass die Resonanzen der beiden Kreise verschieden sind und der Trafo nicht abgestimmt sein kann.

Bei Feinabstimmung im reellen Funkenbetrieb bekommt die Funkenstrecke einen ersten Abstand von 5 mm und der Kondensator eine Initialkapazität von $C = 330\text{ pF}$ (2 Lagen). Anschliessend wird die Kapazität Lage um Lage vergrössert bis $C = 1980\text{ pF}$ (7 Lagen) erreicht ist und dabei die jeweilige Direktentladungsdistanz und Frequenz notiert. Beim Maximum der Direktentladungsdistanz sollte der Tesla-Trafo am optimalsten arbeiten. Gleichzeitig kann bei dieser Messung mit dem Oszillograph auch gerade die Hüllkurve der Energieübertragungsimpulse angeschaut und die genaue Arbeitsfrequenz bestimmt werden.

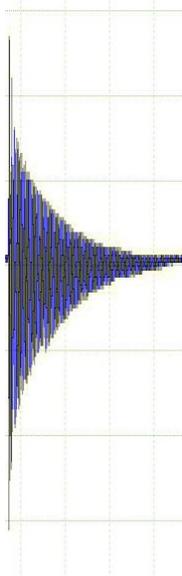
Hier eine Zusammenstellung der gefundenen Werte:

Kapazität in pF	C-Lagen	Direktentladungsdistanz zu Toroid in mm	Frequenz in kHz	Schwingungslänge in μs
C= 660 pF	3 Lagen	13mm	757 kHz	1,32 μs
C= 990 pF	4 Lagen	38mm	787 kHz	1,27 μs
C= 1320 pF	5 Lagen	57mm	689 kHz	1,45 μs
C= 1650 pF	6 Lagen	83mm	740 kHz	1,35 μs
C= 1980 pF	7 Lagen	92mm	746 kHz	1,34 μs

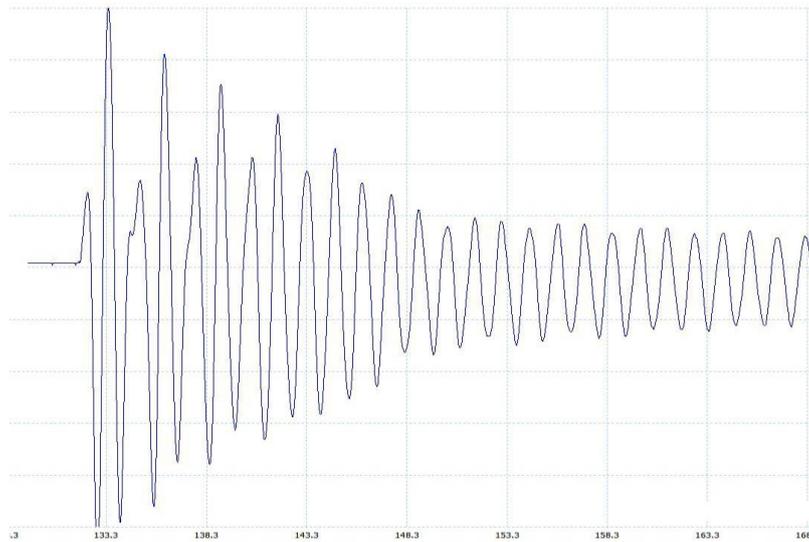
Diese Messung zeigt, dass die Direktentladungsdistanz trotz Überschreitens des Resonanzpunktes weiter ansteigt und das Maximum der Direktentladungsdistanz nicht beim optimalsten Arbeitspunkt des Tesla-Trafo liegt. Offenbar kompensiert die wegen der Kapazitätserhöhung übertragene Zusatzenergie die wegen des Verlassens des Resonanzpunktes entstehenden Verluste.

Um den optimalen Punkt des Tesla Trafos (Primär- und Sekundärkreis auf derselben Frequenz) auch bei der höheren Kapazität von 1980 pF erreichen zu können, sollte hier zu einem späteren Zeitpunkt die Primärinduktivität leicht verkleinert werden.

Hier die Hüllkurve des Energieübertragungsimpulses bei 990pF und **schlechter Abstimmung:**



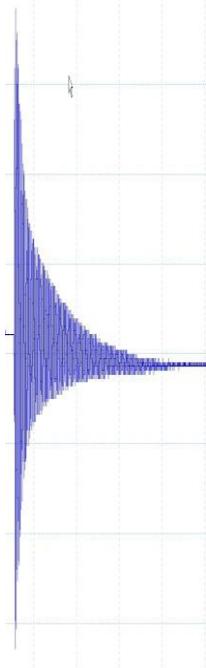
Hüllkurve des Impulses



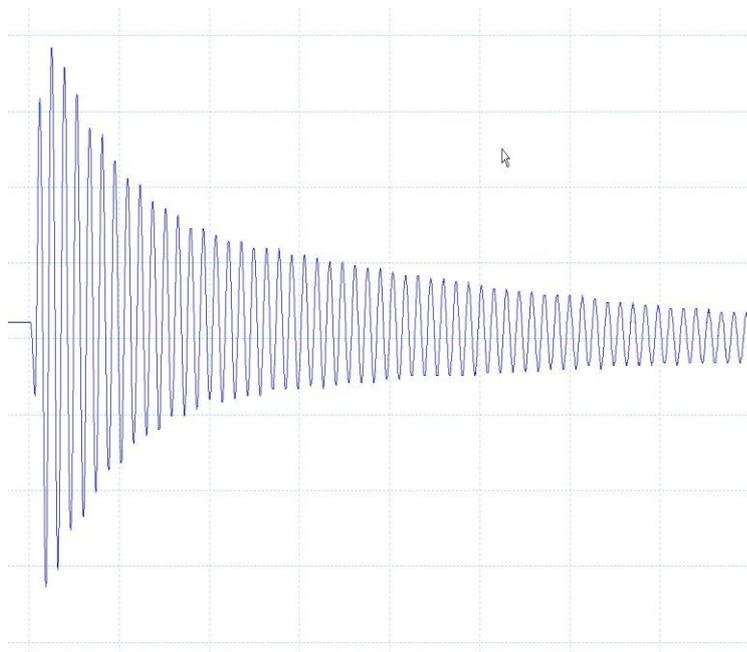
Die ausgedehnte Darstellung der Hüllkurve zeigt zwei überlagerte Frequenzen!

Die Schwingungen in der exponentiell abnehmenden Hüllkurve verlaufen recht wild, was auf die Existenz weiterer Frequenzen hinweist.

Hier die Hüllkurve eines Energieübertragungsimpulses bei 1650pF und **optimaler Abstimmung:**



Hüllkurve des Impulses

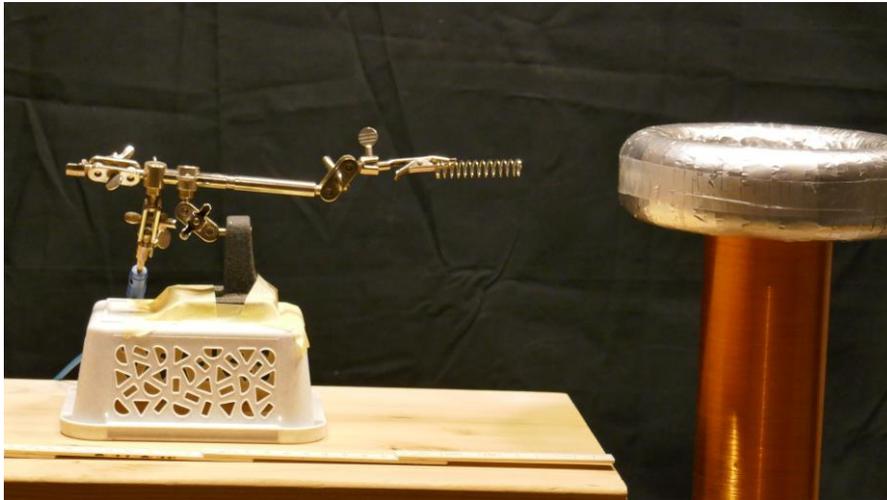


Die ausgedehnte Darstellung der Hüllkurve zeigt eine Frequenz!

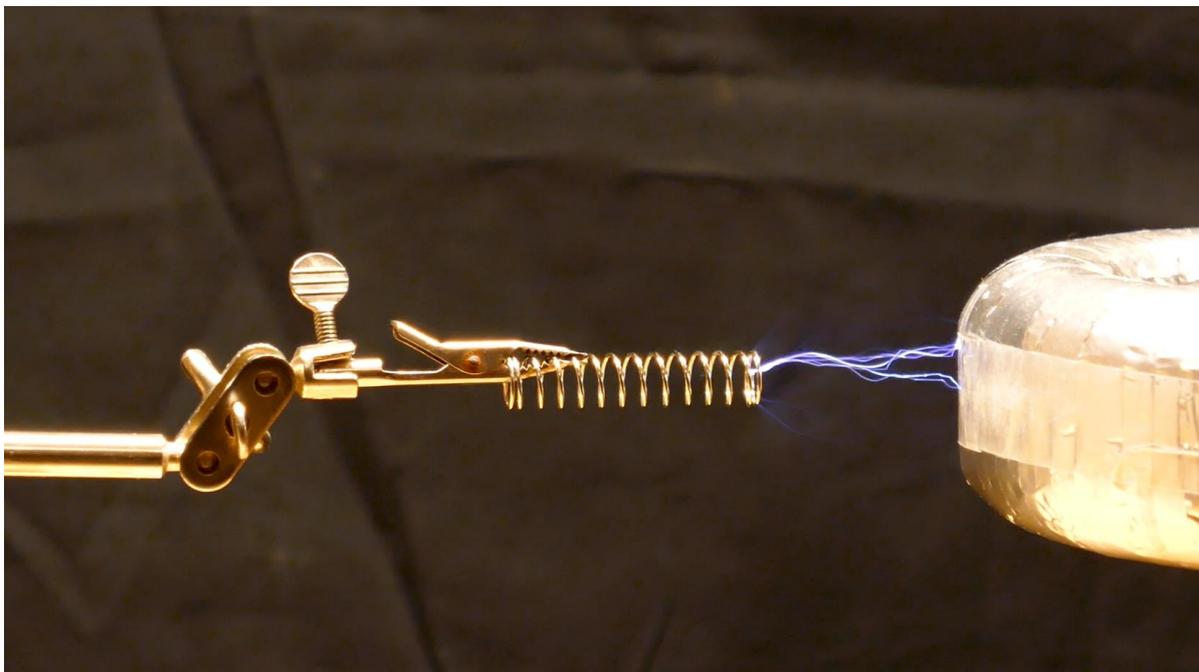
Die Schwingungen in der exponentiell abnehmenden Hüllkurve verlaufen schön gleichmässig.

10. Versuche mit direkter Entladung

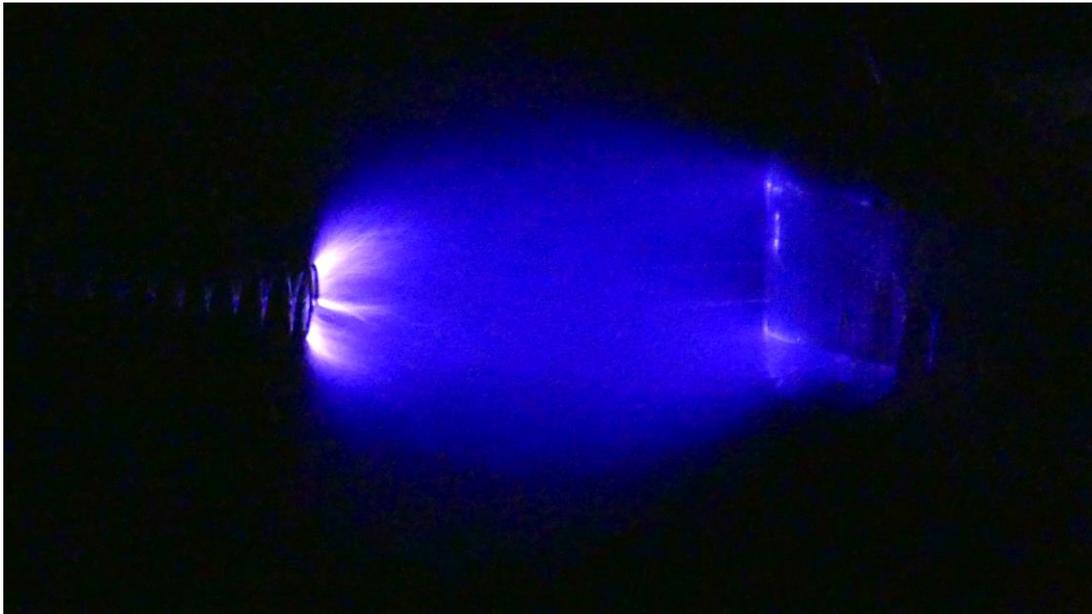
Es wird folgender Versuchsaufbau verwendet:



Bei kleineren Distanzen zum Toroid (im Beispiel 48mm) wird der Zwischenraum wegen der hohen Feldstärke so stark ionisiert, dass **direkte Entladungsblitze** entstehen. Die Entladungen erfolgen im Takt der Funkenstrecke (100Hz) und reduzieren die Ausgangsleistung des Trafos erheblich.



Bei grösserer Distanz (grösser als 100mm) wird die Feldstärke schwächer, so dass keine direkten Entladungsblitze mehr entstehen können. Die Feldstärke bleibt aber am Ende der Feder noch so hoch, dass **züngelnde Teilblitze** entstehen. Im Raum zwischen den beiden Polen gibt's nun eine blau schimmernde hochfrequente Entladungswolke.

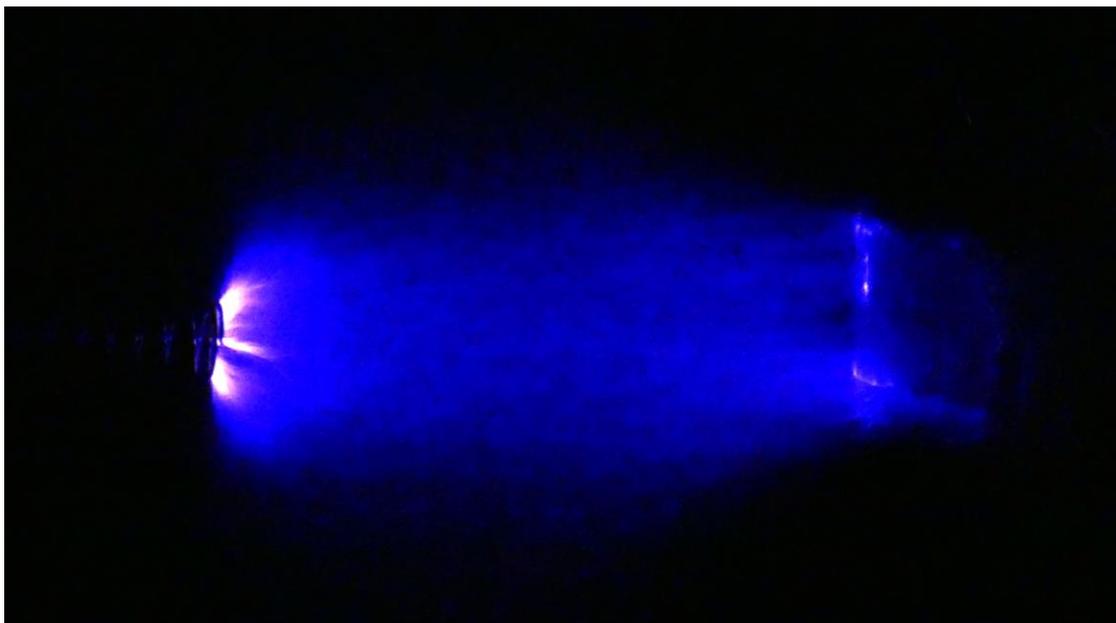


Federende

Toroid

Die flammenförmigen Teilblitze verlaufen dabei relativ flach, da die Feder am Ende wegen ihrer Glattheit keine grosse Feldstärke mehr erzeugen kann welche die Blitze anzieht. Auch an der seitlichen Oberfläche des Toroids zeigt sich eine gleichmässige Verteilung der Feldstärke. Diese Feldstärke ist zu klein um den Raum vollständig zu ionisieren und direkte Entladeblitze auszulösen. Das ganze Phänomen erzeugt auch keine hörbaren Geräusche.

Der zwischen den Polen liegende Raum leuchtet wegen der Ionisierung leicht blau auf. Beim Vergrössern des Abstandes nimmt diese blaue Wolke immer mehr die Form eines Schlauches an und verblasst langsam.

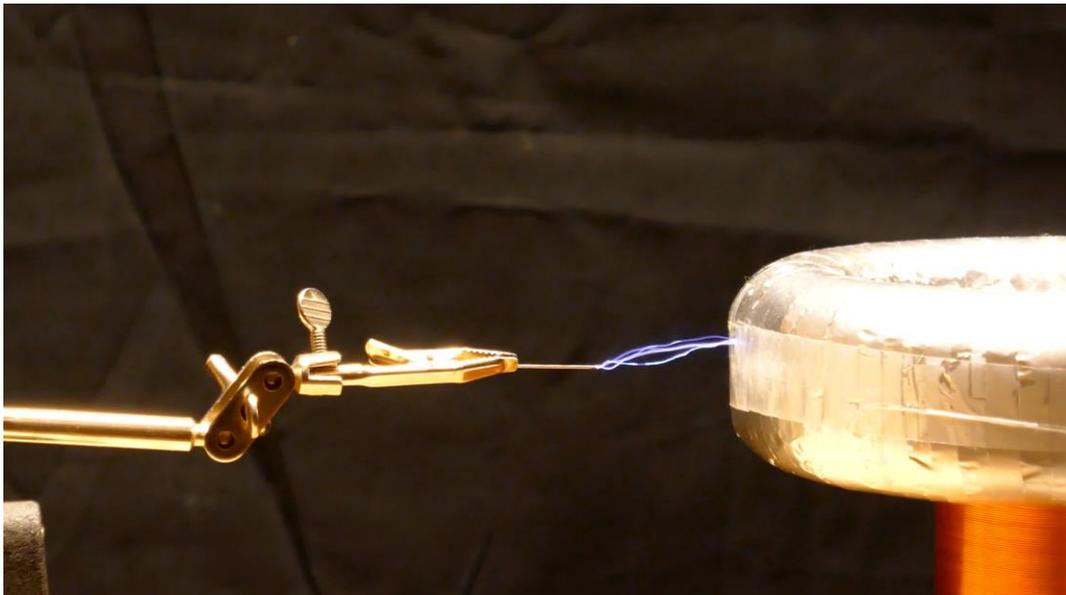


Federende

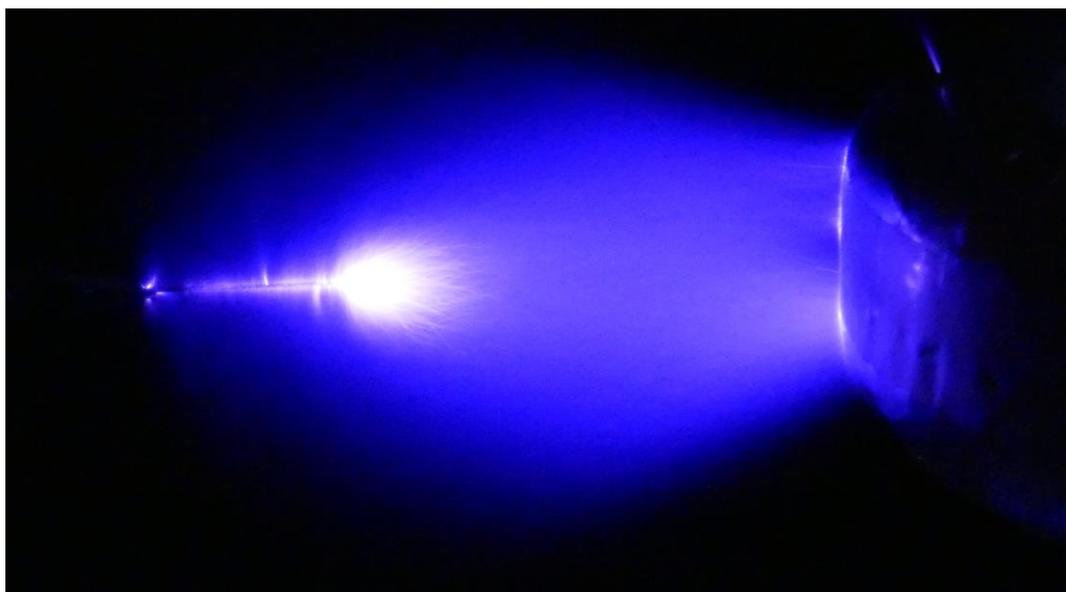
Toroid

Bei grossen Distanzen (d.h. mehr als 15 cm) wird die Feldstärke im Raum zwischen dem Toroid und der Feder so klein, dass die Luftteilchen nur noch leicht bis gar nicht mehr ionisiert werden wodurch die blaue Wolke mehr oder weniger verschwindet. In diesem Fall zeigt einzig ein kleines Feuer am Federende, dass immer noch ein Feld existiert.

Nun schliessen wir anstelle der Feder eine Nadel an:



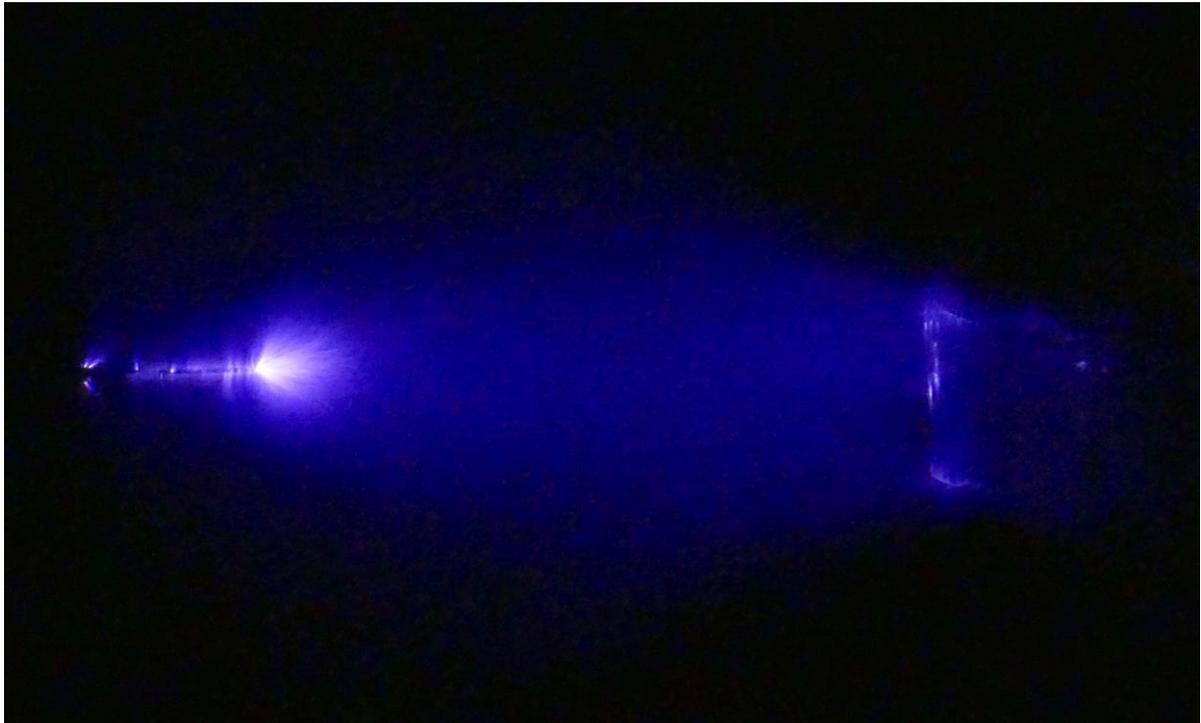
Vorerst entlädt sich die Strecke zwischen der Nadelspitze und dem Toroid. Wird nun die Distanz soweit vergrössert, dass keine direkte Blitzentladungen mehr vorkommen (ca. 100 mm), entsteht an der Nadelspitze wegen der hohen Feldstärke ein regelrechter Feuerball.



Nadelspitze

Toroid

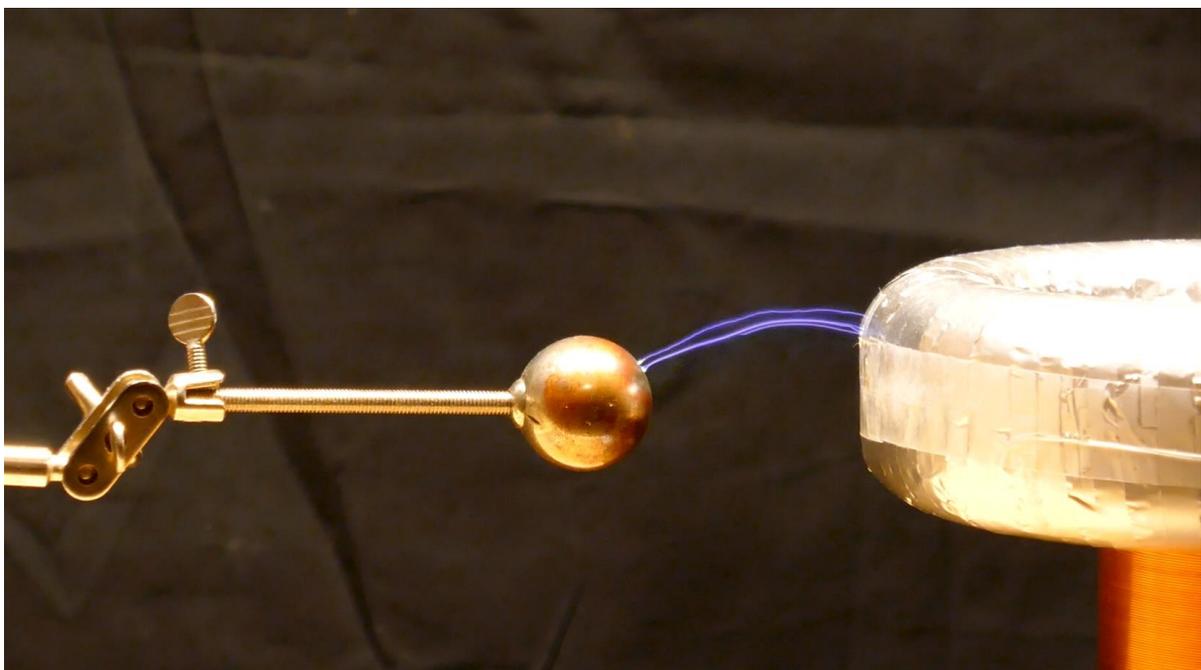
Wird nun der Abstand noch grösser gemacht, so entsteht ein länger werdender ionisierter blauer Schlauch



Nadelspitze

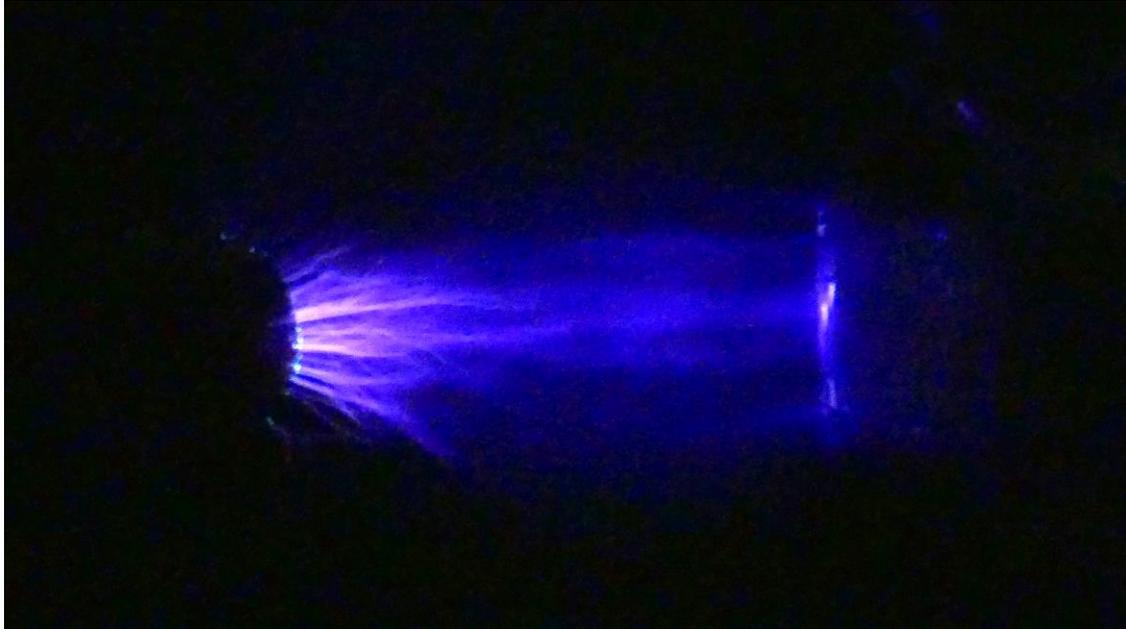
Toroid

Und nun wollen wir einmal die **Situation bei einer Kugel** anschauen:



Bei der Kugel gibt es relativ lange direkte Entladungsblitze, die wegen der Luftherwärmung nach oben steigen und abreißen.

Bei grösserer Distanz (grösser als 100mm) wird die Feldstärke so schwach, dass keine direkten Entladungsblitze mehr entstehen können. Sie bleibt aber im Bereich der Kugel immer noch so hoch, dass in der blau schimmernden hochfrequente Entladungswolke **züngelnde Teilblitze** entstehen.



Kugel

Toroid

Der ionisierte Schlauch ist bei der Kugel besonders kurz und verschwindet wegen den auf beiden Seiten vorhandenen gleichmässigen Feldstärkeverteilungen sehr bald.

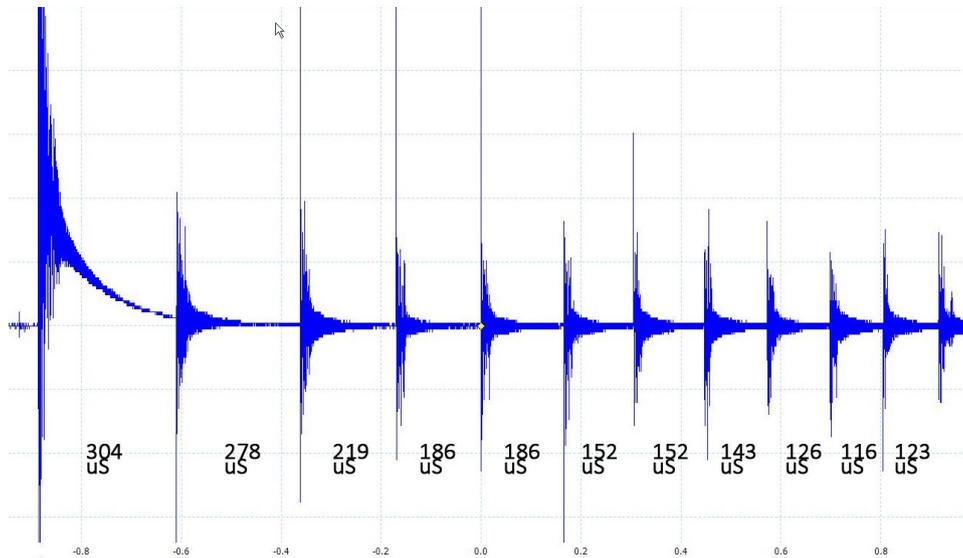
11. Einfluss der Funkenstrecke

Im Abschnitt 4 wurde anhand der Energieformeln festgestellt, dass die im Kondensator aufgenommene Energie im Quadrat mit der Funkenstrecke ansteigt. Um dies zu belegen wurde die Direktentladungsdistanz in Funktion der Funkenstrecke aufgenommen:

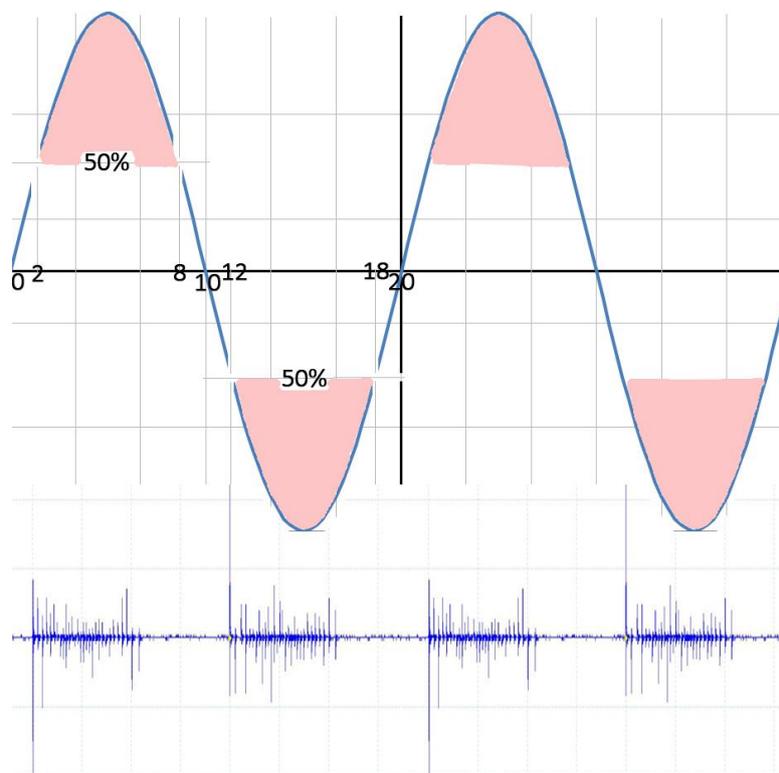
<i>Funkenstrecke in mm</i>	<i>Funkenstrecke in kVolt</i>	<i>Direktentladung in mm</i>	<i>Ausgangsspannung in kVolt</i>
2	2.4	45	54
4	4.8	74	89
4.2	5.1	85	102
5	6	88	105
6	7.2	91	109
8	9.6	93	111

Die **Funkenstrecke wird bis auf weiteres auf 4.2 mm eingestellt**, wodurch eine Ausgangsspannung von 102 kVolt erreicht wird.

Die Ausgangsenergie wird aufgebaut durch **viele kleine in Serie folgende Energieimpulse**, deren Grösse und Länge von der Funkenspannung abhängt. Die bisher festgestellte maximale Anzahl dieser Energieimpulse in einer Serie liegt bei 12 Stück, wobei ihre Länge und ihr Abstand kontinuierlich von ca. 350 bis 150 ms abnimmt.



Stellt man diese Impulserien in Relation zur speisenden Hochspannung dar, so sieht man, dass diese **Impulserien immer mit dem Überschreiten der Zündspannung beginnen und vor dem Unterschreiten der Zündspannung aufhören**. Dieser Zeitraum wird aber nie völlig ausgenutzt, da die Spannung am Kondensator gegen Ende vermutlich nicht mehr den Wert erreicht um die Funkenstreck zu zünden.



Der periodische Ablauf entsteht vermutlich durch die unmittelbar aufeinanderfolgenden Lade und Entladezyklen des Primärkondensators während der Zeit, wo die einspeisende Hochspannung über dem Zündspannungspunkt liegt. Etwas genauer betrachtet, besteht ein Zyklus aus einer Lade- und einer Entladeperiode des Kondensators, welche vom momentanen Wert der Hochspannung abhängt. Hier dürfte auch der Grund für die kontinuierliche Abnahme der einzelnen Zyklenlängen zu finden sein.

Löscht nun die Funkenstrecke am Ende eines Energiepaketes nicht schnell genug (zerhackt oder langsam), so wird die folgende Ladung des Kondensators gestört. Er kann dadurch nicht genug Energie aufnehmen und weitergeben wodurch die Ausgangsleistung und damit auch die Durchschlagslänge am Toroid sinken.

Die **Funkenstrecke muss** daher so aufgebaut sein, dass sie **schnell löschen** kann. Dies kann erreicht werden, indem die Wärme und die ionisierte Luft möglichst rasch abgebaut wird. Mit einer **Aufteilung der Funkenstrecke in mehrere kleinere Durchschlagsstrecken** liesse sich die Wärme reduzieren was automatisch auch zu kleinerer Ionisation führen würde.

Ein interessanter Faktor ist auch die Länge der Funkenstrecke. Bei kleinen Längen steht mehr Zeit zur Energieübertragung zur Verfügung. Bei grossen Längen beinhalten die Impulse wegen der höheren Spannung mehr Energie und werden länger. Gleichzeitig gibt es weniger Impulse weil das Zeitfenster kürzer wird. Da die Energie eines Kondensators im Quadrat mit der angelegten Spannung steigt, muss angenommen werden, dass eine **grosse Funkenstrecke** auch zu **mehr Ausgangsleistung** führt.

Es wird versucht eine aufgeteilte Funkenstrecke aufzubauen.

12. Einfluss des primären Schleifenwiderstand

Im Abschnitt 4 wurde anhand der Energieformeln festgestellt, dass die von der Spule aufgenommene Energie im Quadrat mit dem Spulenstrom steigt. Um dies zu belegen wird die Ausgangsleistung des Tesla-Transformers bei verschiedenen Schleifenwiderständen gemessen. Hier die gefundenen Messwerte:

<i>Primärschleife</i>	<i>Direktentladung in mm</i>	<i>Spitzenstrom in kA</i>
0,5 Ohm (normal)	42 cm	95 kA (100%)
1,5 Ohm	40cm	15,8 kA (12%)
5,5 Ohm	32 cm	3,6 kA (4%)
10 Ohm	30 cm	1,8 kA (2%)

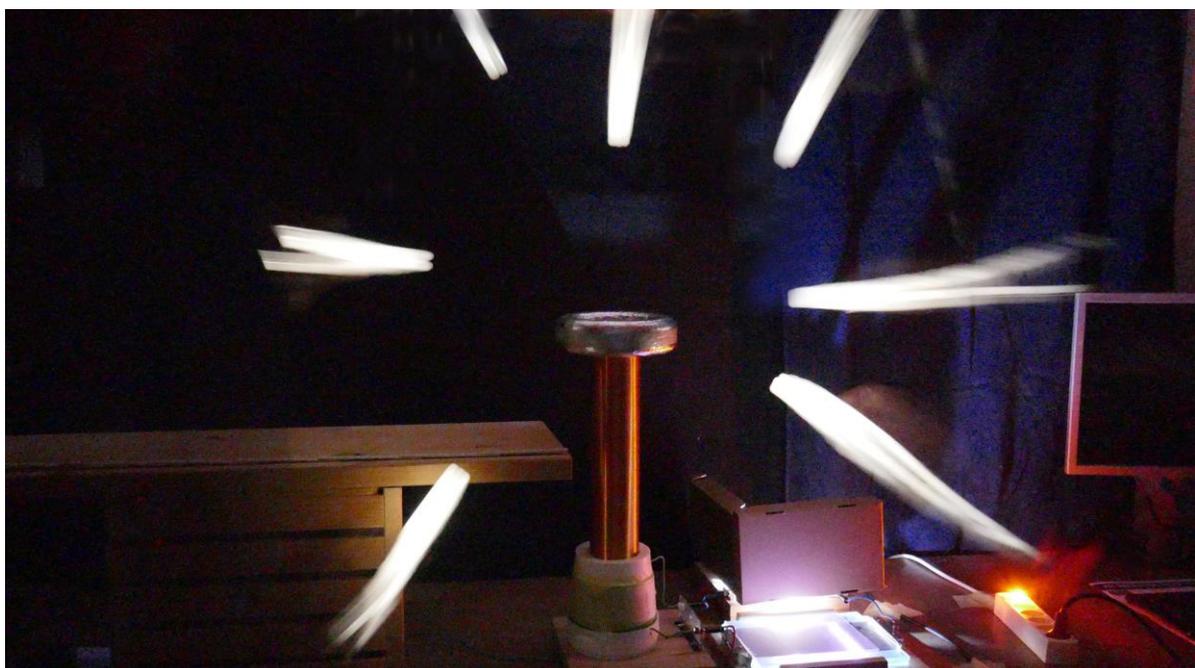
Der Versuch bestätigt die Annahme, dass durch Vergrössern des Schlaufenwiderstandes die Sekundärspule eine kleinere Leistung erhält und die Direktentladungsdistanz zum Toroid um bis zu 30 % absinken.

Dieser Versuch zeigt, dass ein niederohmiger Primärkreis die Ausgangsspannung erhöhen kann. Gegenwärtig besitzt die Primärspule einen Querschnitt von 4 mm^2 . Eine Verdoppelung des Querschnittes müsste daher zu einer Verdoppelung der Ausgangsspannung führen! Aber Vorsicht, hier spielt wegen der hohen Frequenz der Skin-Effekt bereits eine Rolle!

13. Messung des umgebenden Feldes

Messung mit einer Sparlampe:

Um das Feld um den Tesla-Transformer sichtbar zu machen und den Feldverlauf visuell darzustellen wurden photographische Aufnahmen mit einer bewegten Sparlampe gemacht. Dabei kam folgendes Resultat heraus:



Die Aufnahme zeigt, dass die Sparlampe rund um den Toroid bei einem Abstand von 70 cm zu flackern beginnt und nach innen immer heller wird. Ein immenses **Feld von gegen 2 Meter!**

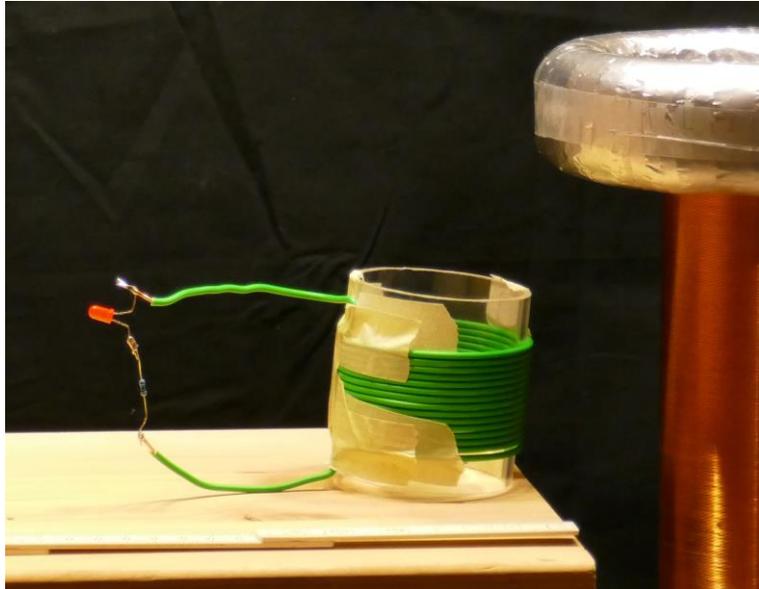
Spannungsmessung mit einer beweglichen Spule mit 10 Wdg:

<i>Achsenabstand zur Sekundärspule</i>	<i>Spannungsspitzen Achse parallel auf dem KO in V</i>	<i>Hüllkurvenlängen parallel zur Achse auf dem KO in μS</i>	<i>Spannungsspitzen rechtwinklig zur Achse auf dem KO in V</i>
35 cm	6 V	40 μS	?
70 cm	4 V	20 μS	5 V
140 cm	3 V	10 μS	3 V

Die gemessenen **Spannungswerte nehmen mit der Distanz (exponentiell) ab**. Die Ausrichtung der Spule spielt erstaunlicherweise keine so grosse Rolle.

Versuch mit einer LED:

Eine an die Messspule direkt angeschlossene **LED beginnt bei einem Spulenabstand von 25 cm zu leuchten**. Die Helligkeit nimmt beim Annähern laufend zu.! Was konkret heisst, dass Energie übertragen wird.



Damit eine LED zu leuchten beginnt benötigt sie ca. 2 Volt und 2 mA. Bei einer mittleren Energieimpulslänge von 0,3 mS sind das **1,2 μ W** was in etwa einer Energieaufnahme von 0,0052 kWh oder **5.2 Joule** entspricht (1 Joule = 1 Ws)