

Teslatransformator

Der Teslatransformator ist besonders dadurch charakterisiert, dass er als eindruckliches Demonstrationsexperiment den Unterricht bereichert. Durch die Verwendung zweier in Resonanz gebrachter Schwingkreise ist es möglich extrem hohe Spannungen von mehreren hundert Kilovolt zu erzeugen. Die hohen elektrischen Feldstärken führen zu Koronaentladungen in der Luft.

A) Beschreibung des Experiments

Abgesehen vom beeindruckenden Lichtschauspiel (Koronaentladungen in der Luft) verfolgt der Teslatransformer neben seiner Rolle als Demonstrationsexperiment auch einen lernwirksamen Nutzen. Viele Technische Anwendungen besitzen Gemeinsamkeiten mit der Funktionsweise des Teslatrafos. Dazu zählen das Bremssystem der Eisenbahn, der Inverter der Bildschirmhinterleuchtung eines Notebooks mit Resonanztransformator oder auch die RFID wie man sie in jedem Einkaufscenter in der Nähe der Kassen findet.

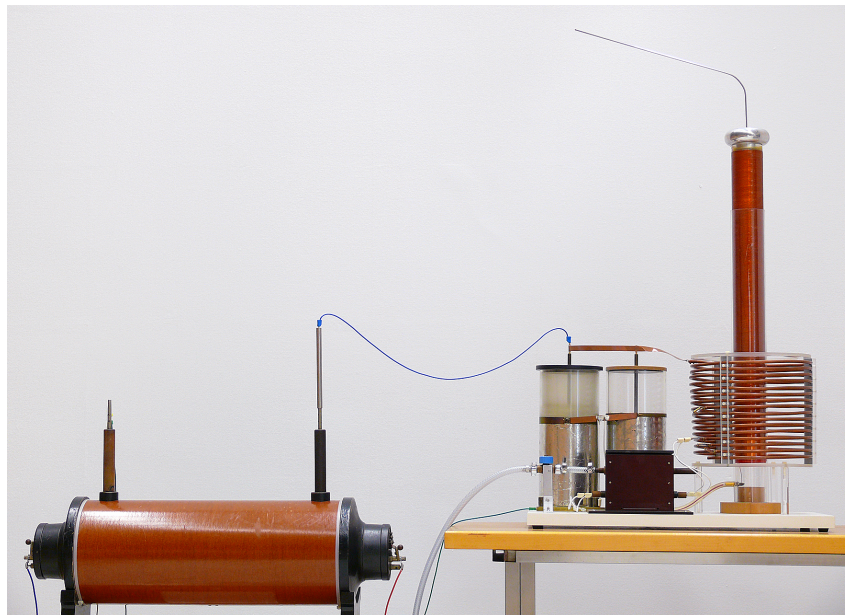


Abbildung 1: Teslatransformator der ETHZ

B) Physikalische Grundlagen

Dieser Teslatransformator arbeitet mit einer sehr hohen Frequenz von 413 kHz. Die Verwendung eines Eisenkerns zur Kopplung zwischen den Spulen, wie in einem konventionellen, ist hier nicht möglich, denn durch die hohe Frequenz würden die umklappenden Weiss'schen Bezirke im Eisen (Bereiche gleicher Magnetisierung) das Material so stark aufheizen, dass der grösste Teil der Magnetenergie in Wärmeenergie umgewandelt würde.

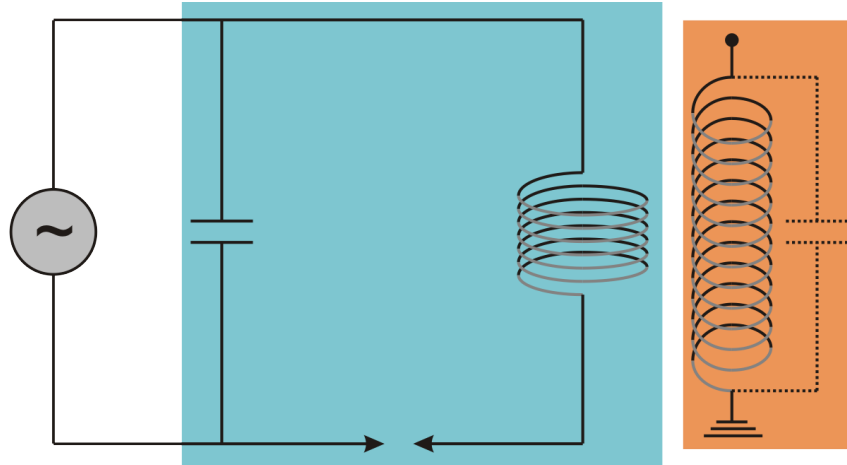


Abbildung 2: Schaltbild mit primärem Schwingkreis (rot) und sekundärem Schwingkreis (blau)

Der Aufbau des Teslatrafos ist recht simpel. Die Netzspannung von 230 V wird durch einen konventionellen Transformator hochtransformiert. Dadurch wird eine Ausgangsspannung von 10000 V erreicht, die zum Aufladen des Kondensators im primären Schwingkreis dient (siehe Abb. 2 blau eingefärbt). Weitere Bestandteile des primären Schwingkreises sind die Primärspule mit 16 Windungen und die Funkenstrecke (vgl. unten).

Die lange zylinderförmige im Magnetfeld der Primärspule liegende Sekundärspule mit 750 Windungen bildet den sekundären Schwingkreis (rot unterlegt in Abb. 2). Die Kapazität der sekundären Spule setzt sich aus der Eigenkapazität der Spule und der Kapazität zwischen Spitze der Spule und der Erde zusammen. Die Sekundärspule zusammen mit der Kopfelektrode bildet einen $\lambda/4$ -Dipol. Weil das untere Ende der Spule geerdet ist, wird dort die Spannung auf Massenpotential (es ist ein Spannungsknoten vorzufinden) gehalten. Am oberen Ende hingegen ist die Spannung bei exakter Abstimmung maximal (dort zeigt sich ein Spannungsbauch).

Für eine sehr hohe Wechselspannung an der sekundären Spule müssen die jeweiligen Größen Induktivität und Kapazität der beiden Schwingkreise derartig gewählt sein, so dass sie die gleiche Eigenfrequenz besitzen, dh. die Schwingkreise werden in Resonanz sein.

Eine Schwingungsperiode im primären Kreis vollzieht sich wie folgt:

Durch die hochtransformierte Netzspannung wird der Kondensator im primären Schwingkreis geladen, bis die Funkenstrecke zündet. In diesem Moment bildet sich eine gedämpfte hochfrequente elektrische Schwingung aus. Die Eigenfrequenz lässt sich gemäss der *Thomson Formel* für elektrische Schwingkreise mit minimaler Impedanz (Scheinwiderstand) berechnen:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad (1)$$

Diese Schwingung wird nun induktiv an die sekundäre Spule übermittelt. Es gilt zu beachten, dass nur ein Teil des magnetischen Flusses der primären Spule die sekundäre Spule durchdringt (Kopplungsfaktor ca. 10%).

Da nun die beiden Schwingkreise in Resonanz sind, wird die magnetische Energie optimal übertragen, so dass in der sekundären Spule eine Spannung induziert wird. Jedoch ist die durch das Windungszahlverhältnis der Spulen berechnete Spannung gegenüber der gemessenen Spannung noch um zwei Grössenordnungen zu klein. Es muss daher noch ein weiterer Effekt zur Erzeugung der hohen Wechselspannung von mehreren hundert Kilovolt beitragen.

Die hohe Wechselspannung lässt sich auf die *Spannungsüberhöhung* im Serienschwingkreis zurückführen. Von Spannungsüberhöhung wird gesprochen, wenn die Spannung über einer Spule bzw. über einem Kondensator grösser als die Gesamtspannung ist. Sind nun der induktive X_L und der kapazitive Widerstand X_C gleich gross (Resonanz im Serienschwingkreis, nicht zu verwechseln mit Resonanz zwischen primären und sekundären Schwingkreis), wird der Gesamtwiderstand (Impedanz) Z minimal gemäss Gleichung (2).

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \stackrel{X_L=X_C}{=} R \quad (2)$$

In diesem Fall ist nun die Spannungsüberhöhung proportional zum Gütefaktor Q ¹ im seriellen Schwingkreis. Für einen seriellen elektrischen Schwingkreis lässt sich Q wie folgt schreiben

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_L \cdot I}{R \cdot I} = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} \implies U_L = U_C = Q \cdot U \quad (3)$$

Das zweite Gleichheitszeitzeichen ist dadurch legitimiert, dass aufgrund der Reihenschaltung der gleiche Strom fliesst. Im Fall des vorliegenden Teslatransformator ist der Gütefaktor $Q = 100$, was nun die hohe Wechselspannung erklärt.

Zum Schluss noch einige Anmerkungen zur Funkenstrecke. Durch den Widerstand (im wesentlichen die Funkenstrecke) im primären Kreis und die Energieaufnahme der Sekundärspule wird die Schwingung wie bereits erwähnt gedämpft und zum Erlöschen gebracht. Damit nun der sekundäre Schwingkreis seinerseits nicht wieder den primären Schwingkreis anregt (und somit die Energie zurückgibt) muss dafür gesorgt sein, dass der Primärkreis geöffnet ist. Dies ist durch Kühlung der Funkenstrecke mittels Pressluft realisierbar. Die am Funken beteiligten Ionen werden dadurch rasch abtransportiert, was zum Erlöschen des Funkens führt.

¹Der Gütefaktor Q beschreibt den Energieverlust während einer Schwingung gegenüber der der Gesamtenergie $Q = \frac{\omega E_{ges}}{\Delta E}$

C) Anhang

Gefahren

In diesem soll Abschnitt auf die Gefahren, welche der Teslatransformator mit sich bringt, eingegangen werden. Folgende Gefahren bestehen während des Betriebes einer Teslaanlage:

- Lebensgefährliche Stromschläge bei Berührung von Bestandteilen, die Gleichspannung oder niederfrequente Wechselspannung (50 Hz) führen
- Punktuelle Verbrennungen bei Annäherung und Funkenschlag auf die Haut
- Schäden durch Ultraviolettstrahlung der Entladungen (Bindehautentzündung, Sonnenbrand, Gefahr von Hautkrebs aufgrund kurzweilliger Ultraviolettstrahlung)
- Reizung und Atembeschwerden aufgrund der Bildung von Ozon und Stickoxiden
- Durch ungünstige Umstände können HF-Ströme auch durch die Herzgegend geleitet werden. Dann besteht die Gefahr vom Kammerflimmern und Tod.

Deshalb sollte eine Teslaanlage nur von erfahrenen Personen betrieben werden und Zuschauer müssen einen hinreichenden Sicherheitsabstand zu dieser Anlage einhalten. Teslatransformatoren erzeugen eine Hochspannung mit Frequenzen im Lang- und Mittelwellenbereich und strahlen diese Frequenzen auch in Form elektromagnetischer Wellen erheblicher Leistung ab. Ihr Betrieb kann den Funkverkehr und den Rundfunkempfang stören und ist daher nur unter Auflagen gestattet.