

## Transformatoren

Die untenstehenden Fragen sollten mit Ihrem Hintergrundwissen aus den Experimentalphysik-Vorlesungen leicht beantwortbar sein. Verwenden Sie ggf. geeignete Literatur zur Vorbereitung, z.B. Schenk/Kremer: „Physikalisches Praktikum“ (als e-book in der KIT-Bibliothek erhältlich).

### A) Transformatoren

#### Aufgaben zur Vorbereitung für Teil A):

- Wie lauten die Transformatorgesetze?
- Was ist ein belasteter bzw. unbelasteter Transformator?
- Eine typische Hochspannungsleitung der Länge 1km hat einen Gesamtwiderstand von  $0,1\Omega$ . Wie groß ist dann die Verlustleistung pro km bei Strömen  $I \in \{50A, 500A, 10kA\}$  im Vergleich zur durchschnittlichen Übertragungsleistung  $P = 60MW$ ?

### B) Tesla-Transformator

#### Grundlagen: Kombination Transformator – Schwingkreis: Resonant induktive Kopplung

Bei der sog. resonant-induktiven Kopplung verwendet man einen Transformator, der gleichzeitig primär- und sekundärseitig einen Schwingkreis darstellt und von einer externen Wechselspannung angeregt wird. Abb. 1 zeigt die Schaltskizze einer solchen Kopplung:

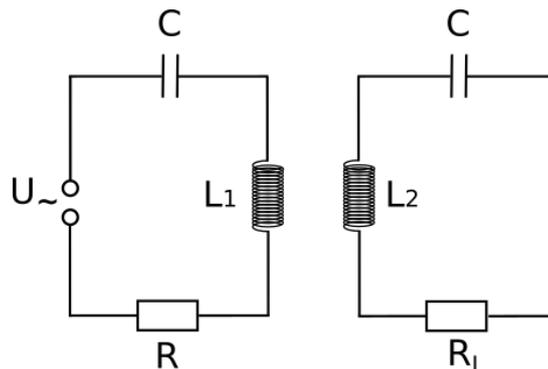


Abb. 1: Induktive Kopplung zweier angeregter Schwingkreise

Wie Sie aus Teil A) wissen, kann ein Transformator kontaktlos Energie von der Primär- auf die Sekundärseite übertragen. Beim „normalen“ Transformator geht aber ein nicht unerheblicher Teil der Energie als Blindleistung verloren (in Form von Wärme, mechanischer Verluste, etc.).

Um diesen Verlust zu minimieren, wird zusätzlich ein Kondensator eingebaut, womit jeweils auf jeder Seite ein klassischer RCL-Schwingkreis entsteht, wie in der Schaltung in Abb. 1 gezeigt. Der Widerstand

$R$  im Primärkreis dient dem Schutz vor einem Kurzschluss im Netzgerät, der Widerstand  $R_L$  stellt den Lastwiderstand (z.B. einen Verbraucher) dar.

Man kann zeigen, dass bei der **Resonanzfrequenz**

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

die Blindleistung bei einer Phasenverschiebung von  $\varphi = 0$  zwischen Strom und Erregerspannung in einem Schwingkreis verschwindet und so die größtmögliche Leistung übertragen werden kann.

Letztlich ist also ein solches induktiv gekoppeltes System ein Transformator, der auf der Primär- und Sekundärseite aus Schwingkreisen besteht, die dieselbe Resonanzfrequenz besitzen müssen, und man somit eine optimale Leistungsübertragung bei dieser Frequenz erhält. Dies sind oft viel höhere Frequenzen als die 50Hz-Stromnetz-Frequenz (kHz bis MHz Frequenzen). Dieses Verfahren ist heute technisch höchst relevant, es wird z.B. beim induktiven kontaktlosen Laden von Zahnbürsten, Mobiltelefonen, etc. verwendet. Für das Praktikum genügt es, wenn Sie die o.g. Grundlagen kennen.

### Der Tesla-Transformator: Vorläufer und Prototyp der modernen induktiv-gekoppelten Systeme

Nikola Tesla träumte um 1900 davon, die gesamte Welt mit elektrischer Energie versorgen zu können und gleichzeitig Informationen zu übertragen<sup>1</sup>. Er wollte die Energie mit wenigen großen Transformatortürmen an jeden Ort mit einem kleinen Empfänger übertragen. Nach dem ersten Prototypen, dem sogenannten Wardencllyffe Tower (s. Abb. 2), und einigen Rückschlägen mangelte es ihm jedoch an der Finanzierung für sein Projekt, da es letztlich nicht realistisch für die gedachten Zwecke verwendbar war. Heute dienen Tesla-Transformatoren als Anschauungsexperimente, ohne einen wirtschaftlichen Nutzen zu haben, wie sich im Praktikumsversuch zeigen wird. Dennoch kann Teslas Arbeit als Pionierarbeit für die moderne Realisierung von drahtloser Energieübertragung, sowie als Inspiration für die Idee der Vernetzung von Informationen weltweit, gesehen werden.



Abb. 2: Wardencllyffe Tower<sup>2</sup>

Der im Praktikum verwendete Tesla-Transformator ist ein Impuls-Tesla-Transformator, allerdings im Prinzip dem Wardencllyffe Tower nachempfunden. Die Schaltskizze des Laboraufbaus ist in Abb. 3 zu sehen. Er besteht aus einer Primärspule mit Induktivität  $L_P$  und einem Kondensator mit Kapazität  $C_P$  als Primärschwingkreis, wobei eine Funkenstrecke  $F$  zur Schwingungserzeugung dient, das ist das Prinzip eines Funkenschwingkreises<sup>3</sup>. Die Sekundärspule mit Induktivität  $L_S$  ist nur mit der Erde verbunden. Auf dem zweiten Kontakt sitzt eine freie Kugelkapazität  $C_S$ . Diese stellt über die Erde einen

<sup>1</sup> S.

[http://teslacollection.com/tesla\\_articles/1904/electrical\\_world\\_engineer/nikola\\_tesla/the\\_transmission\\_of\\_electrical\\_energy\\_without\\_wires](http://teslacollection.com/tesla_articles/1904/electrical_world_engineer/nikola_tesla/the_transmission_of_electrical_energy_without_wires), Seitenaufruf vom 27.01.23

<sup>2</sup> <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25148912>, Seitenaufruf vom 27.01.23

<sup>3</sup> S. z.B. Demtröder, Experimentalphysik 2, 3. Auflage, S. 170

Kondensator dar und vervollständigt somit den Sekundärschwingkreis. Die Sekundärspule hat wesentlich mehr Windungen ( $N = 1150$ ) als die Primärspule ( $N \leq 9$ ). Die beiden Schwingkreise bilden also einen Transformator, der die Eingangsspannung sehr stark hochtransformiert. Mit einem Hebel kann die Primärspule an verschiedenen Stellen (also Windungszahlen) abgegriffen werden. Außerdem steht eine zweite Sekundärspule zur Verfügung, die direkt auf die vorhandene aufgesetzt werden kann, wodurch man eine verlängerte Sekundärspule erhält. In der beiliegenden Geräteanleitung des Herstellers „3B Scientific“ können Sie nachlesen, wie die Schwingung im Primärkreis angeregt wird.

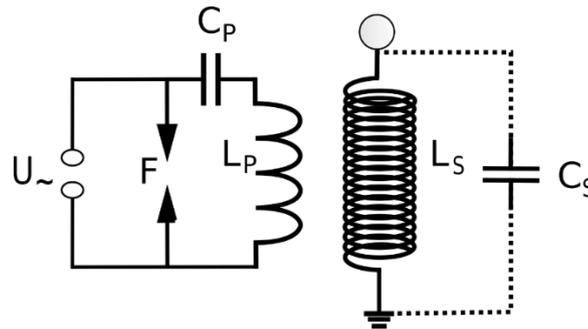


Abb. 3: Schaltskizze des Labor-Tesla-Transformators

### Aufgaben zur Vorbereitung für Teil B):

1. Der Praktikums-Teslatrafo wird mit einer Zündspule betrieben (es wird tatsächlich eine Auto-Zündspule verwendet). Sehen Sie sich die beiliegende Anleitung des Herstellers des Tesla-Trafos an. Warum wird die Zündspule benötigt? Falls Sie nicht wissen, was eine Zündspule im Verbrennungsmotor eines Autos macht, lesen Sie das idealerweise auch nach.
2. Wodurch wird die Resonanzfrequenz des Sekundärkreises festgelegt?  
Schätzen Sie die Resonanzfrequenz des Sekundärkreises ab.  
*Hinweise:* Die technischen Daten der Sekundärspule sind Windungszahl  $N = 1150$ , Länge  $l = 23,5\text{cm}$ , Durchmesser  $D = 7,5\text{cm}$ . Der Radius der Kugelkapazität beträgt  $R = 1\text{cm}$ . Die Eigenkapazität der Sekundärspule spielt zwar auch eine Rolle, darf hier aber vernachlässigt werden, da uns hier nur die Größenordnung der Frequenz interessiert.
3. **Bonusfrage:**  
Wieso können Sie trotz der 50Hz-Wechselspannung des Versorgungsnetzteils die benötigte Resonanzfrequenz erreichen, die Sie in Aufgabe 2 berechnet haben?