



Yüksek Frekanslı Yüksek Gerilim Transformatörü **Tesla Bobini Tasarımı**

Prof. Dr. Özcan Kalendarli

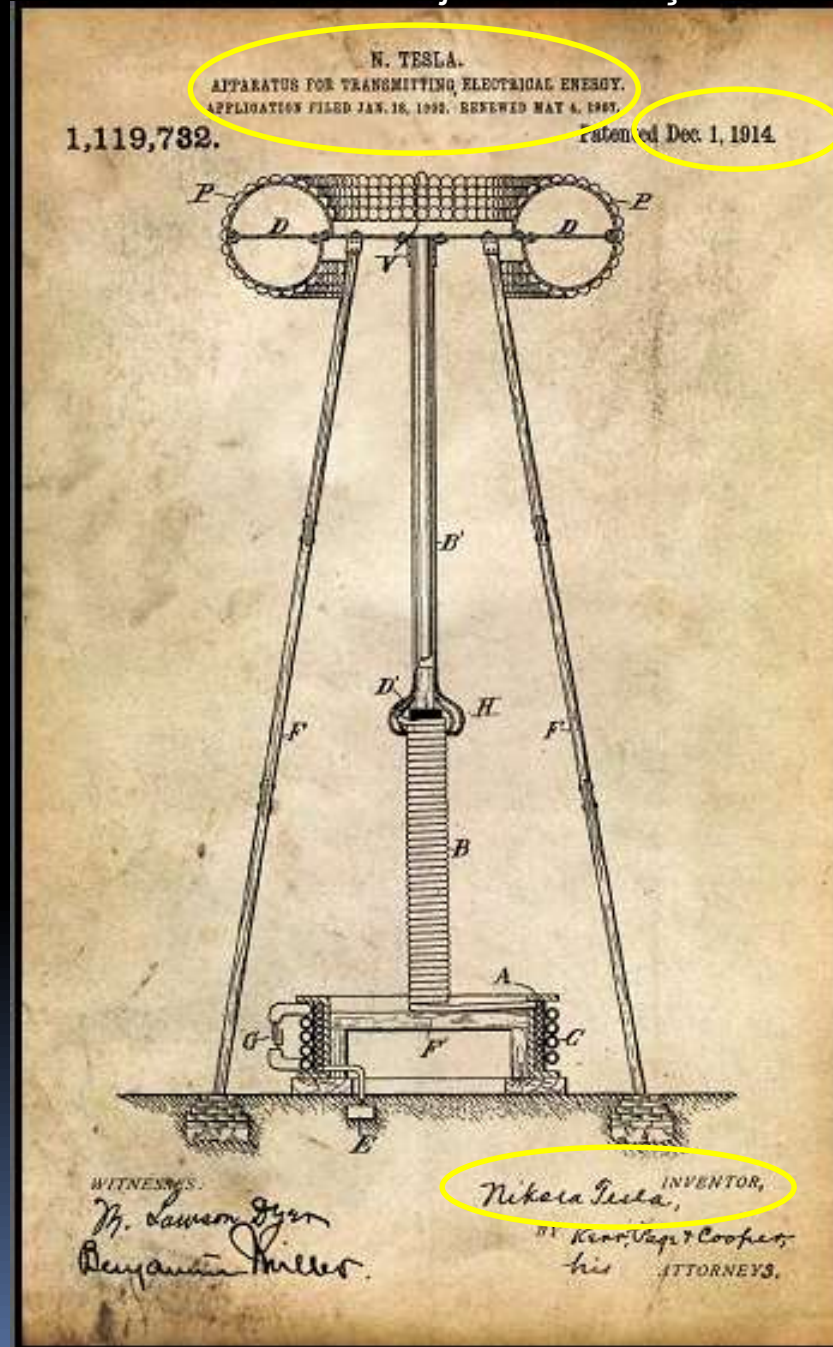
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Elektrik Enerjisi İletmek için Cihaz



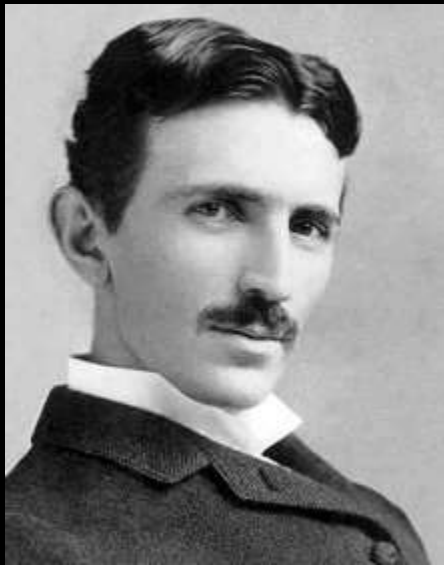
Nikola **TESLA**

1856-1943

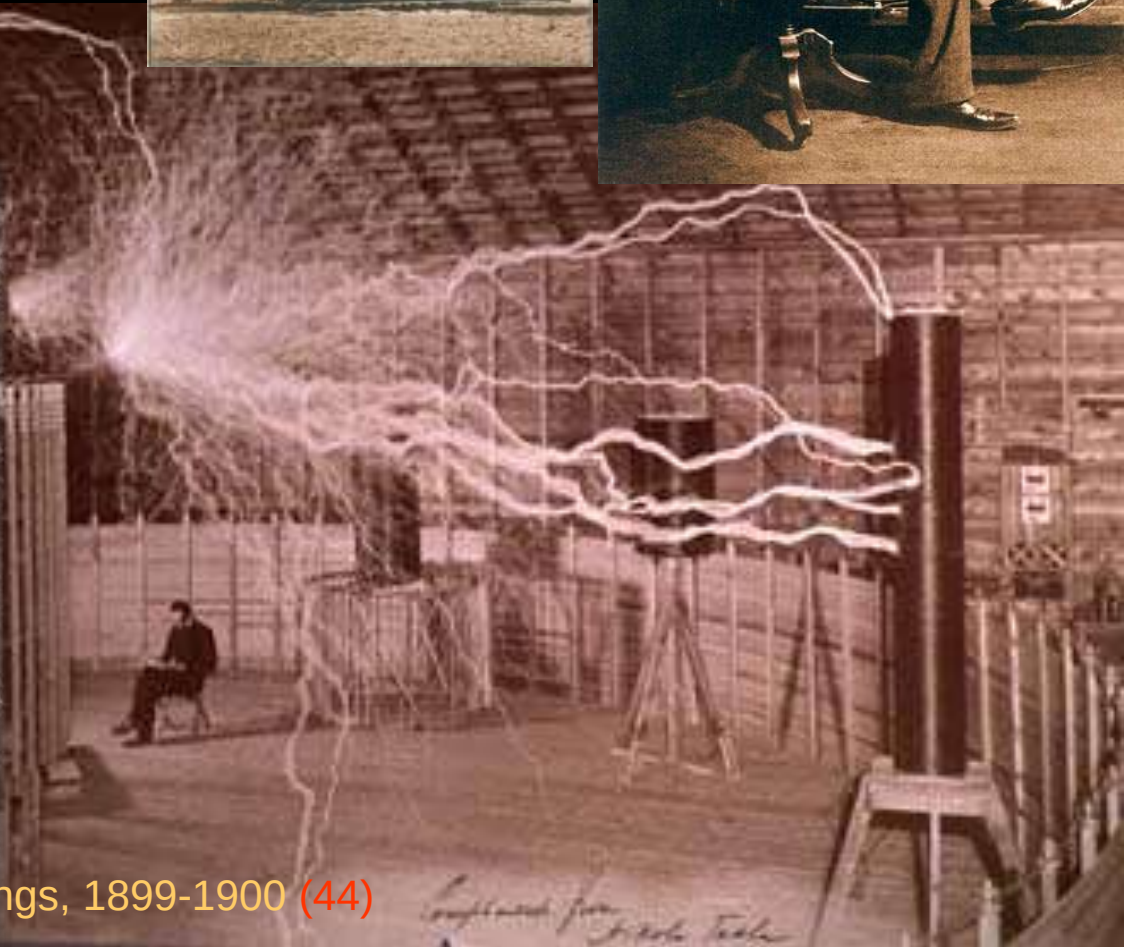
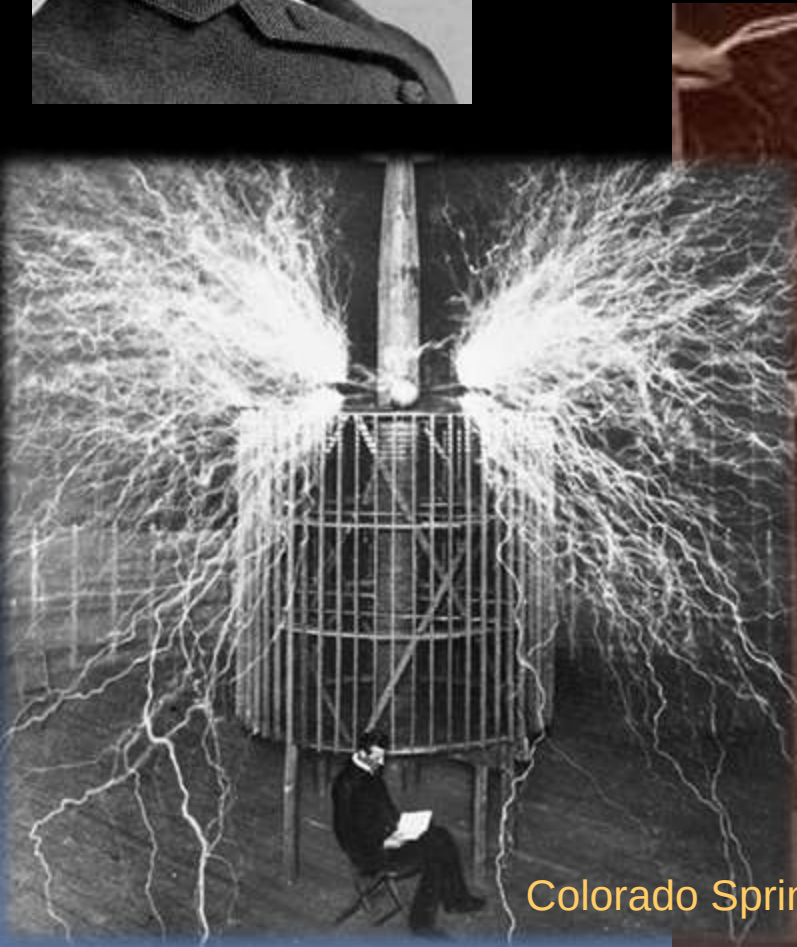


Patent Tarihi:
1 Aralık
1914

Mucit:
Nikola Tesla



Nikola **TESLA**
1890 (34)



Colorado Springs, 1899-1900 (44)

Tesla Bobini

- Yüksek doğru gerilim elde etmek için
 - Yüksek gerilim cihazlarının deneylerini yapmak için
- yüksek frekanslı yüksek gerilime gereksinim vardır

Genel olarak bu işler için kullanılan yüksek frekanslı yüksek gerilim transformatörü, Tesla bobinidir.

Tesla Bobini

Bir fazlı,
Üç fazlı değil!

Hava çekirdekli,
Demir çekirdekli değil!

Eş eksenli,
Kaçık eksenli değil!

Yüksek frekanslı ($50 \text{ kHz} < f < 400 \text{ kHz}$),
50 Hz değil!

Yüksek gerilim üretici ($U > 1 \text{ kV}$)
Alçak gerilim ($U \leq 1 \text{ kV}$) üretici değil!

Rezonans Transformatörü

Tesla Bobini

- Demir çekirdekleri olmadığı için boyut, ağırlık ve maliyet tasarrufu sağlar.
- Manyetik doyma olmadığı için saf sinüs dalgası elde edilebilir.
- Gerilim yavaşça oluştuğu için anahtarlama darbeleri nedeniyle oluşan hasar söz konusu değildir.
- Bobin boyunca düzgün gerilim dağılımı olur.

Tesla Bobini (TB) Türleri

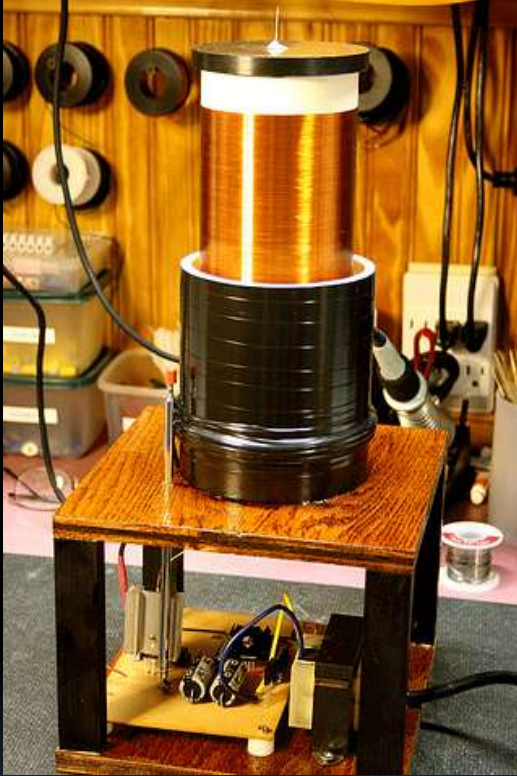


Tek-Kutuplu TB
(Mono-polar TB)



Çift-Kutuplu TB
(Bi-polar TB)

Tesla Bobini (TB) Türleri

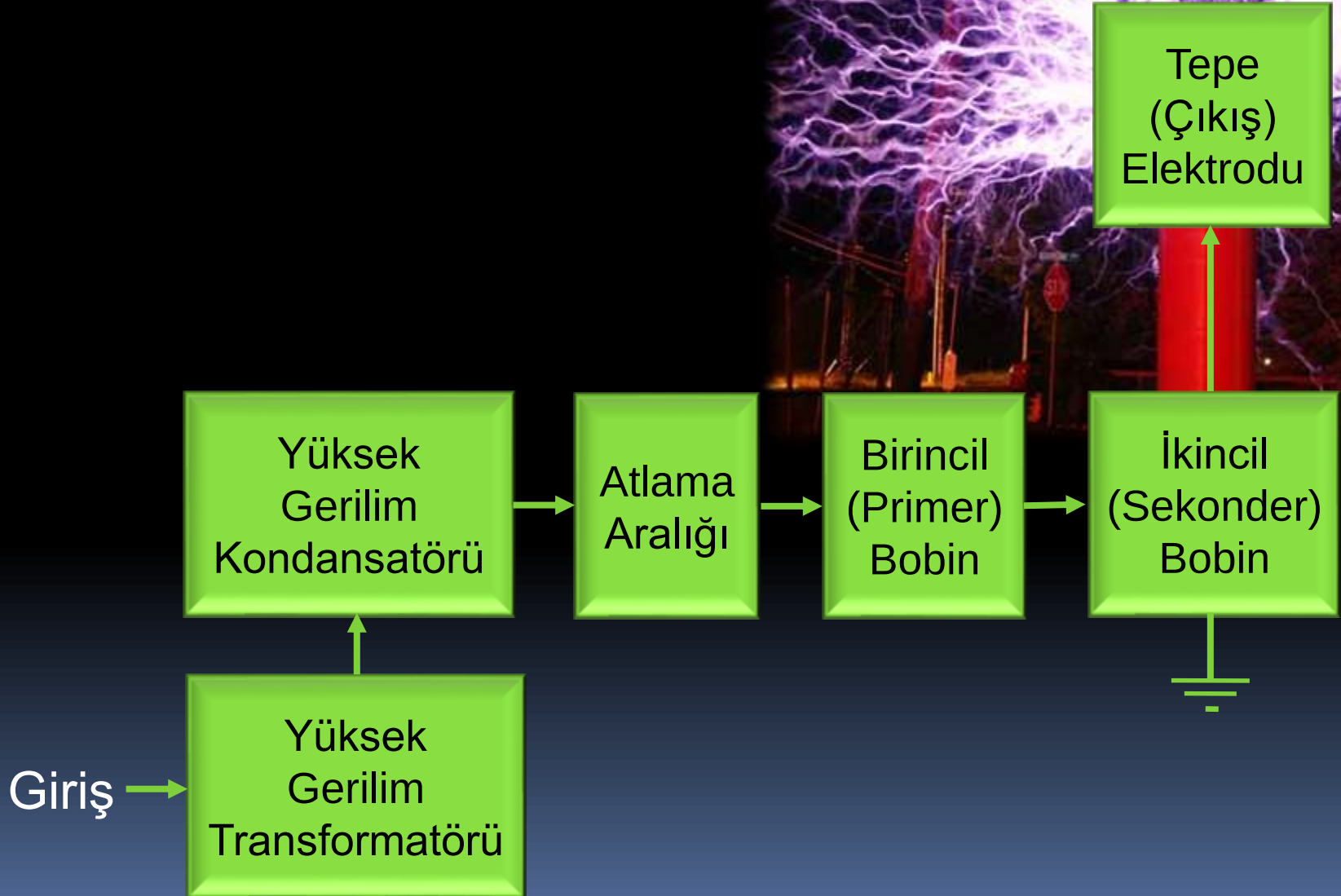


Yarı-İletken TB
(Solid-State TB)

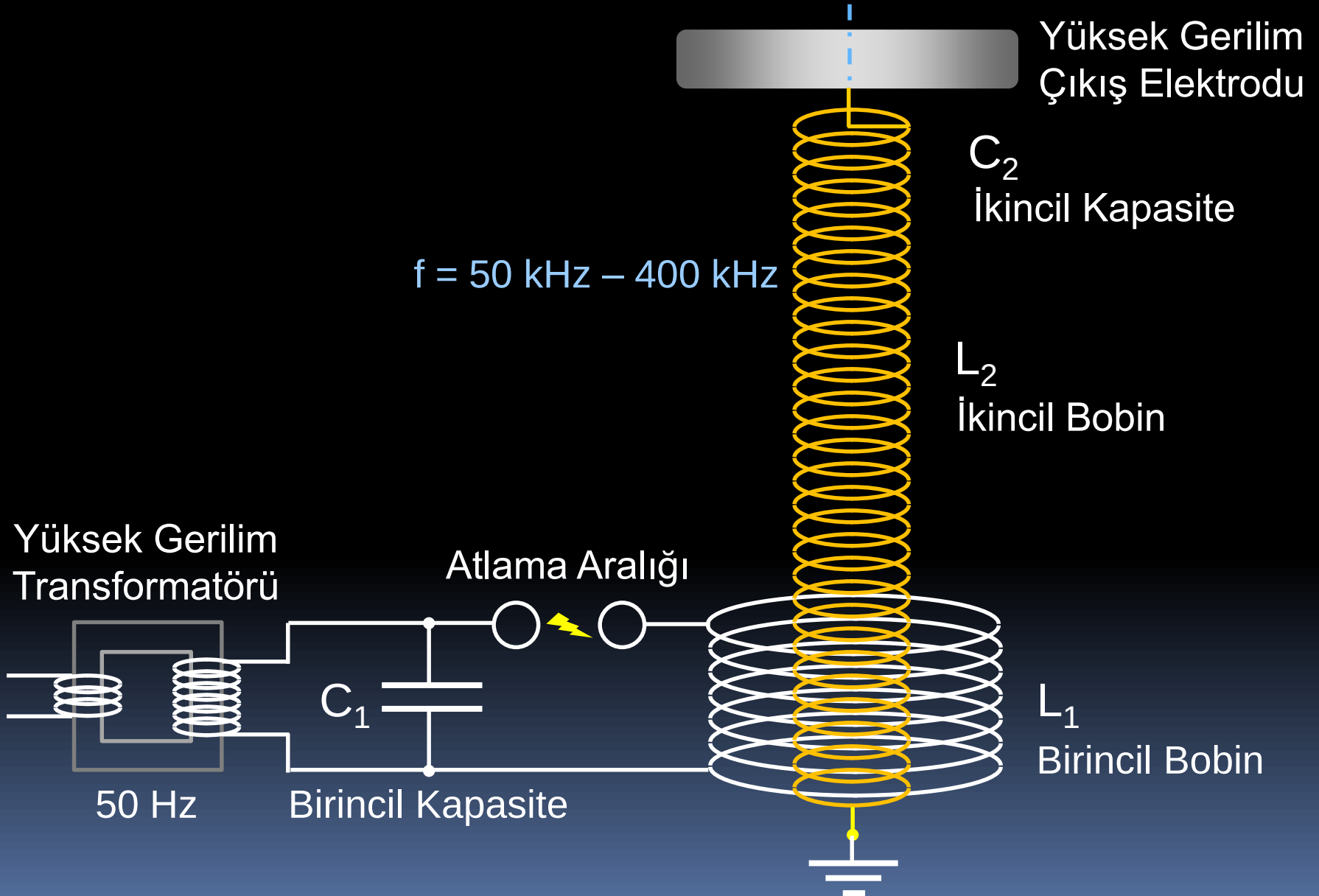


Vakum Tüplü TB

Tesla Bobini Blok Diyagramı

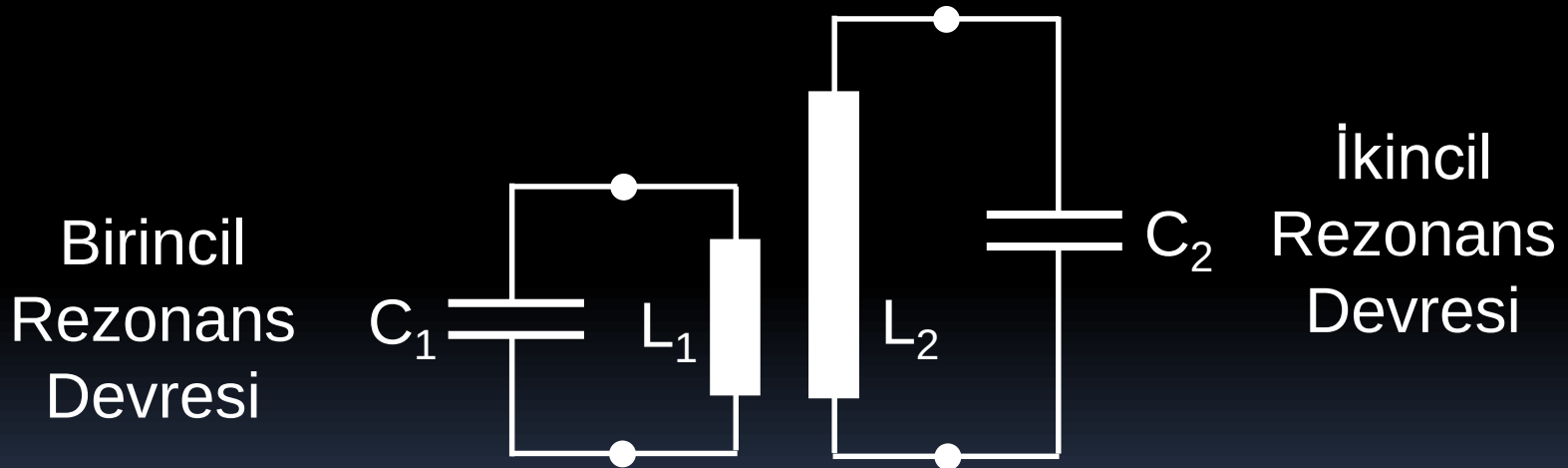


Tesla Bobini Yapısı



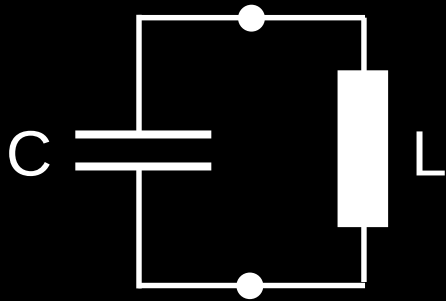
Tesla Bobini Rezonansı

Tesla Bobini, iki rezonans devresinden oluşur.
L1, C1 birincil, L2 ve C2 ikincil rezonans devresini oluşturur.



Tesla Bobini Rezonansı

Rezonans Devresi



$$X_C = X_L$$

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L$$

Rezonans Frekansı

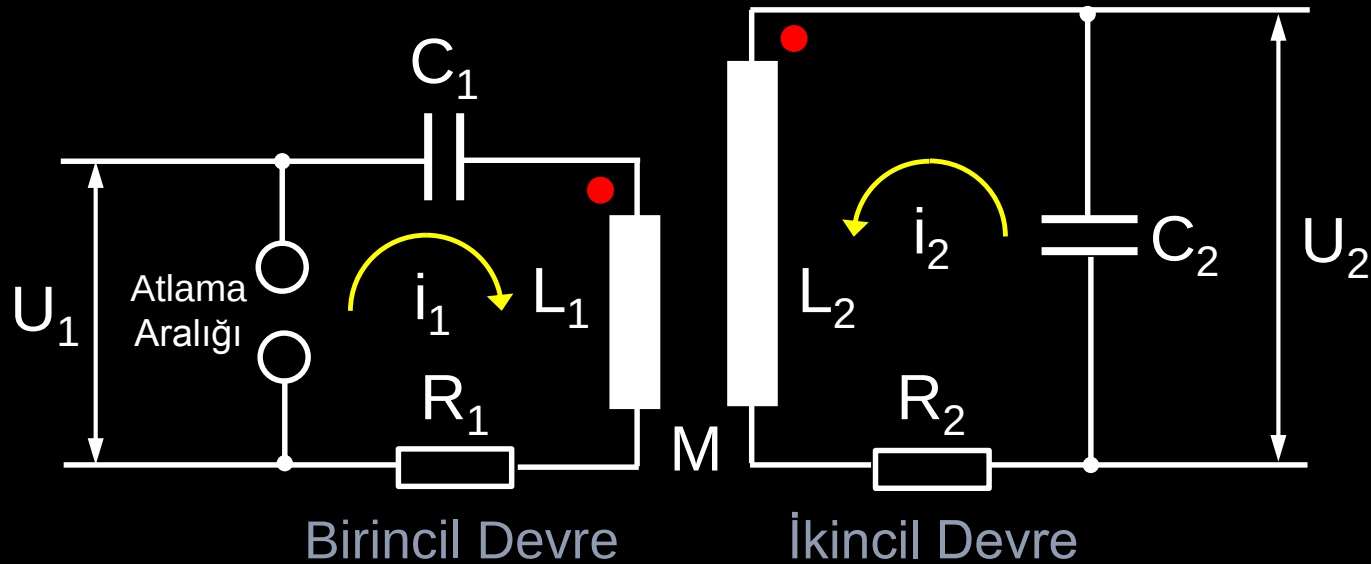
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Rezonans Koşulu

$$f_1 = f_2$$

$$L_1 \times C_1 = L_2 \times C_2$$

Tesla Bobini Devre Analizi



Kirchoff
yasası

$$U_1 = \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1$$

$$0 = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2$$

Tesla Bobini Devre Analizi

$R_1 = 0$ ve $R_2 = 0$ alarak çözüm için
denklemlerin Laplace dönüşümleri

$$\frac{U_1}{s} = \left[sL_1 + \frac{1}{sC_1} \right] I_1 + sMI_2$$

$$0 = \left[sL_2 + \frac{1}{sC_2} \right] I_2 + sMI_1$$

Tesla Bobini Devre Analizi

C_2 kondansatörünün uçlarındaki gerilim (çıkış gerilimi):

$$u_2(t) = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt \quad \xrightarrow[\text{dönüşümü}]{\text{Laplace}} \quad U_2(s) = \frac{I_2}{sC_2}$$

U_2 çıkış gerilimi:

$$u_2(t) = \frac{M \cdot U_1}{\sigma L_1 L_2 C_1} \frac{1}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2} (\cos \gamma_1 t - \cos \gamma_2 t)$$

Tesla Bobini Çıkış Gerilimi

$$u_2(t) = \frac{M \cdot U_1}{\sigma L_1 L_2 C_1} \frac{1}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2} (\cos \gamma_1 t - \cos \gamma_2 t)$$

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}} = \sqrt{1 - k^2}$$

M: Ortak endüktans

k: Kuplaj katsayısı ($0 < k < 1$)

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$$\gamma_{1,2} = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2}\right)^2 - \omega_1^2 \omega_2^2 (1 - k^2)}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

Tesla Bobini Devre Analizi

$\omega_1 = \omega_2 = \omega$ için C_2 kondansatörünün uçlarındaki gerilim (çıkış gerilimi):

$$u_2(t) = \frac{U_1}{2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} e^{-t/T} \left(\cos \frac{\omega t}{\sqrt{1-k}} - \cos \frac{\omega t}{\sqrt{1+k}} \right)$$

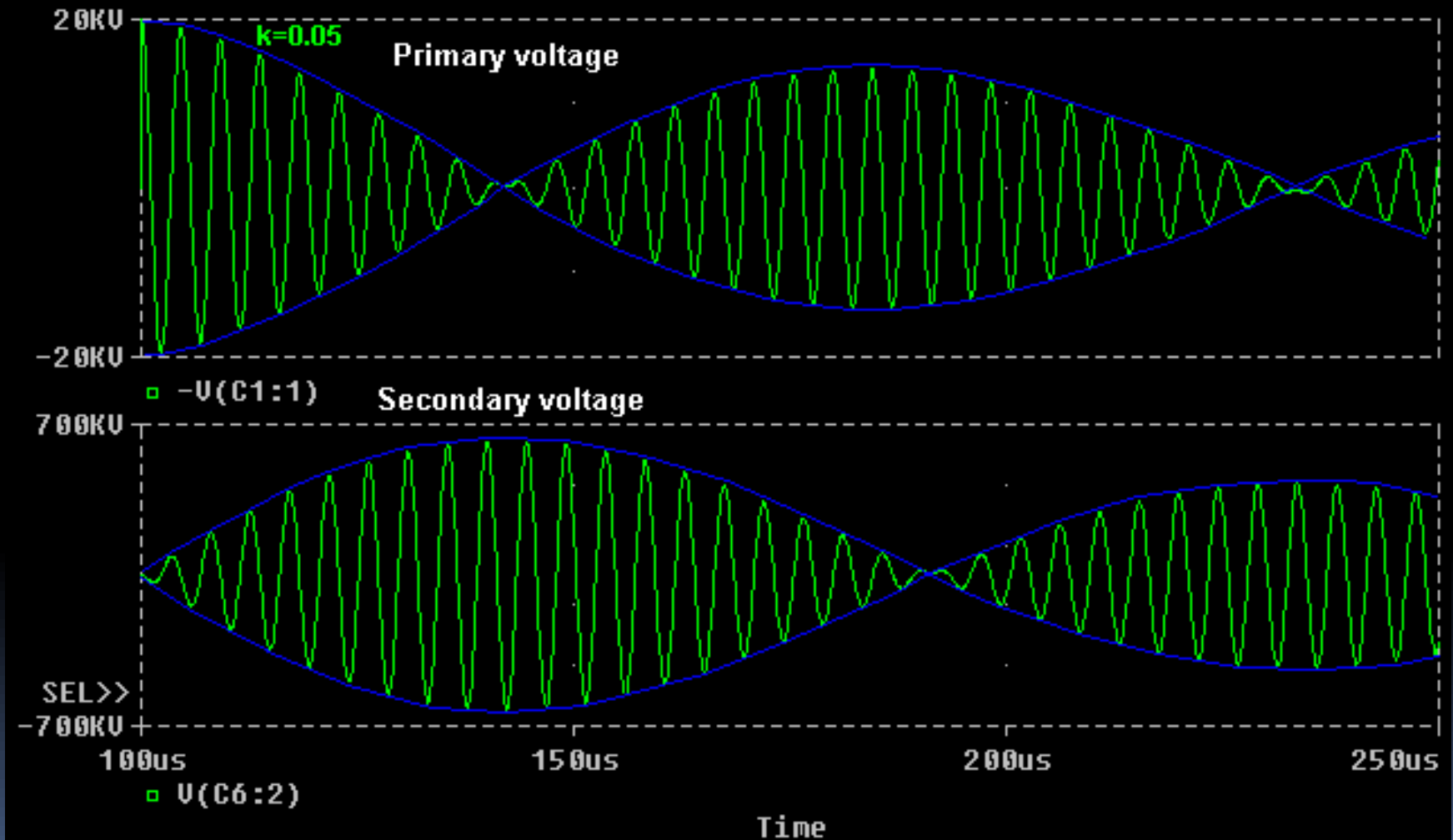
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$$T = \frac{4L_1 L_2}{R_2 L_1 + R_1 L_2}$$

Maksimum çıkış gerilimi:

$$U_{2\max} = \frac{2kU_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

Tesla Bobini Çıkış Gerilimi



Tesla Bobini Çıkış Gerilimi

Enerji Aktarımı

$$W_2 = \eta W_1 \quad \eta : \text{Verim}$$

$$W_1 = \frac{1}{2} C_1 U_1^2$$

$$W_2 = \frac{1}{2} C_2 U_2^2 = \eta \times \frac{1}{2} C_1 U_1^2$$

$$U_2 = U_1 \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}}$$

veya

$$U_2 = U_1 \sqrt{\eta \frac{L_2}{L_1}}$$

Tesla Bobininde Q

Q katsayısı (faktörü) (kalite faktörü): Salınımlar sırasında devrede biriktirilen enerji ile harcanan enerji arasındaki oranı gösterir.

$$Q = \frac{P_{\text{biriktirilen}}}{P_{\text{harcanan}}} = \frac{XI^2}{RI^2} = \frac{X}{R}$$

$$Q = \frac{1/\omega C}{R} = \frac{1}{\omega RC} = \frac{\omega L}{R}$$

X: rezonans frekansında kapasitif veya endüktif reaktanstır

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Teorik olarak $R = 0$ ise Q sonsuz olur.

Tesla Bobini Tasarımı

Tesla Bobini Elemanları

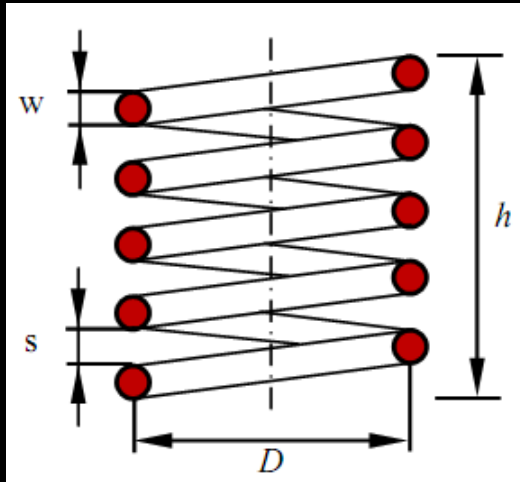


- 1) Transformatör
- 2) Birincil bobin
- 3) Birincil kapasite
- 4) İkincil bobin
- 5) İkincil kapasite
- 6) Atlama aralığı

Bobin Seçenekleri

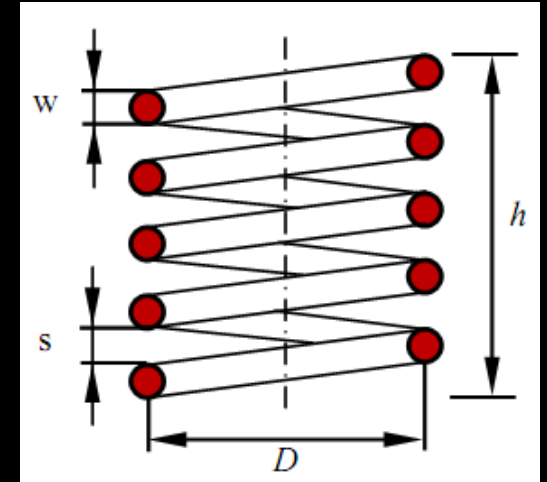
Birincil bobin için

1

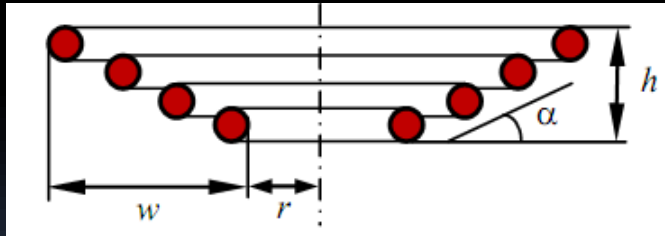


Helisel bobin

İkincil bobin için

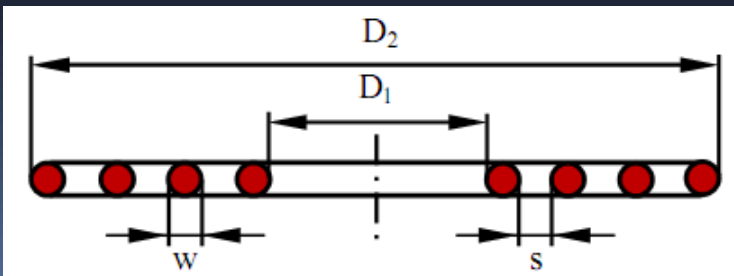


2



Ters konik bobin

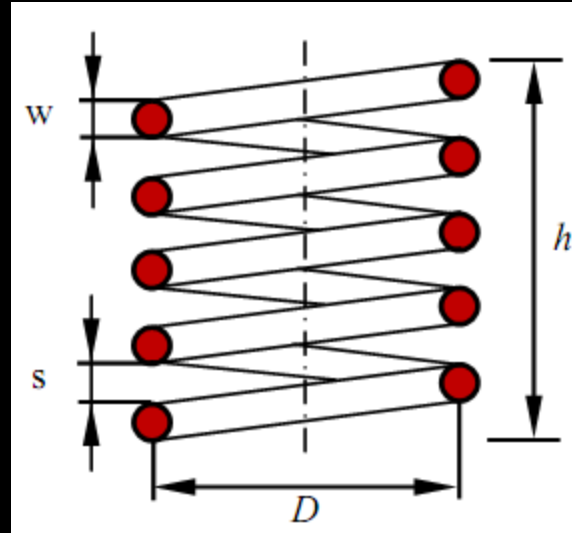
3



Spiral bobin

Helisel İkincil Bobin (L2)

Helisel bobin



n : sarım sayısı

Helisel bobinin
endüktansı

$$L = \frac{n^2 \times r^2}{9r + 10h}$$

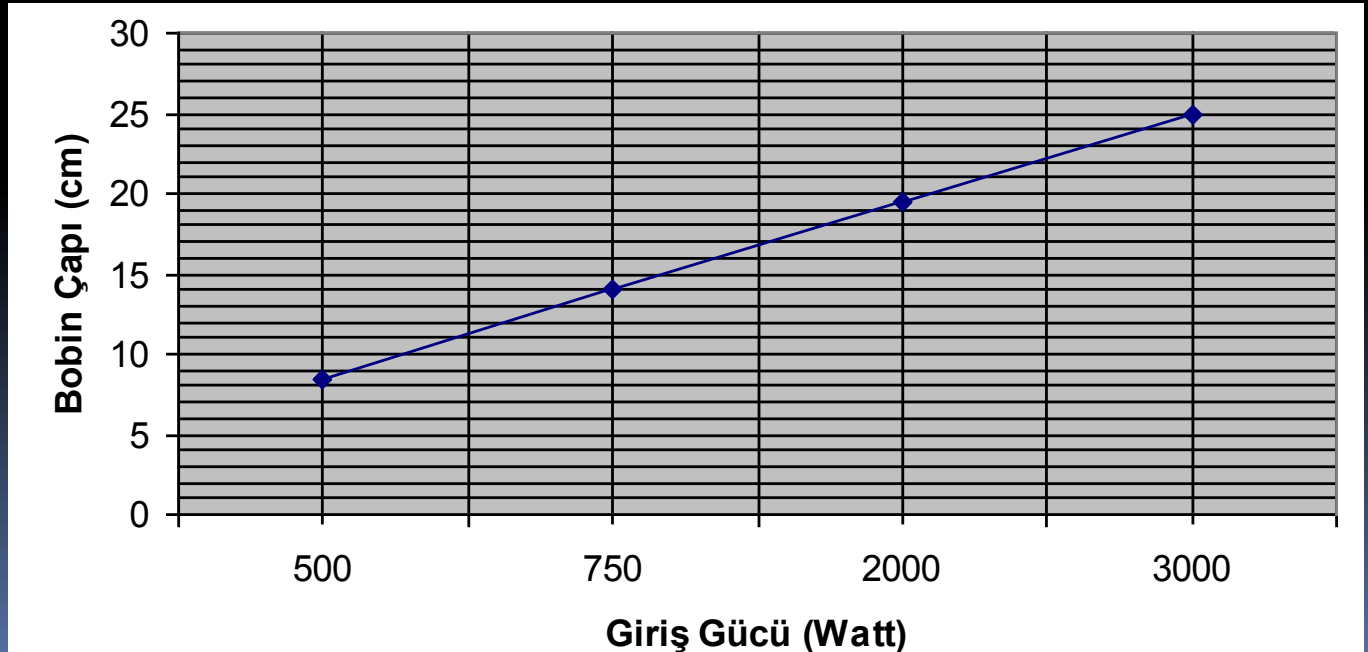
Wheeler denklemi

$$r = \frac{D}{2}$$

İkincil Bobin (L2) Çapı



Giriş Gücü	İkincil Bobin Çapı
500 VA'dan küçük	7,5 – 10 cm
500 VA- 1500 VA	10 – 15 cm
1500 VA - 3 kVA	15 – 25 cm
3 kVA ve üstü	25 cm ve üstü



İkincil Bobin (L2) Boyutları



İkincil Bobin Boyutları

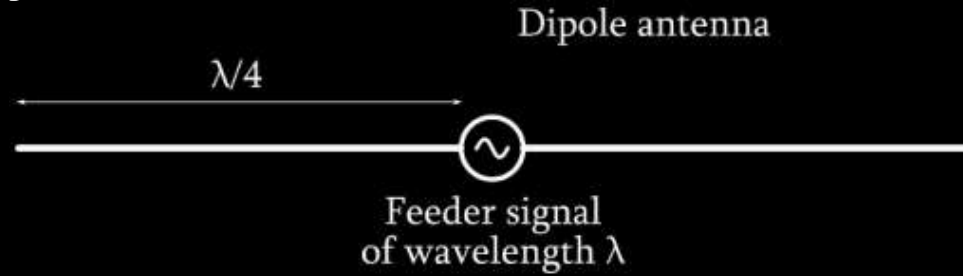
Bobin Çapı	Bobin Uzunluğu	Çap/ Uzunluk Oranı
7,5 cm	45 cm	1/6
10 cm	50 cm	1/5
15 cm	60 cm	1/4
20 cm ve üstü	60 cm ve üstü	1/(3 – 5)

İkincil Bobin (L2) Tel Uzunluğu

Çeyrek dalgaboyu ($\lambda/4$) koşulu:

c: Işık hızı, $c = 3 \times 10^8$ m/s

f: Rezonans frekansı (Hz)



$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{(c / f)}{4} = \text{İkincil bobinin tel uzunluğu (m)}$$

Rezonans frekansı f [Hz]	Tel uzunluğu l [m]
100 kHz	750 m
150 kHz	500 m
200 kHz	375 m
250 kHz	300 m

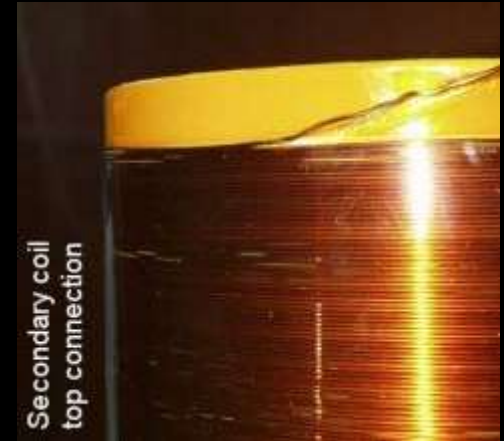
İkincil Bobin (L2) Tel Ölçüleri



Enameled Copper Wire

AWG	mm	inch
16	1.3264	0.0522
17	1.1851	0.0467
18	1.0592	0.0417
19	0.9472	0.0373
20	0.8474	0.0334
21	0.7585	0.0299
22	0.6794	0.0267
22.5	0.6431	0.0253
23	0.6089	0.024
23.5	0.5766	0.0227
24	0.5461	0.0215
24.5	0.5174	0.0204
25	0.4902	0.0193
25.5	0.4646	0.0183
26	0.4405	0.0173
26.5	0.4176	0.0164
27	0.3961	0.0156
28	0.3567	0.014
29	0.3215	0.0127
30	0.2902	0.0114

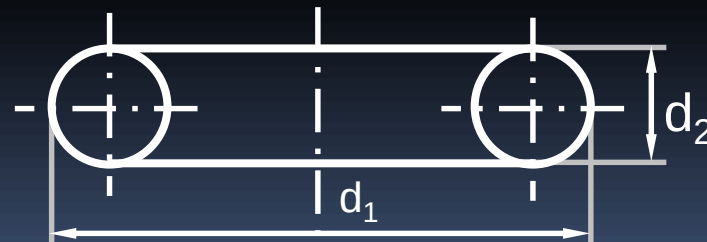
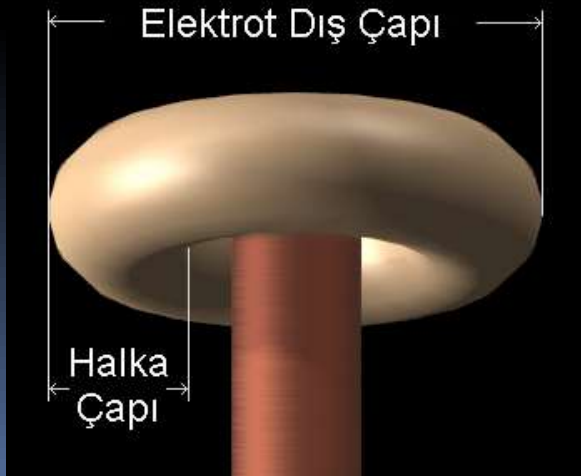
ikincil Bobin (L2)



İkincil Kapasite (C2)

İkincil bobinin
özkapasitesi Medhurst denklemi
 $C_{2a} = 0,01 \times h + 0,062 \times r$

Halka (toroid)
çıkış
elektrodunun
kapasitesi Bert Pool denklemi
 $C_{2b} = 1,4 \times \left(1,278 - \frac{d_1}{d_2}\right) \sqrt{0,00155 \pi d_2 (d_1 - d_2)}$



İkincil Kapasite (C2)



Küre elektrot

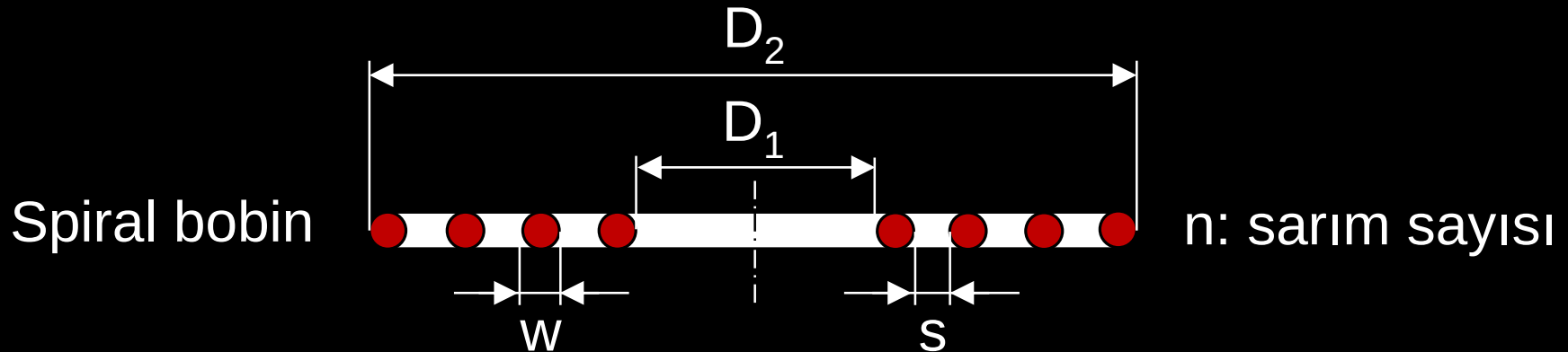
$$C_{2b} = 4\pi\epsilon \times R = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \times R$$

Eşdeğer çıkış kapasitesi

$$C_2 = 0,9 \times (C_{2a} + C_{2b})$$



Spiral Birincil Bobin (L1)

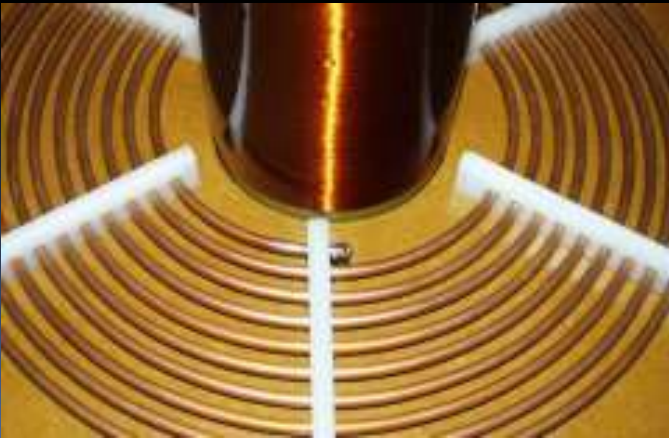
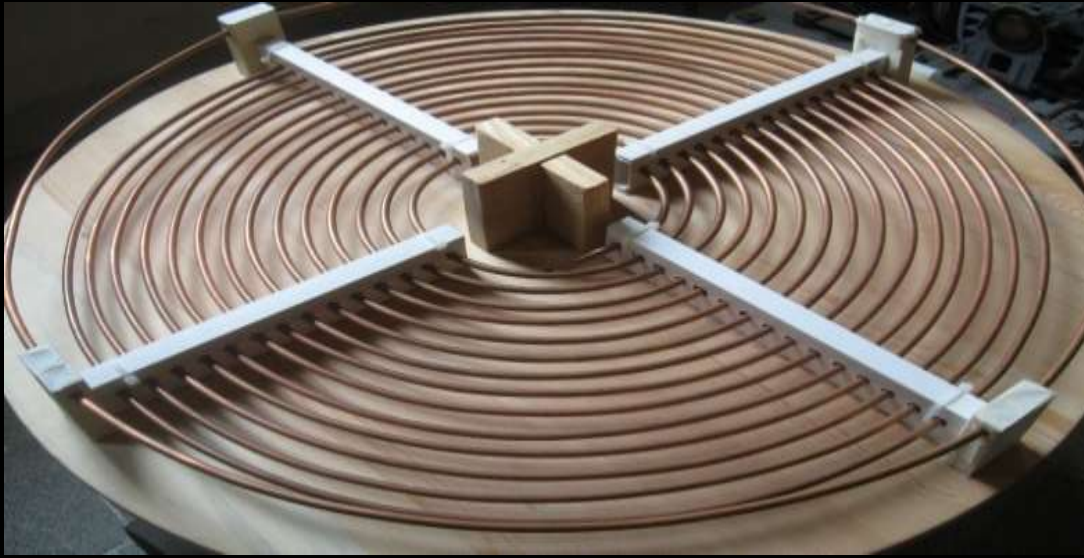


Spiral bobinin endüktansı

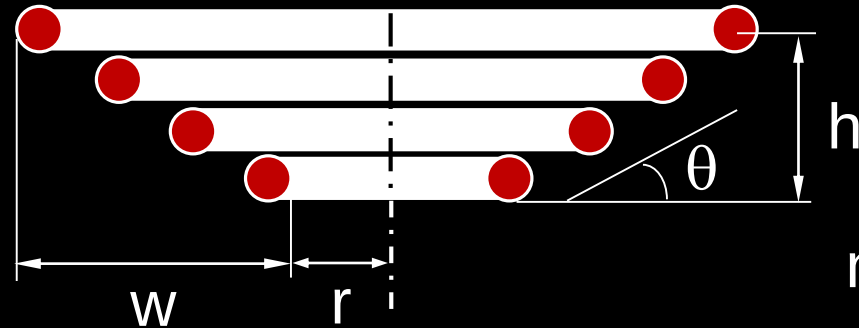
$$L = \frac{n^2 \times A^2}{30A - 11D_1} \quad [\mu H]$$

$$A = \frac{1}{2}[D_1 + n(w + s)]$$

Birincil Bobin (L1) Örnekleri



Ters Konik Birincil Bobin (L1)



n : sarım sayısı

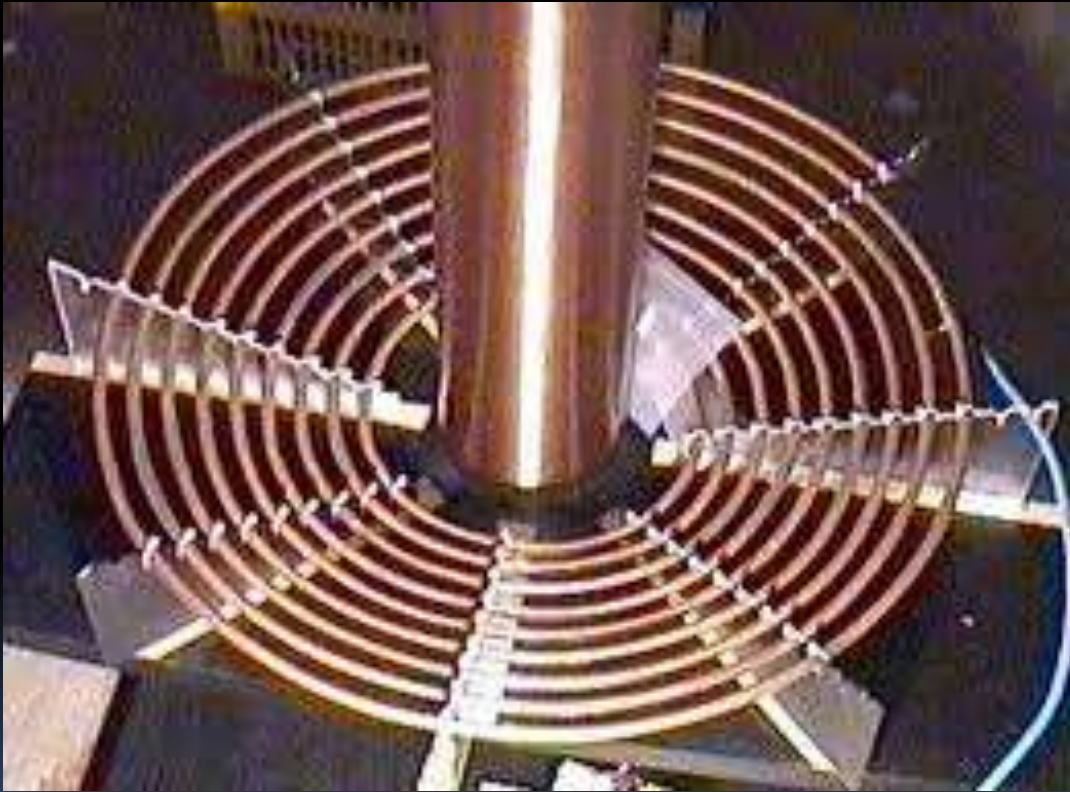
Ters konik bobinin
endüktansı

$$L = \sqrt{(L_1 \sin \theta)^2 + (L_2 \cos \theta)^2} \quad [\mu H]$$

$$L_1 \cong 0,03937 \frac{(n \cdot r)^2}{9r + 10h}$$

$$L_2 \cong 0,03937 \frac{(n \cdot r)^2}{8r + 11w}$$

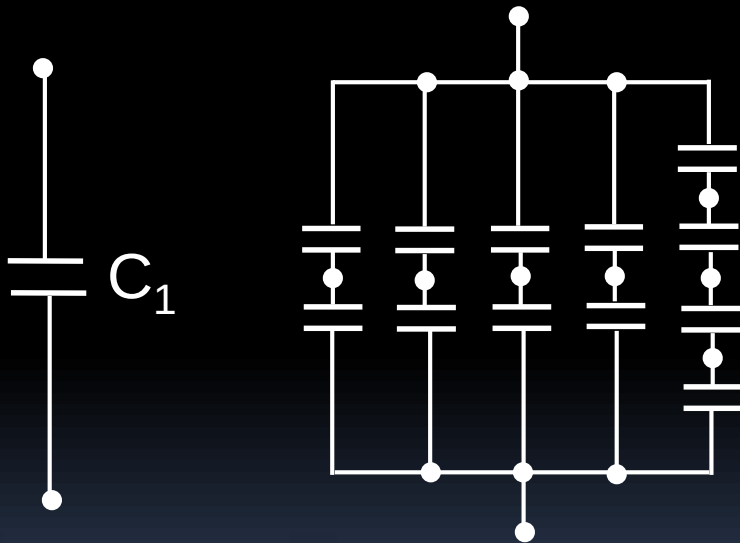
Ters Konik Birincil Bobin (L1)



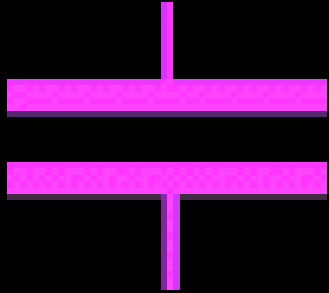
Birincil Kapasite (C1)

$$C = \frac{1}{2\pi f \times Z}$$

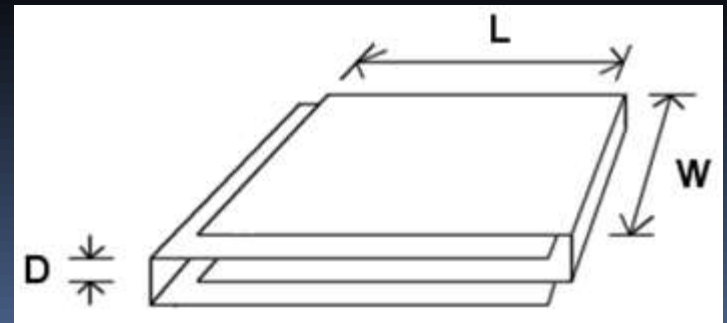
$$Z = \frac{U}{I}$$



Birincil Kapasite (C1)

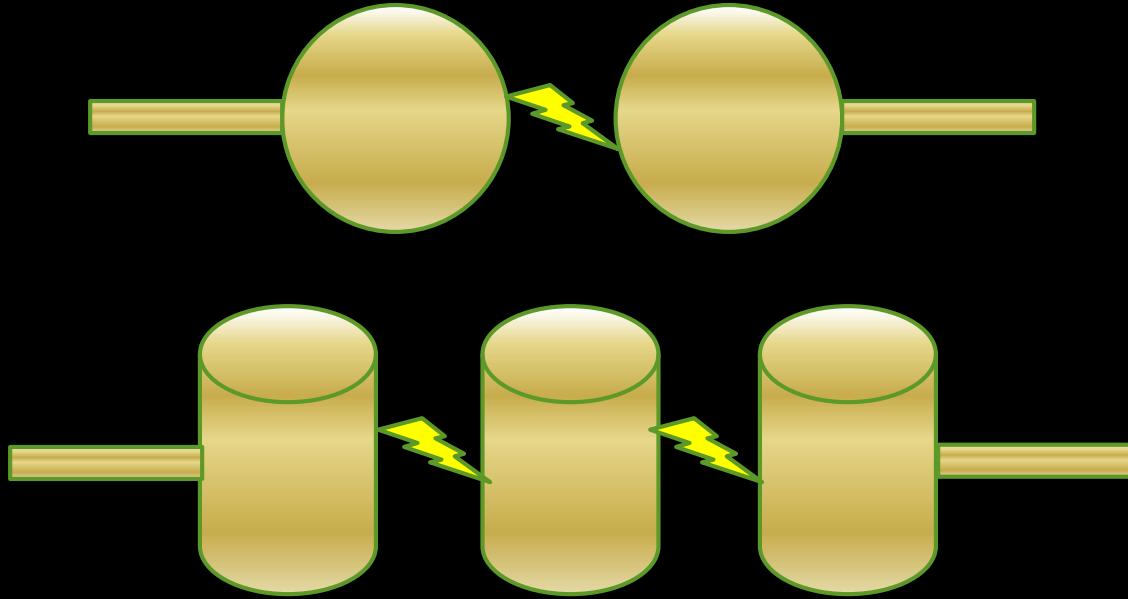


- Düzlemsel Kondansatör
- Küresel Kondansatör
- Silindirsel Kondansatör
- Multi-Mini-Capacitor (MMC)
- Tuzlu Su Çözeltili Kondansatör
- Cam Kondansatörler
- Polietilen Kondansatörler ...



Atlama Aralığı

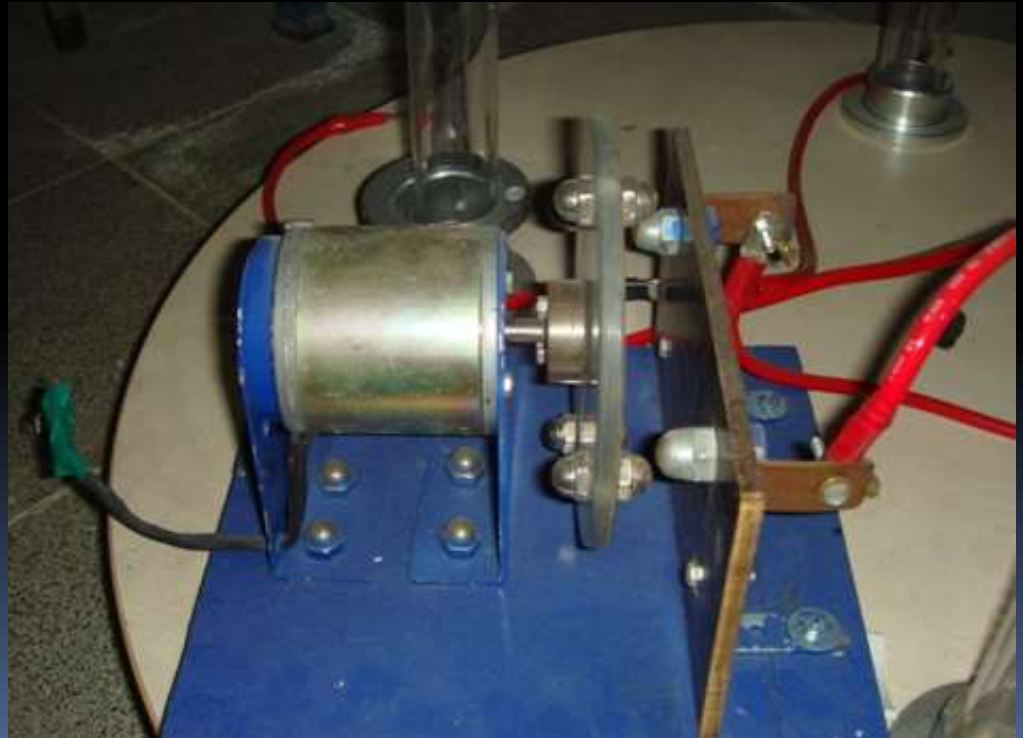
- Statik atlama aralığı
 - Tek aralıklı
 - Çok aralıklı



- Döner atlama aralığı
- Yarıiletken anahtarlama
- ...

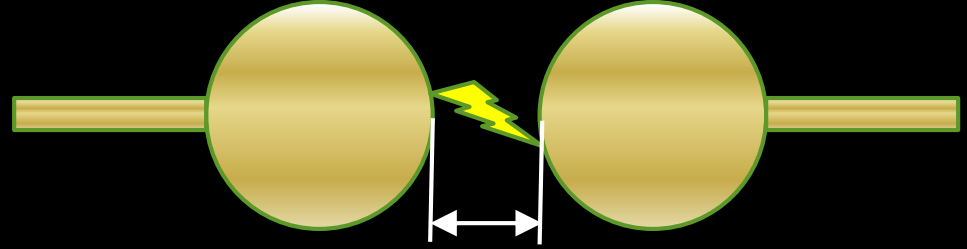


Atlama Aralığı Örnekleri



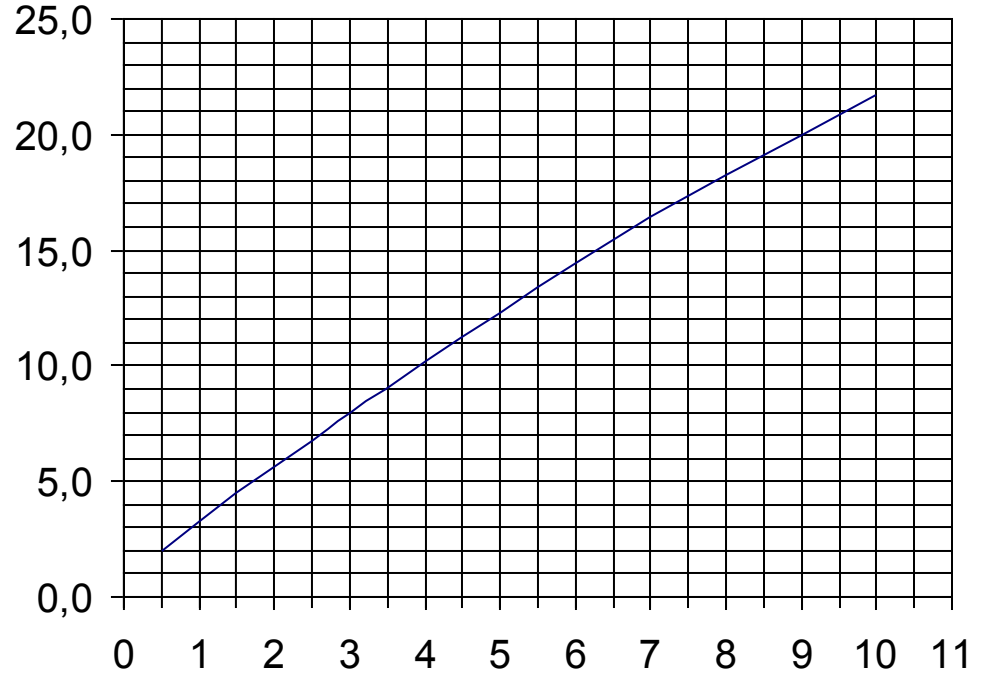


Statik Atlama Aralığı



Elektrot Aıklığı (mm)	Atlama Gerilimi (kV _{ef})
0,5	2,0
1,0	3,3
1,5	4,5
2,0	5,7
2,5	6,8
3,0	7,9
4,0	10,2
5,0	12,3
6,0	14,4
7,0	16,4
8,0	18,2
9,0	20,0
10,0	21,7

Atlama gerilimi (kV_{ef})



Elektrot açıklığı (mm)

Döner Atlama Aralığı

BPS: Atlama aralığında saniyedeki atlama sayısı

$$\text{BPS} = \frac{1}{T_{\text{on}} \times T_{\text{off}}} \times n_e = \frac{v_r}{C} \times n_e$$



T_{on} : Atlama ile geçen süre
 T_{off} : Atlamasız geçen süre
 n_e : Rotordaki elektrot sayısı
 v_r : Rotor hızı





Döner Atlama Aralığı

$$\text{Rotor hızı } v_r = C \times \frac{\text{RPM}}{60} = \pi \times D_r \times \frac{\text{RPM}}{60}$$

C: Rotorun çevre uzunluğu

RPM: devir/ dakika

D_r : Rotor çapı

$$T_{\text{on}}: \text{Atlama ile geçen süre} \quad T_{\text{on}} = \frac{D_e}{v_r \times n_e}$$

D_e : Elektrotların eksen çapı

n_e : Rotordaki elektrot sayısı

$$T_{\text{off}}: \text{Atlamasız geçen süre} \quad T_{\text{off}} = \frac{C / n_e}{v_r} - T_{\text{on}}$$

Transformatör Seçenekleri

$$P[\text{Watt}] = \left(\frac{l[\text{cm}]}{1,7 \times 2,54} \right)^2 = \left(\frac{l[\text{cm}]}{4,318} \right)^2$$

- Neon Transformatörü (**NST**: Neon Sign Transformer)
- Mikrodalga Fırın Transformatörü (**MOT**: Microwave Oven Transformer)



NST



MOT

Transformatör Seçenekleri

- Güç/Dağıtım Transformatorü
(**PPT**: Pole Pig Transformer)
- teşleme Transformatorü
(**OBIT**: Oil-fired Boiler Ignition Transformer)



PPT



OBIT

Tesla Bobininde Kayıplar

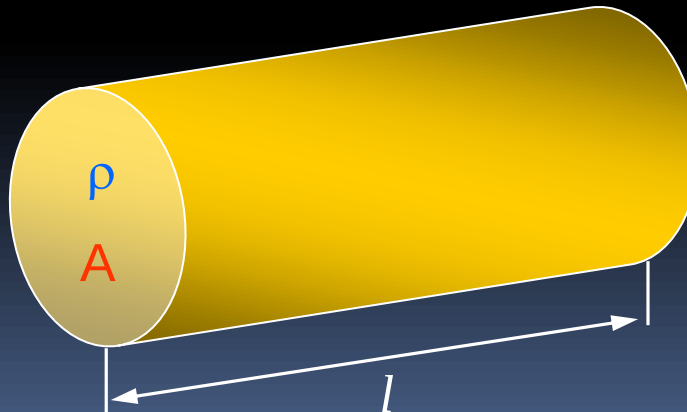
Direnç: Bağlantı iletkenlerinin ve sargıların elektriksel dirençlerindeki kayıplar, $P = R I^2$

$$R_{DA} = \frac{\rho l}{A}$$

ρ : İletkenin öz direnci ($\Omega \cdot m$)

l : İletkenin uzunluğu (m)

A : İletkenin kesiti (m^2)



$$R_{wire} = \left[\frac{l}{2\pi r_{wire}} \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \right] \Omega$$

$$\rho_{Cu} = 1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

Tesla Bobininde Kayıplar

Deri etkisi: Yükselen frekansla artan deri etkisi sonucu direnç artar. Deri kalınlığı, δ

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$$

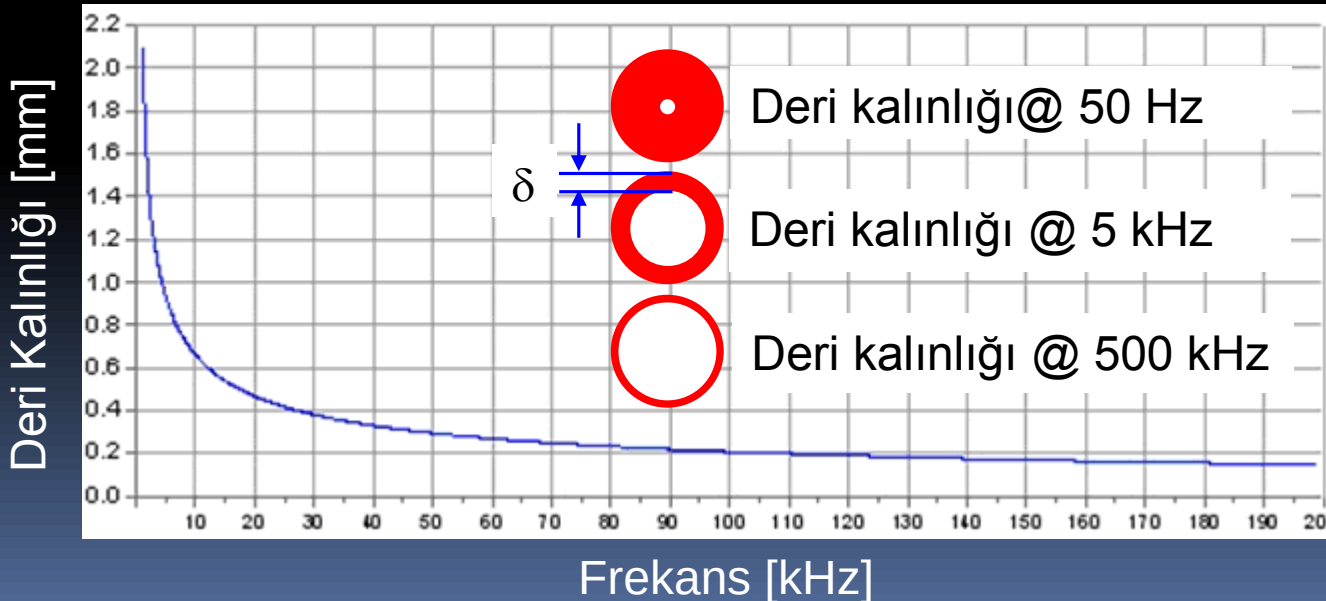
ρ : İletkenin öz direnci ($\Omega.m$)

σ : İletkenin iletkenliği (S/m)

μ : İletkenin manyetik geçirgenliği (H/m)

f : Frekans (Hz)

Bakır İletkende Deri Etkisi



$$\rho_{Cu} = 1,72 \times 10^{-8} \Omega.m$$

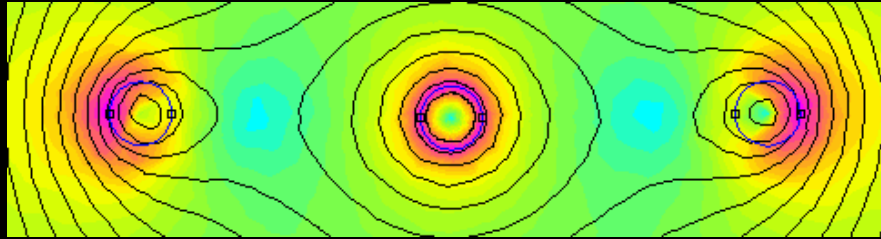
$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\mu_{rCu} \cong 1$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$$

Tesla Bobininde Kayıplar

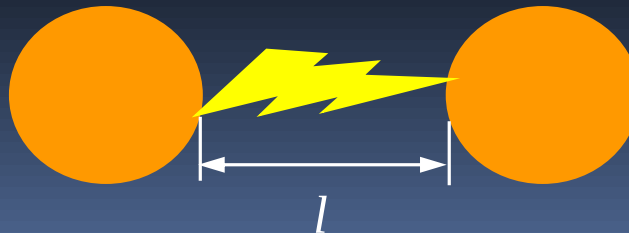
Yakınlık etkisi: Sarımların yakınlık etkisi sonucu direnç artar.



Alternatif akım direnci: $R_{AA} = R_{DA}(1 + k_s + k_p)$

Ark direnci: Atlama aralığındaki ark, direnç gibi etkir.
Kaybı, ısı, ışık, ses olarak kullanır.

$$R = \frac{\rho l}{A}$$



Tesla Bobininde Kayıplar

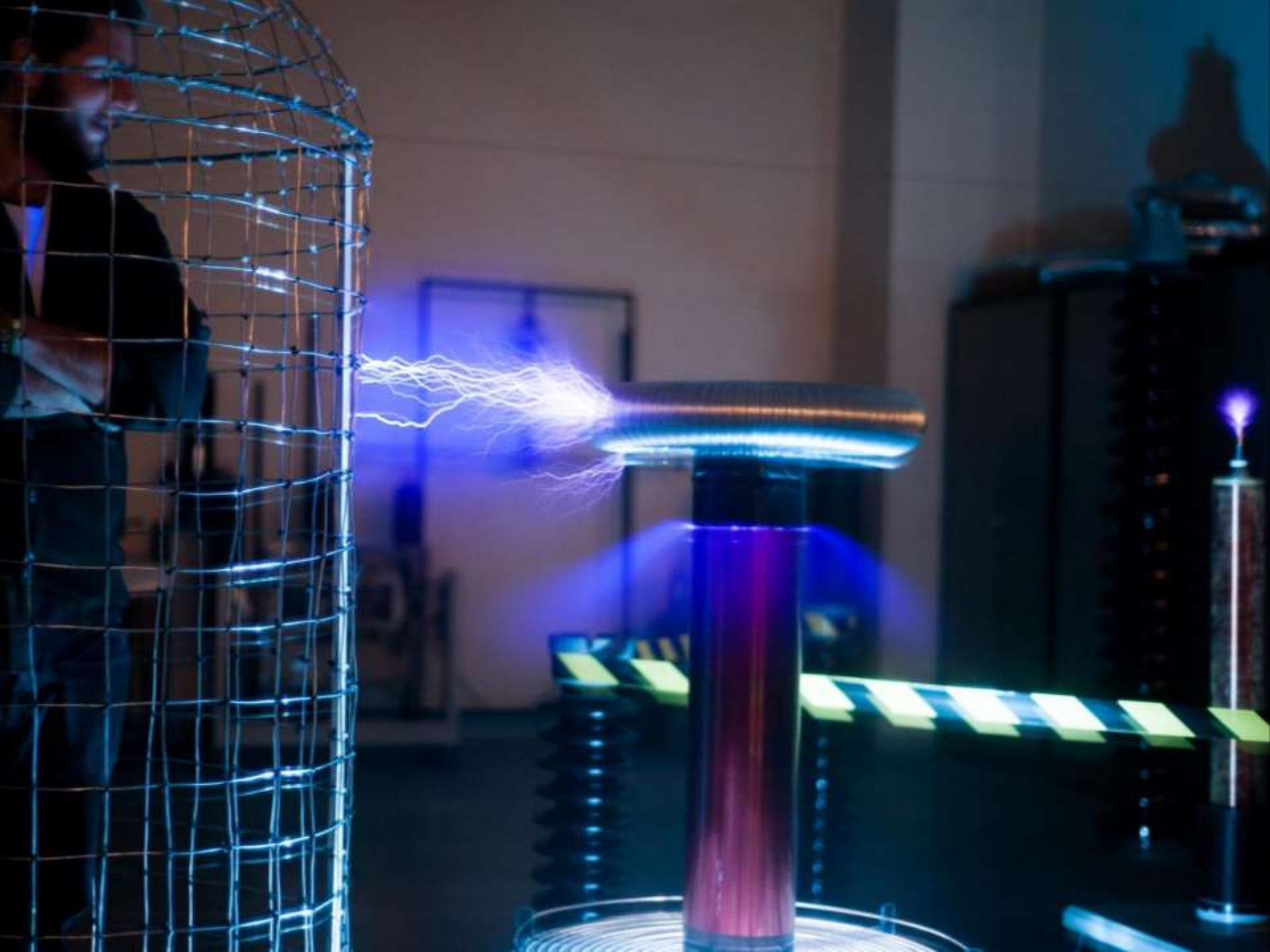
Dielektrik kayıpları: Birincil kondansatördeki ve bobinlerin yalıtımındaki dielektrik kayıpları

$$P_{die} = U^2 \omega C \tan \delta = U^2 2\pi f C_o \varepsilon_r \tan \delta$$

Elektromanyetik enerji: Tesla bobini radyo frekanslarında çalışır. Enerjisinin bir kısmını elektromanyetik dalga olarak yayar.

Korona etkisi: Kıvılcımlar





Tesla Bobininde Kayıplar

Güç faktörü düzeltme kondansatörü: Demir çekirdekli yüksek gerilim transformatörünün girişine paralel olarak güç faktörünü düzeltmek (PFC: Power Factor Correction) için bir kondansatör (C_{PFC}) bağlanarak transformatör verimi arttırılabilir.

$$C_{PFC} = \frac{P}{2\pi f U}$$

P : Transformatörün gücü (W)

U : Transformatörün giriş gerilimi (V) = 240 V

f : Şebeke frekansı (Hz) = 50 Hz



Ölçme

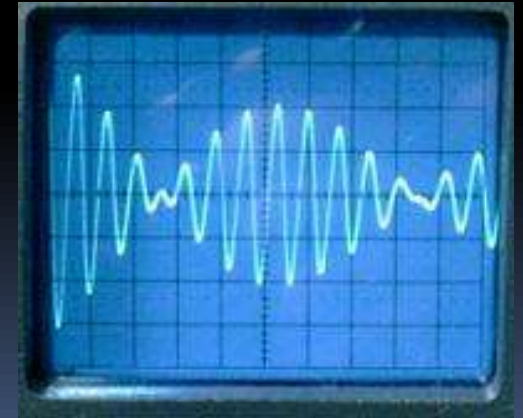
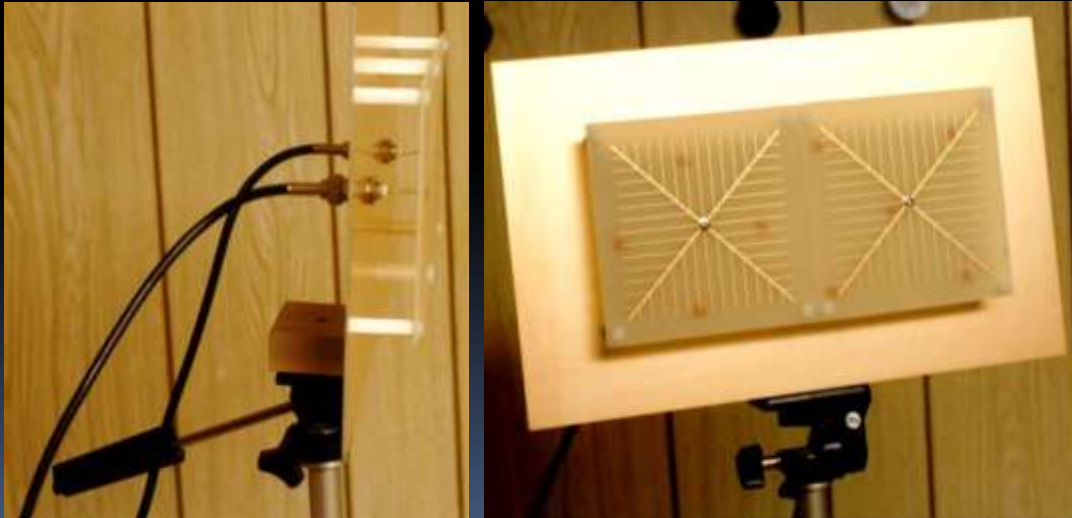
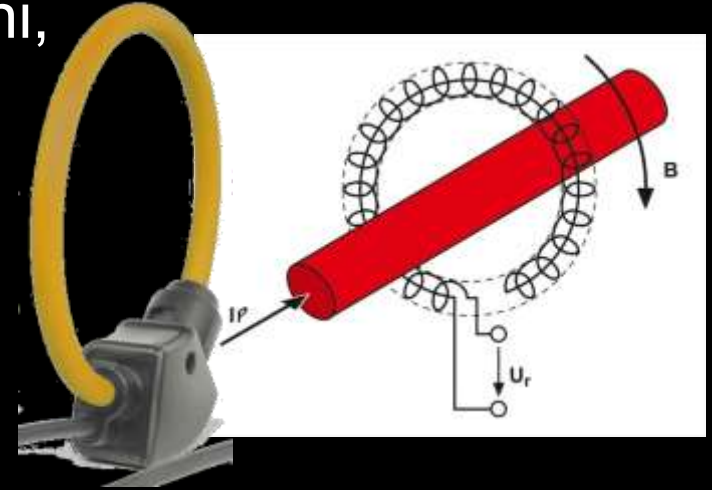
Tesla bobininde yüksek frekanslı yüksek gerilimlerin ve yüksek frekanslı akımların ve frekansın ölçülmesi istenir. Bunun için

- Küresel elektrot sistemi,
- Elektrostatik voltmetre,
- Yüksek frekanslı, yüksek gerilim probu



Ölçme

- Yüksek frekanslı Rogowski bobini,
 - RF anten,
 - Osiloskop,
 - ...
- kullanılabilir.



Terry Fritz anteni

Sonuç

- Tesla bobinin çılgın elektriksel boşalmalarının yarattığı gösteriyi izlemek, yaratmak ve elektrikle oynamak insanlara cazip geliyor!
- Tasarlanan Tesla bobininin elektromanyetik uyumluluğuna dikkat edilmelidir!
- Koruma, topraklama, ekranlama, filtreleme, yalıtım önlemleri göz önünde tutulmalıdır!
- Yüksek gerilimle uğraşıldığı unutulmamalıdır!
Dikkat ölüm tehlikesi!



Sonuç

- Atlama aralığı ve çıkıştaki boşalmalar bolca ozon oluşturur. Bobini havalandırması yetersiz ortamlarda uzun süre çalıştırmaktan kaçınılmalıdır!
- Tesla bobini çalışırken kulaklarınızı gürültüden, gözlerinizi parlak ışıktan koruyunuz.
- Haydi bobin yapmaya...





**Dinlediđiniz için
Sađ olun!**

Örnek:

Bir Tesla Bobininin Gerçeklenmesi

Gerçekleme hedefi:

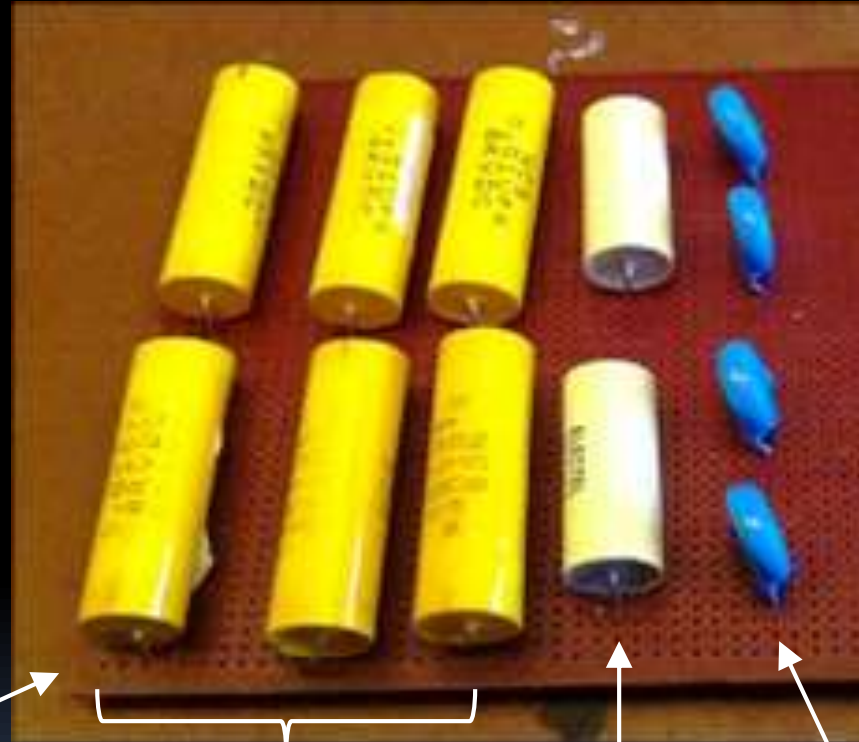
Frekans = 150 kHz

Çıkış gerilimi = 300 kV

Birincil Kapasite ($C_1 = 19,099 \text{ nF}$)



10 kV, 600 VA
neon trafosu

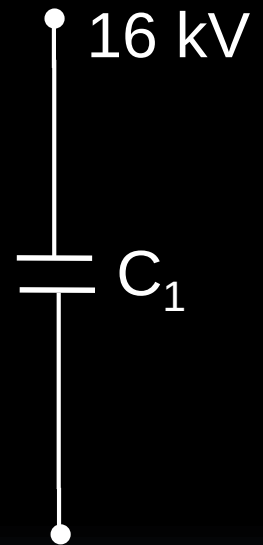


Bakırsız
pertinaks

6 adet
10 nF, 8 kV
kapasite

2 adet
6,7 nF, 8 kV
kapasite

4 adet
4,7 nF, 4 kV
kapasite



Birincil Bobin ($L1 = 62,04 \mu\text{H}$)

6 mm çaplı **bakır** boru

Sarımlar arası açıklık = 10 mm

12 sarım

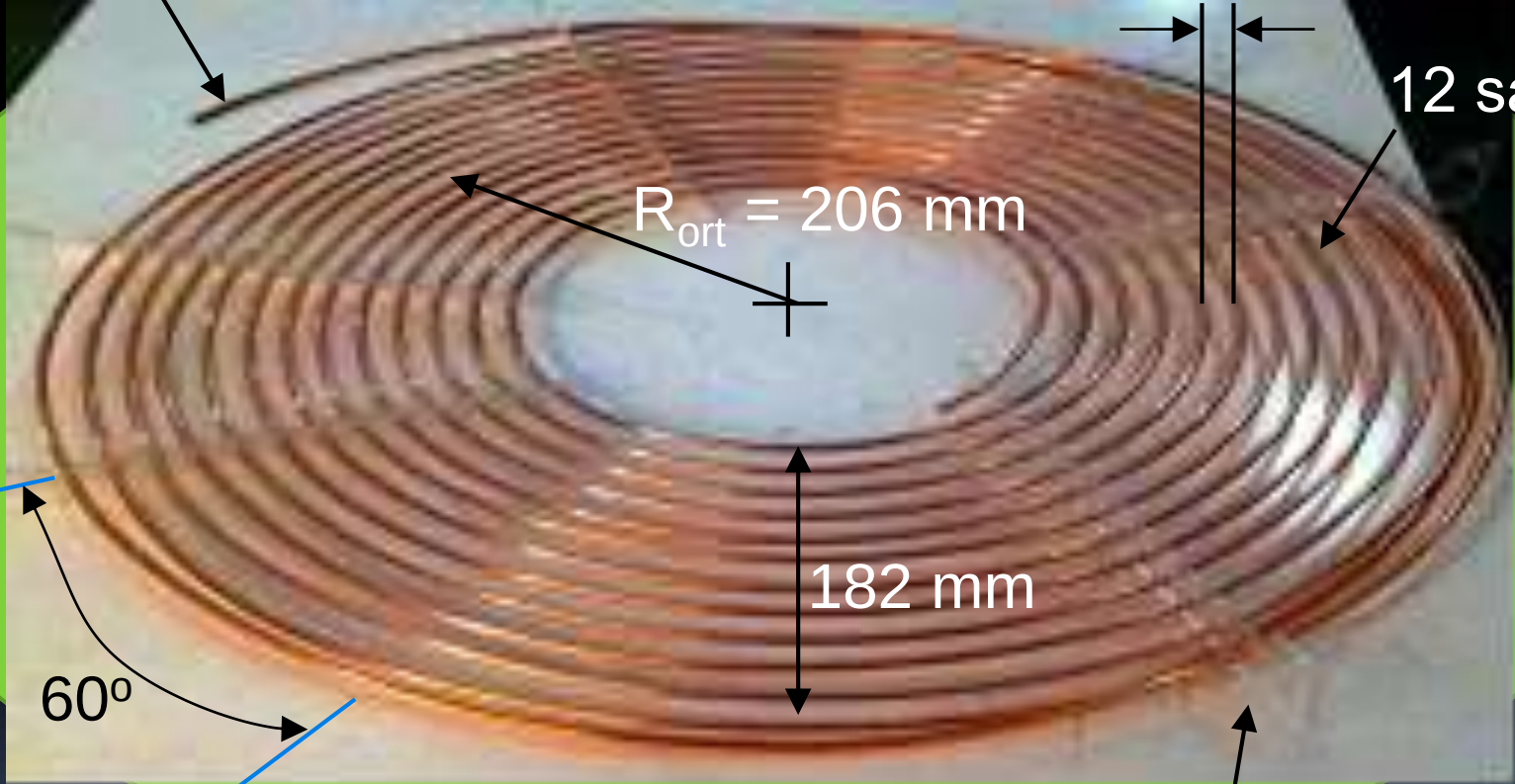
$R_{\text{ort}} = 206 \text{ mm}$

182 mm

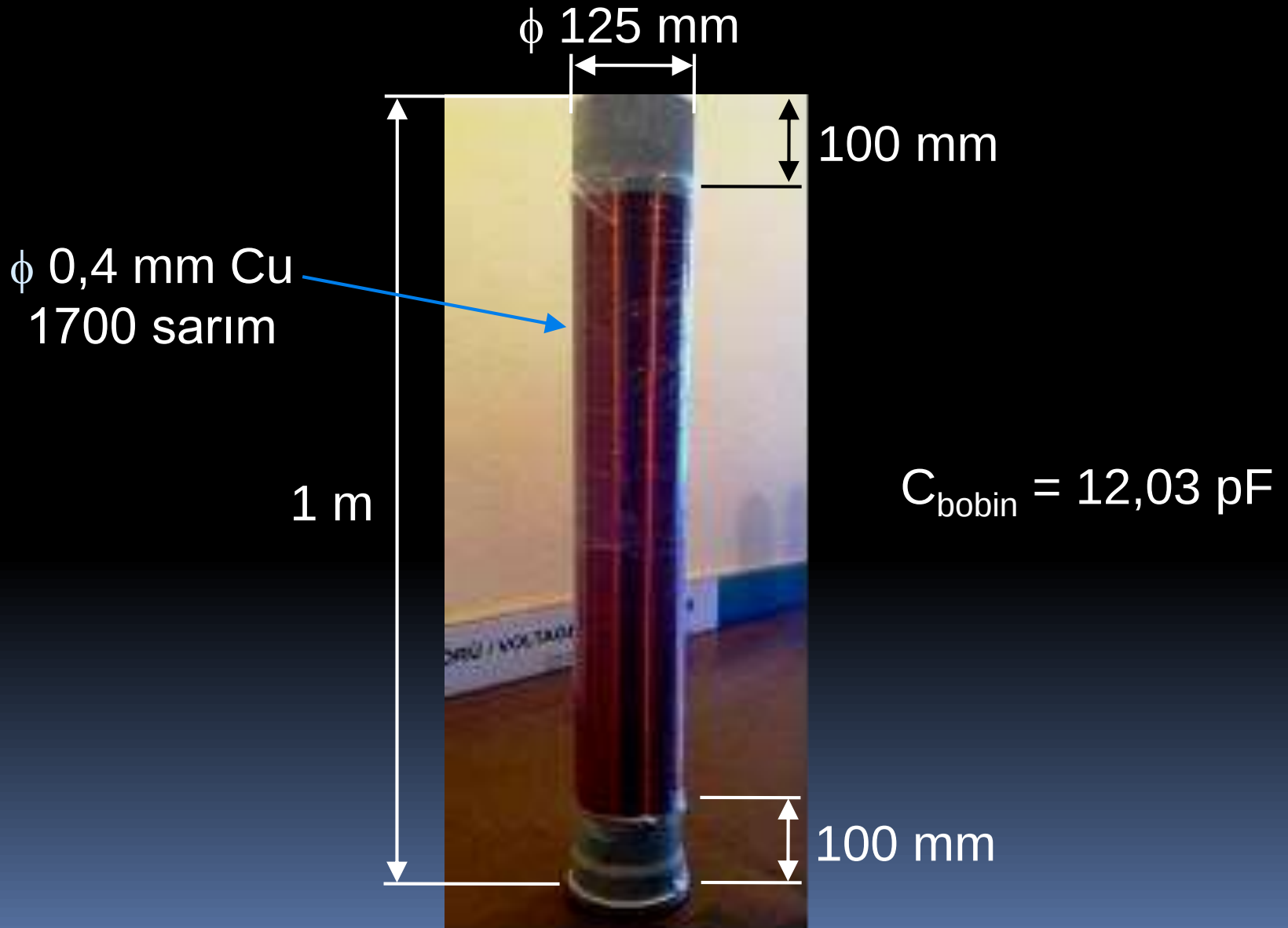
60°

90 cm çaplı
tahta taban

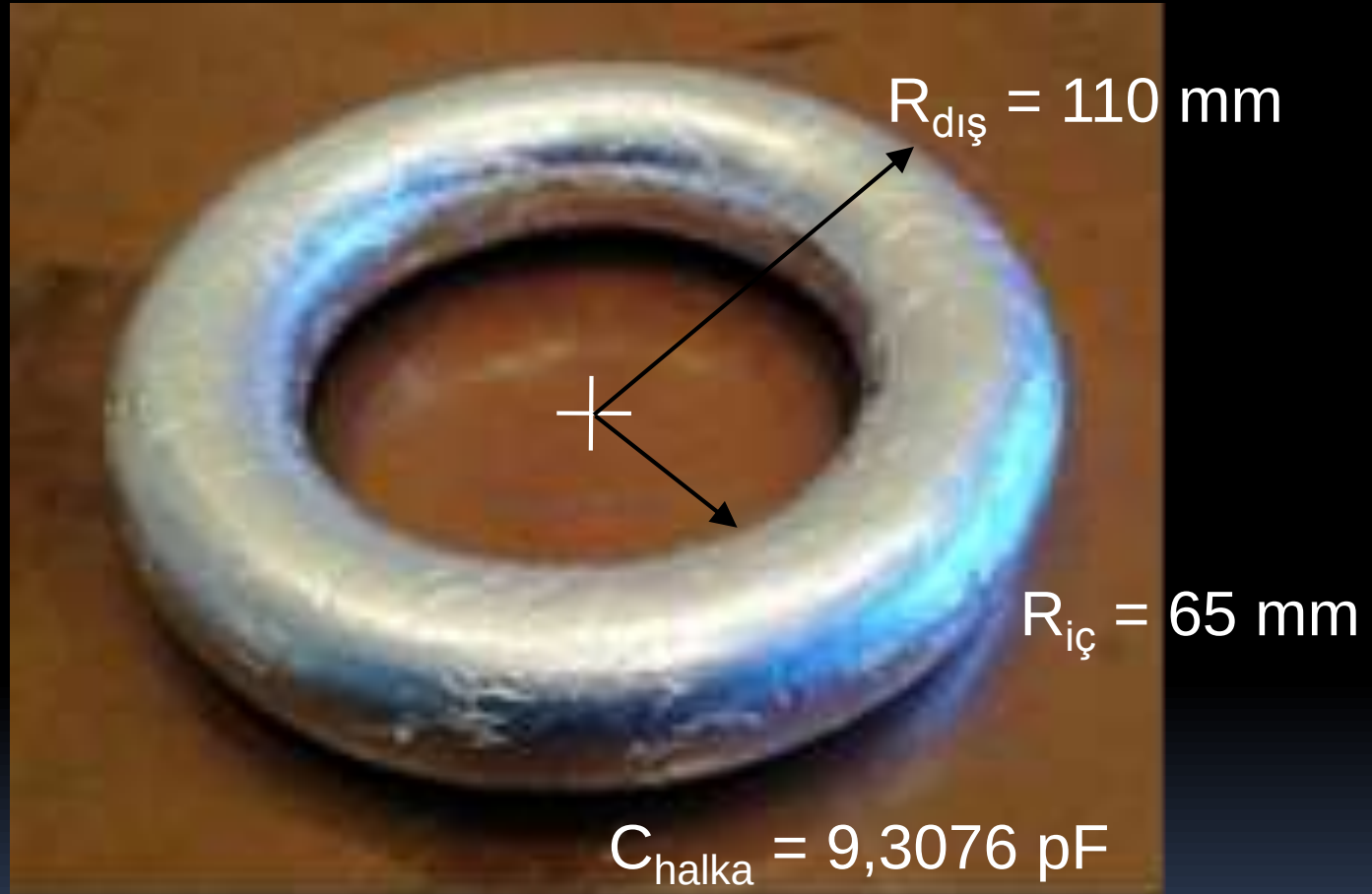
6 adet 13 delikli pleksiglas destek



İkincil Bobin ($L_2 = 56,18 \text{ mH}$)



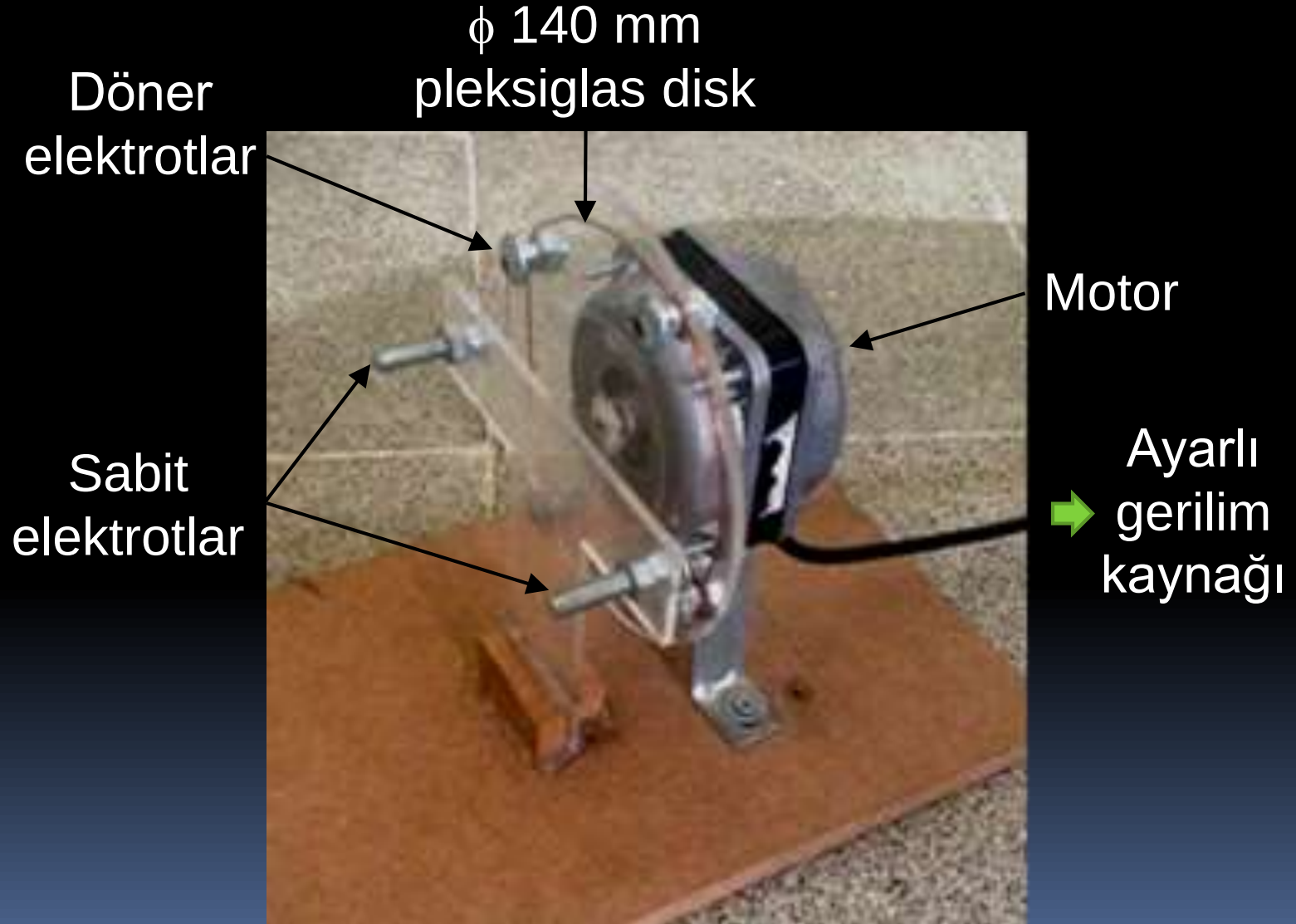
Çıkış Elektrodu



İkincil devrenin toplam kapasitesi

$$C_2 = C_{bobin} + C_{halka} = 19.20 \text{ pF}$$

Döner Atlama Aralığı



Gerçeklenen 300 kV, 150 kHz Tesla bobini

