



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

*Prof. Dr. Özcan Kalenderli*

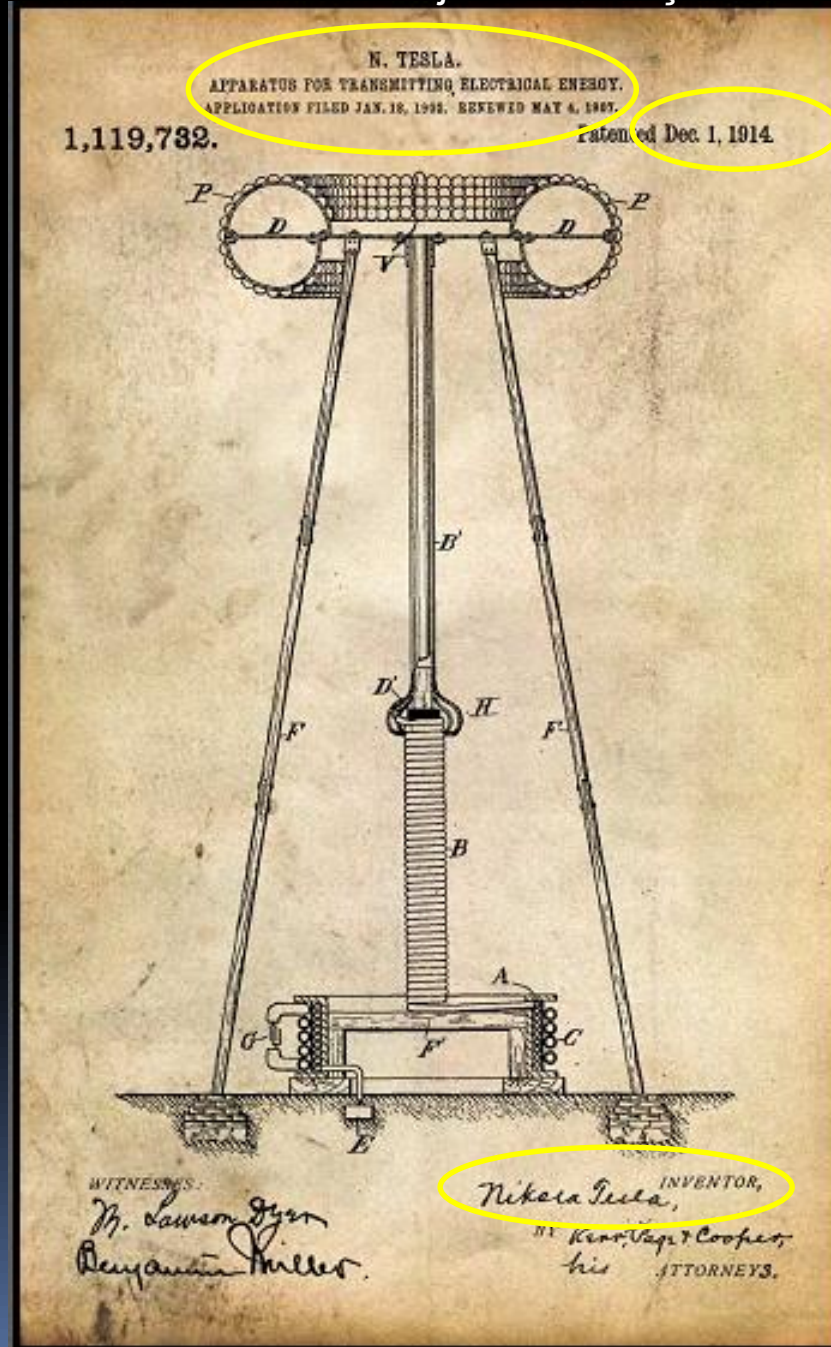
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Elektrik Mühendisliği Bölümü

# Elektrik Enerjisi İletmek için Cihaz



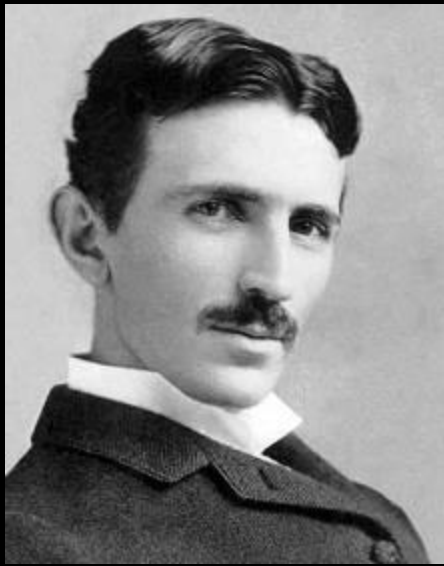
## Nikola TESLA

10 Temmuz 1856, Smiljan  
7 Ocak 1943, New York

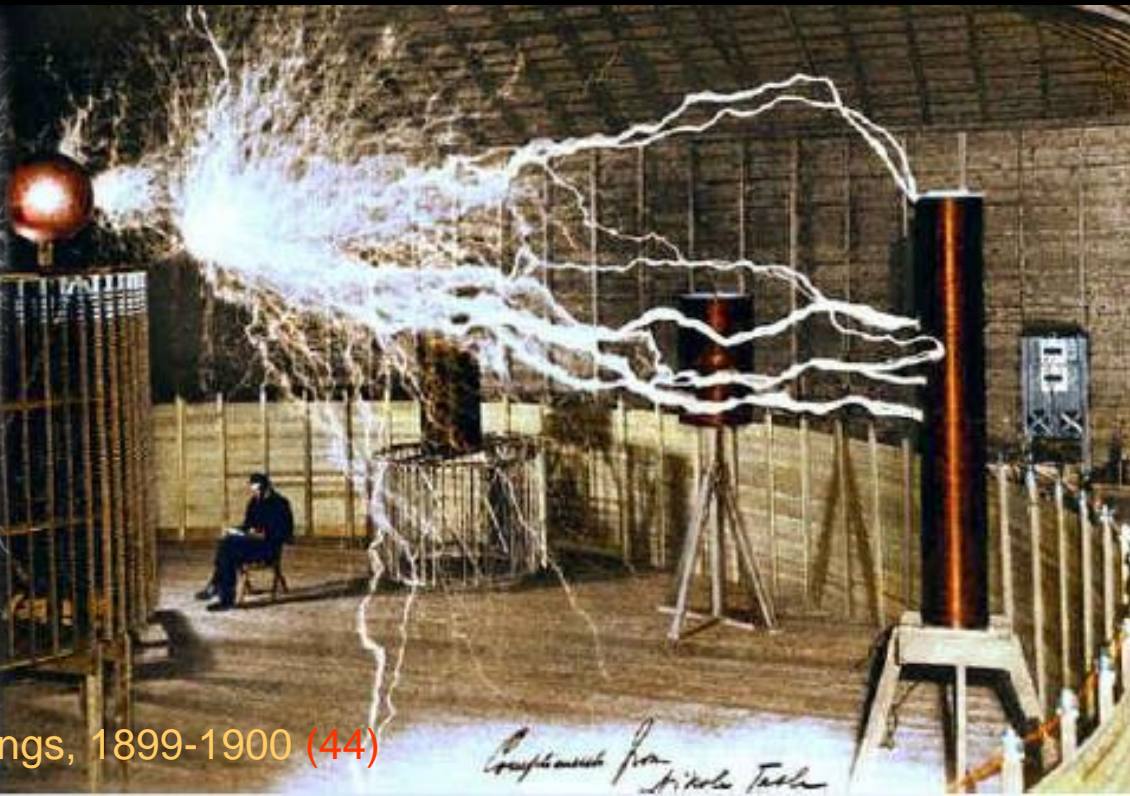
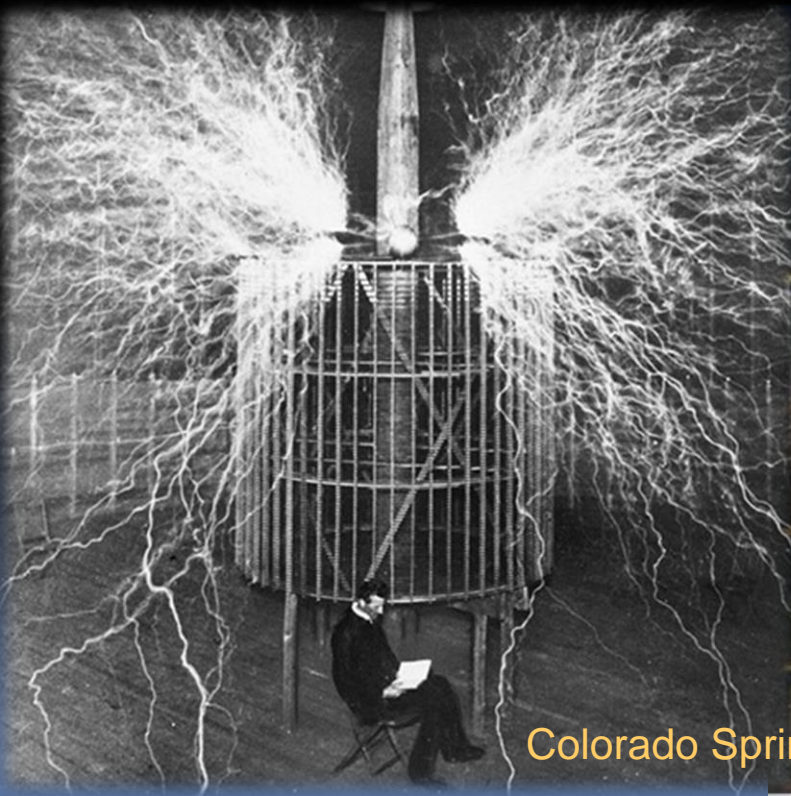
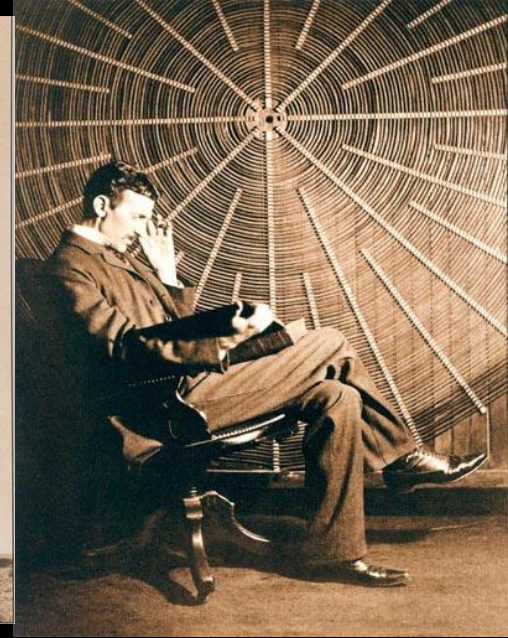
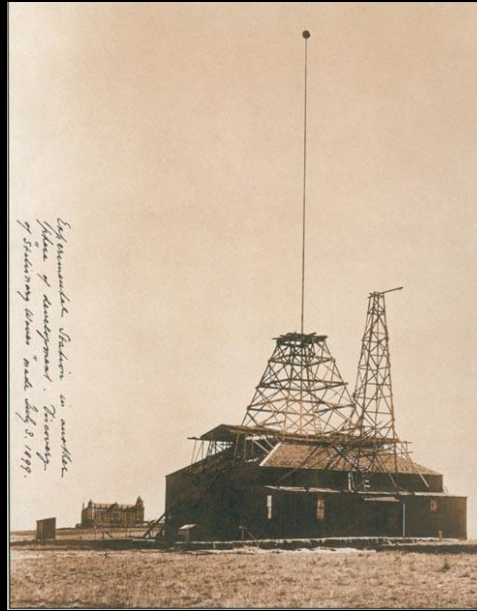


Patent Tarihi:  
1 Aralık  
1914

Mucit:  
Nikola Tesla

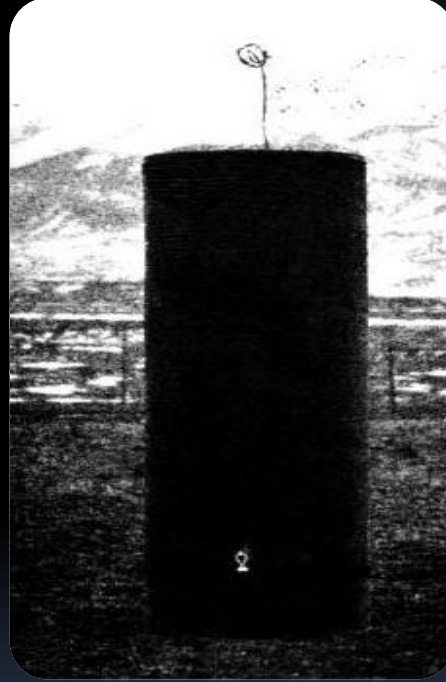


**Nikola TESLA**  
**1890 (34)**



Colorado Springs, 1899-1900 (44)

# Tesla'nın Buluşlarının Günümüz Uygulamaları



Kablosuz  
iletim ve alma  
(Radyo-TV-enerji)



Medikal  
X-ışını cihazları



Elektriksel  
sahne gösterileri ve eğlenceleri



İndüksiyon bobinleri

# Tesla Bobini

- Yüksek doğru gerilim elde etmek için
- Yüksek gerilim cihazlarının yüksek frekanslı yüksek gerilim deneylerini yapmak için gereksinim vardır.
- Demir çekirdekleri yoktur. Bu özellik, boyut, ağırlık ve maliyet tasarrufu sağlar.
- Manyetik doyma olmadığı için saf sinüs dalgası elde edilebilir.
- Bobin boyunca düzgün gerilim dağılımı olur.

Genel olarak kullanılan yüksek frekanslı rezonans transformatörü (üretici), Tesla bobinidir.

# Tesla Bobini

Bir fazlıdır  
Üç fazlı değil!

Demir çekirdeksizdir  
Hava çekirdekli!

Eş eksenlidir

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

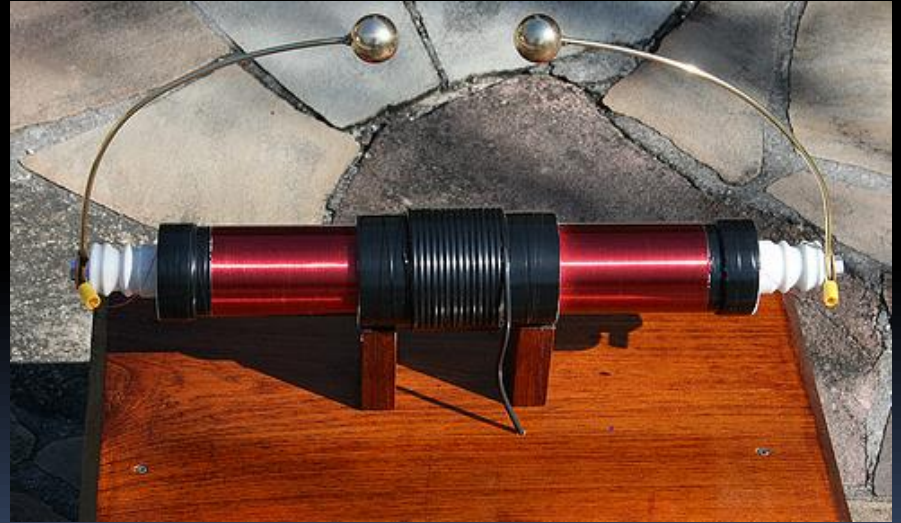
Yüksek gerilim üreticidir ( $U > 1 \text{ kV}$ )  
Alçak gerilim ( $U \leq 1 \text{ kV}$ ) üretici değil!

Rezonans Transformatorü

# Tesla Bobini (TB) Türleri

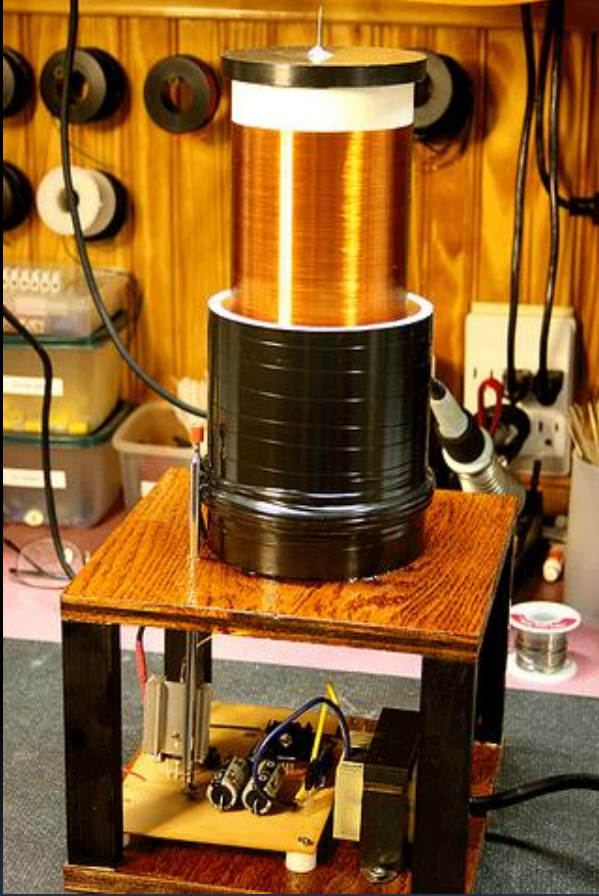


Tek-Kutuplu TB  
(Mono-polar TB)



Çift-Kutuplu TB  
(Bi-polar TB)

# Tesla Bobini (TB) Türleri



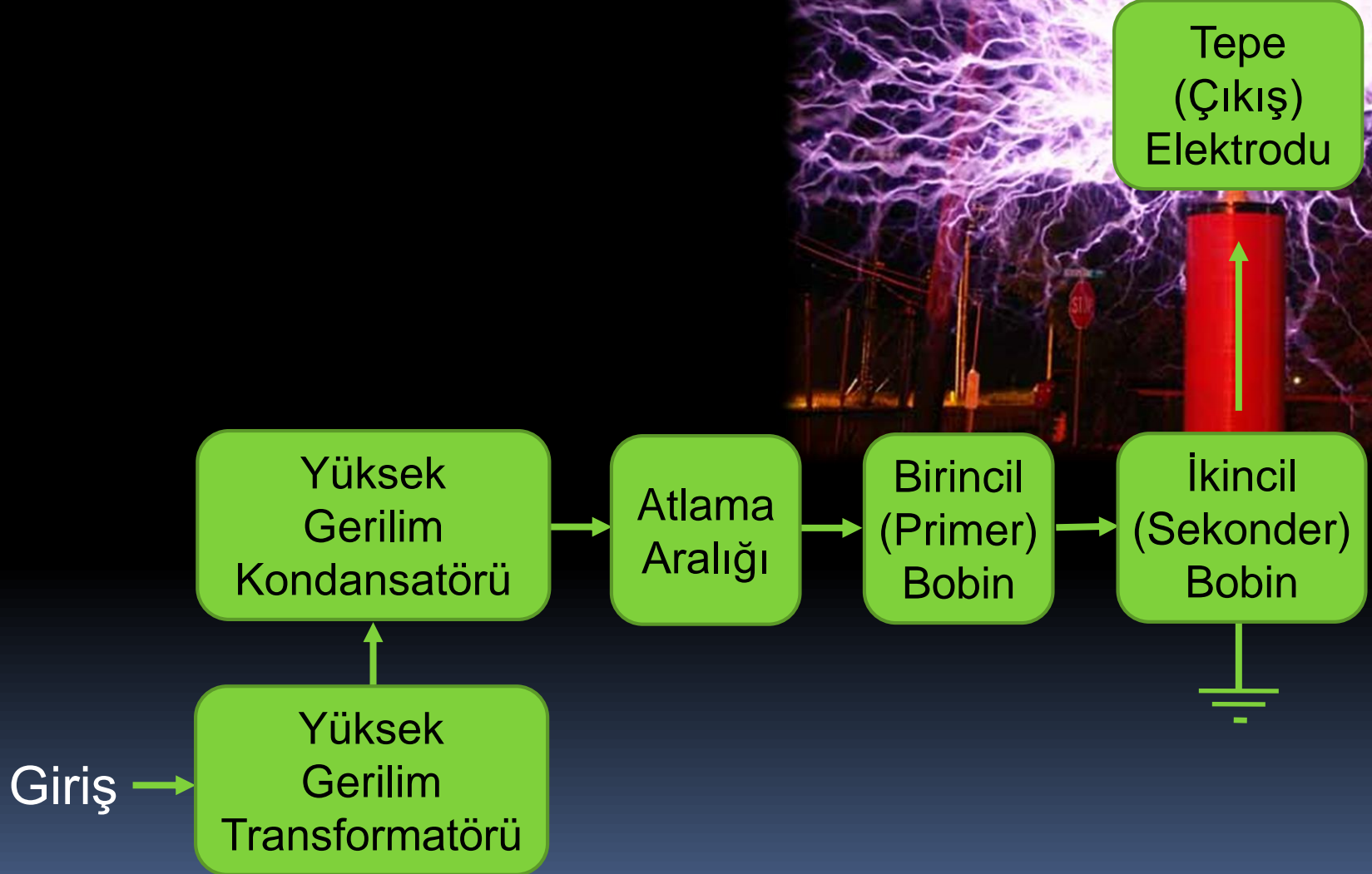
Yarı-İletken TB  
(Solid-State TB)



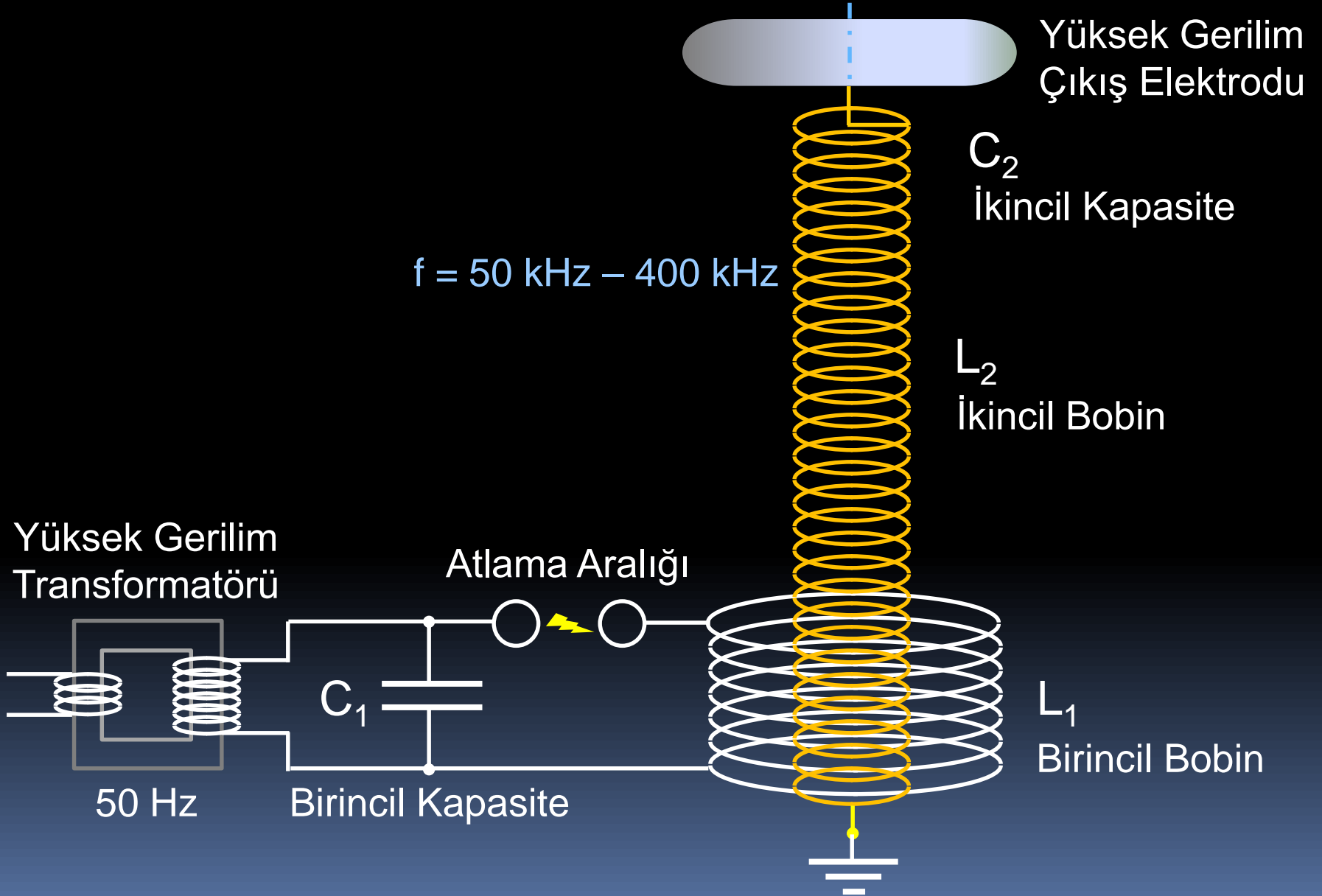
Vakum Tüplü TB



# Tesla Bobini Blok Diyagramı



# Tesla Bobini Yapısı

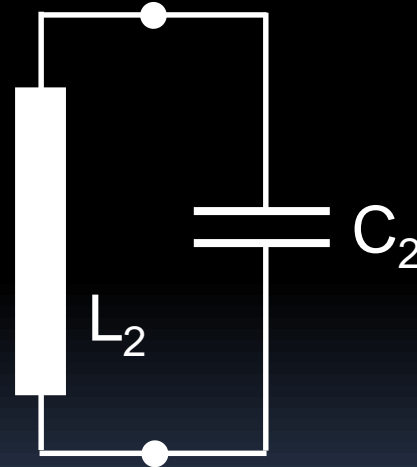
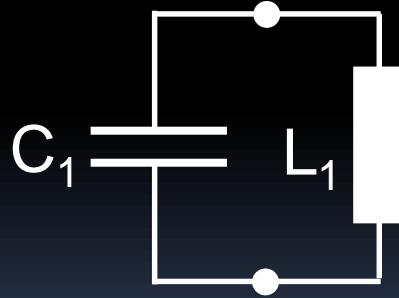


# Tesla Bobini Rezonansı

Tesla Bobini, iki rezonans devresinden oluşur.

$L_1$ ,  $C_1$  birincil,  $L_2$  ve  $C_2$  ikincil rezonans devresini oluşturur.

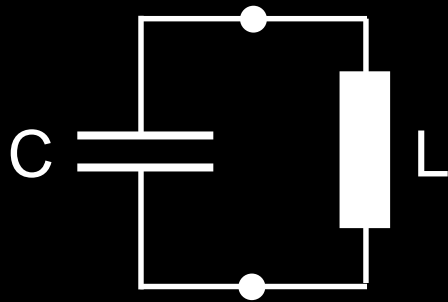
Birincil  
Rezonans  
Devresi



İkincil  
Rezonans  
Devresi

# Tesla Bobini Rezonansı

Rezonans Devresi



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

Rezonans Frekansı

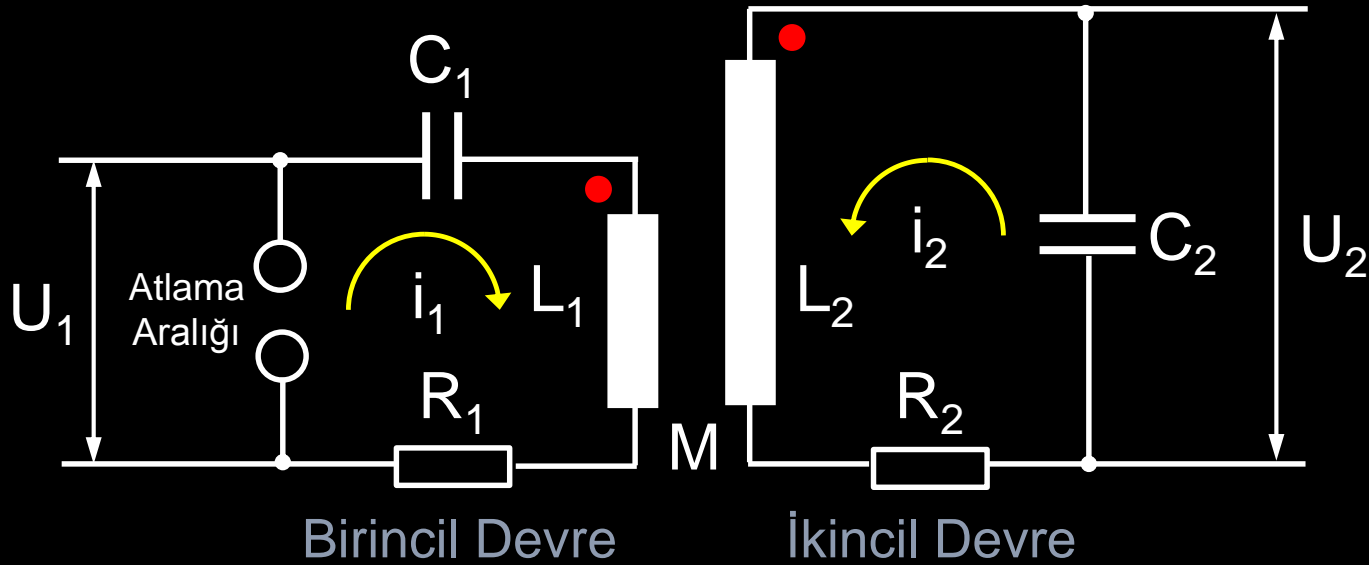
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Rezonans Koşulu

$$f_1 = f_2$$

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

# Tesla Bobini Devre Analizi



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

Kirchoff  
yasası

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

# 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):

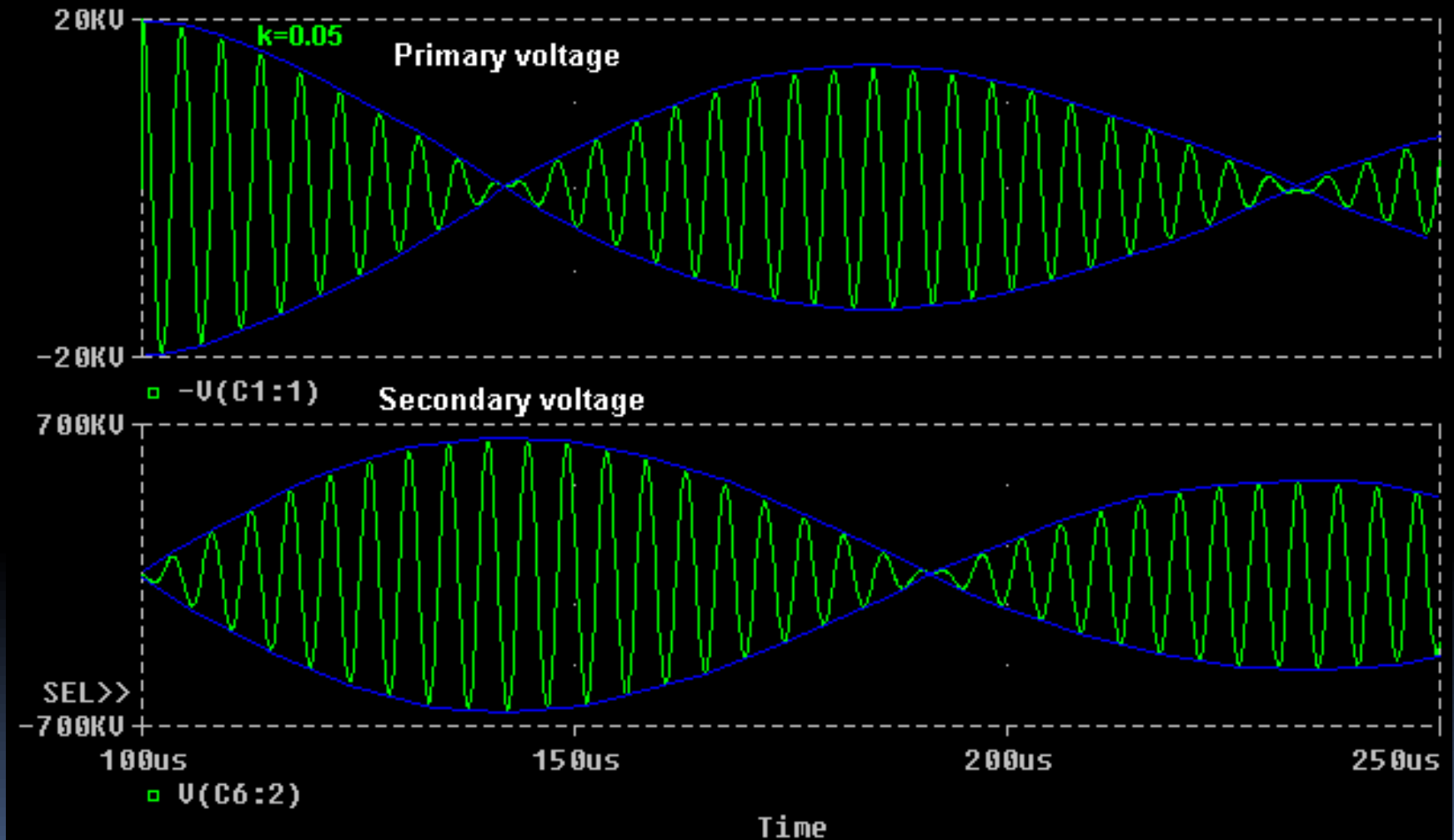
$$u_2(t) = \frac{U_1}{2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} e^{-t/T} \left( \cos \frac{\omega t}{\sqrt{1-k}} - \cos \frac{\omega t}{\sqrt{1+k}} \right)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad T = \frac{4L_1 L_2}{R_2 L_1 + R_1 L_2}$$

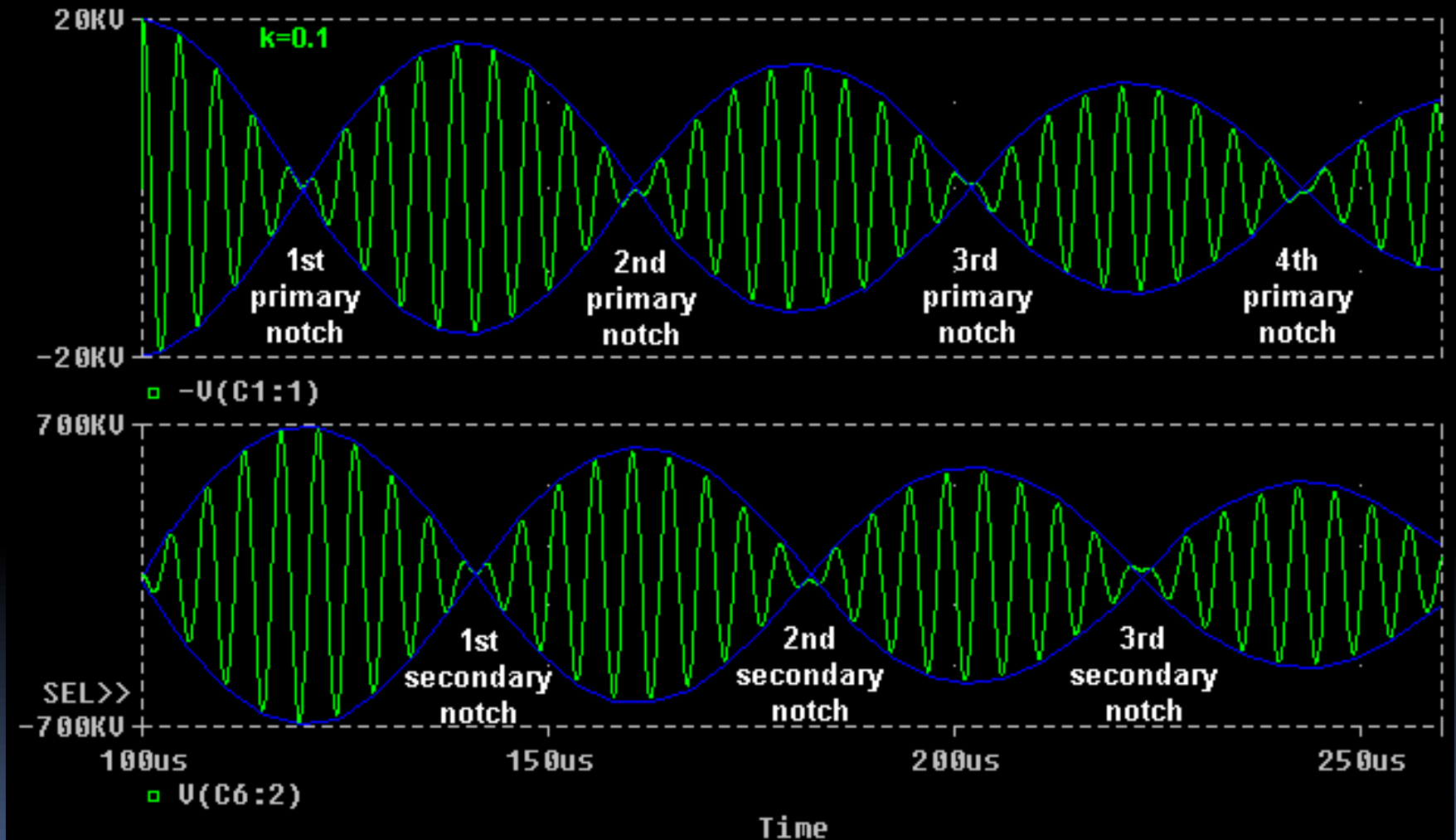
Maksimum çıkış gerilimi:

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

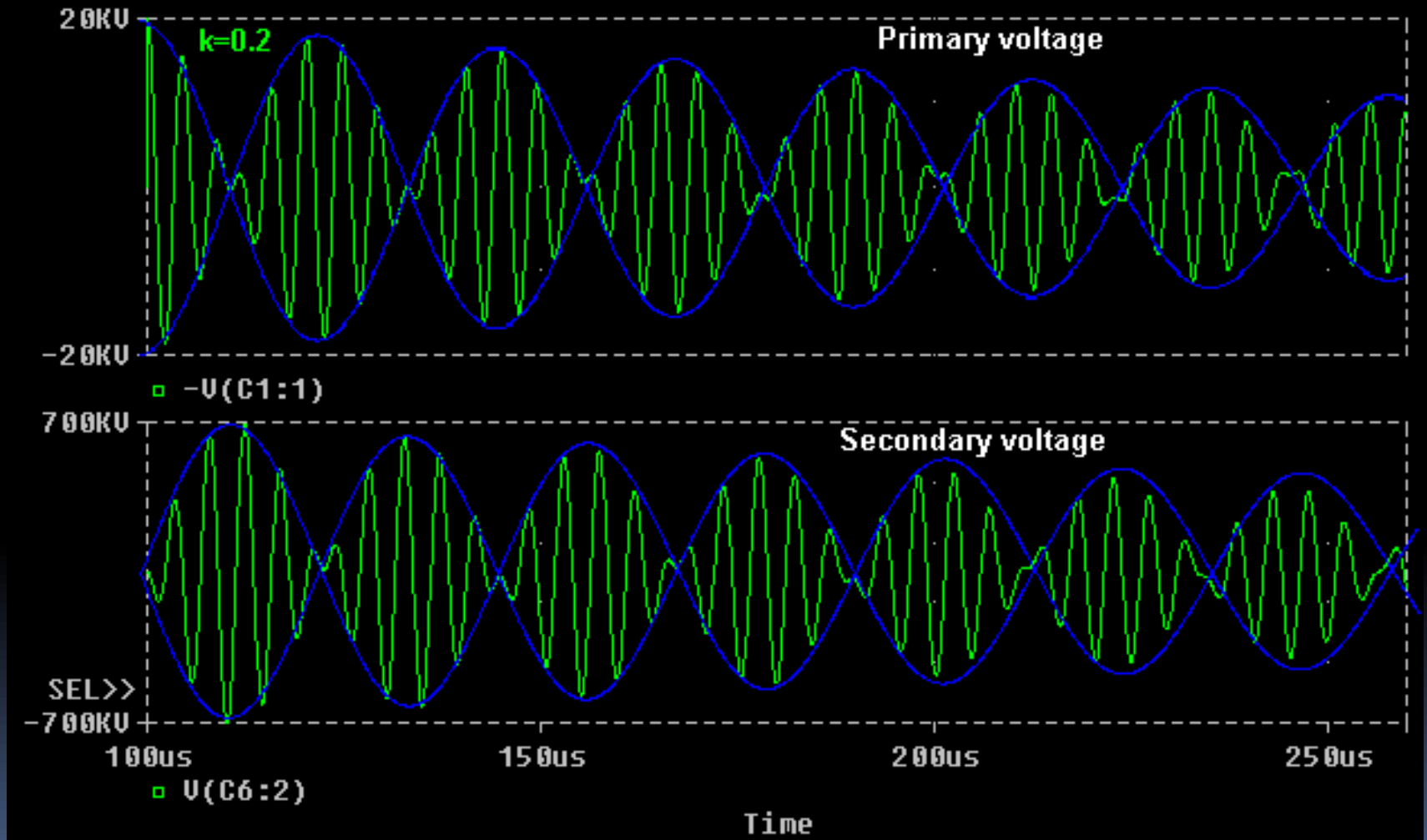
# Tesla Bobini Çıkış Gerilimi



# Tesla Bobini Çıkış Gerilimi



# 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): RLC devresini veya sönümlü osilatörü karakterize eden birimsiz bir büyüklüktür. Salınımlar sırasında devrede biriktirilen enerji ile harcanan enerji arasındaki oranı gösterir.

$$Q = \frac{P_{\text{biriktirilen}}}{P_{\text{harcanan}}} = \frac{XI^2}{RI^2} = \frac{X}{R} \quad Q = \frac{1/\omega C}{R} = \frac{1}{\omega RC} = \frac{\omega L}{R}$$

X: rezonans frekansında kapasitif veya endüktif reaktanstır

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

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

# Tesla Bobini Tasarımı

# Tesla Bobini Elemanları



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

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

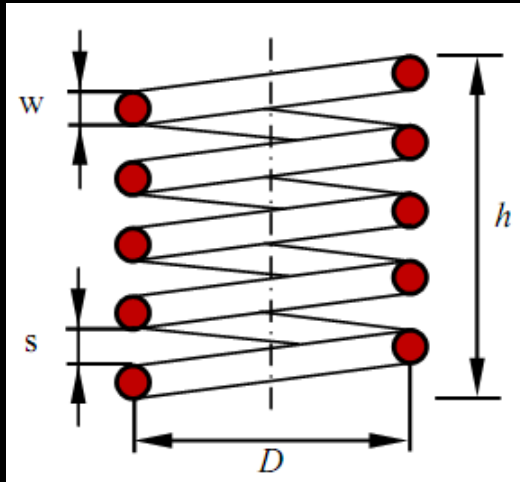


# Bobin Seçenekleri

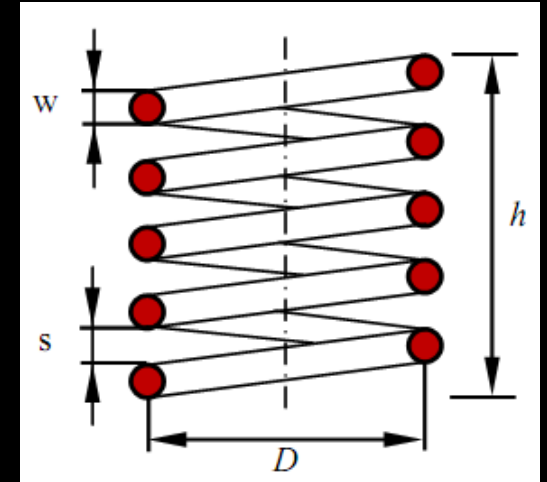
Birincil bobin için

İkincil bobin için

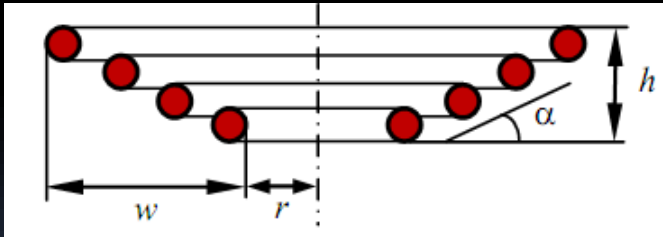
1



Helisel bobin

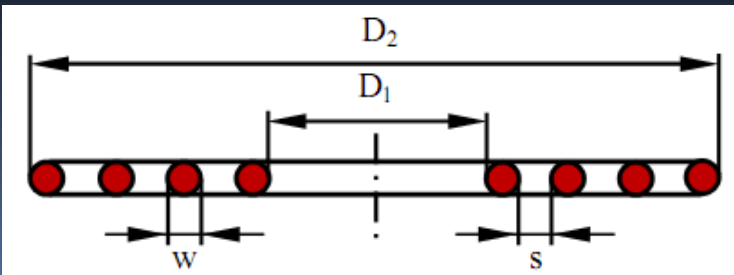


2



Ters konik bobin

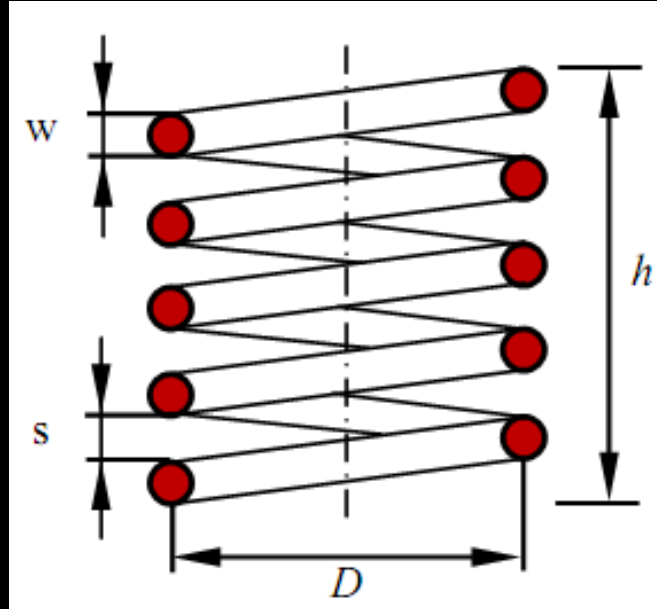
3



Spiral bobin

# Helisel İkincil Bobin (L2)

Helisel bobin



$n$ : sarım sayısı

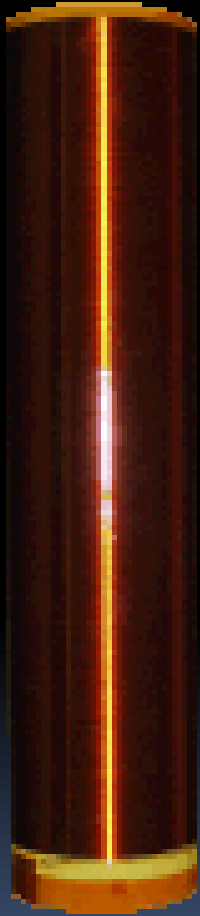
Helisel bobinin  
endüktansı

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

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

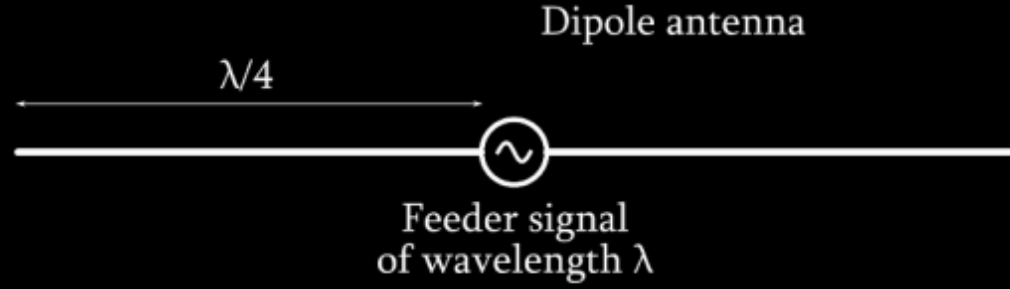
Bobin Çapı	Bobin Uzunluğu	Çap/ Uzunluk Oranı
7,5 cm	45 cm	1/6
10 cm	50 cm	1/5
15 cm	60 cm	1/4
20 cm ve üstü	60 cm ve üstü	1/(3 – 5)

# 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

# ikincil Bobin (L2) Tel Ölçüleri

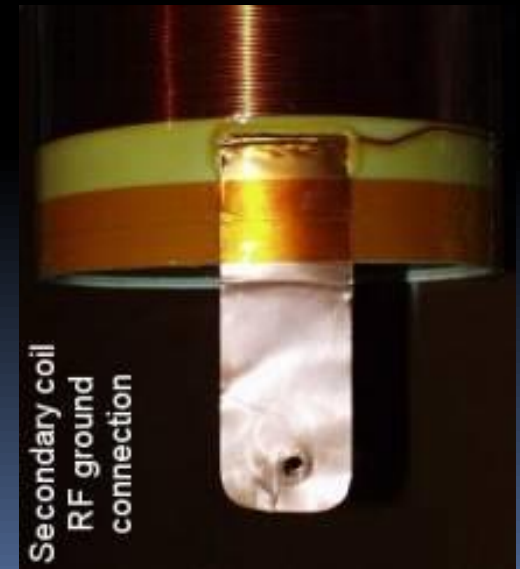
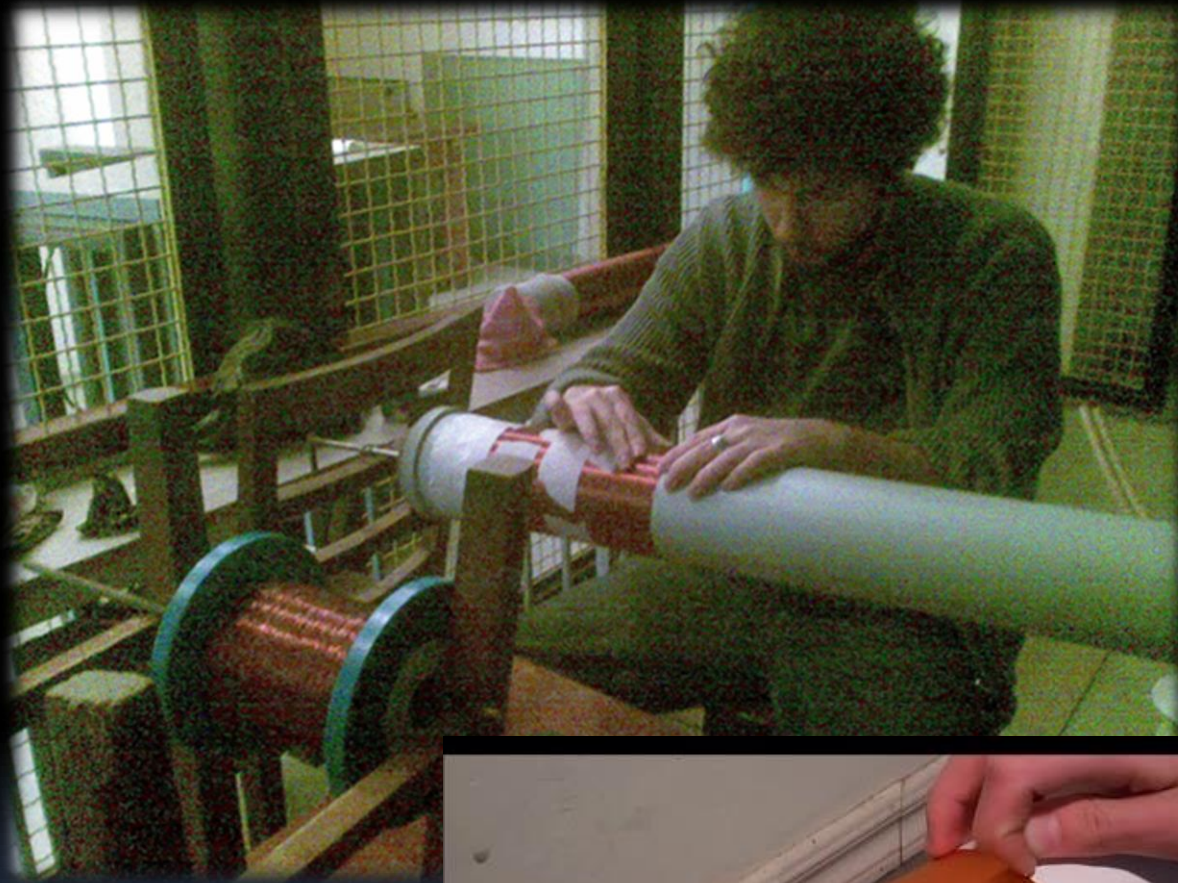


Enameled Copper Wire

Bobin Teli

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

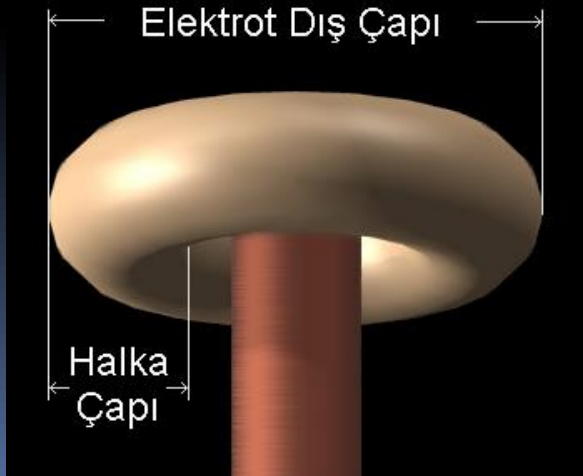
Medhurst denklemi

$$C_{2a} = 0,01 \times h + 0,062 \times r$$

Halka (toroid)  
çıkış  
elektrodunun  
kapasitesi

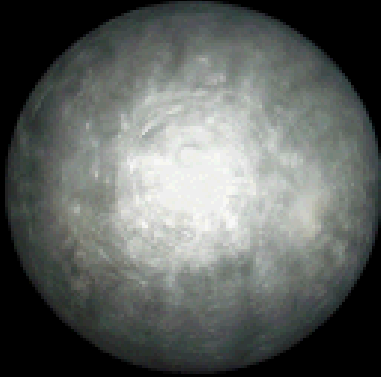
Bert Pool denklemi

$$C_{2b} = 1,4 \times \left(1,278 - \frac{d_1}{d_2}\right) \sqrt{0,00155 \pi d_2 (d_1 - d_2)}$$





# İkincil Kapasite (C2)



Küre elektrot

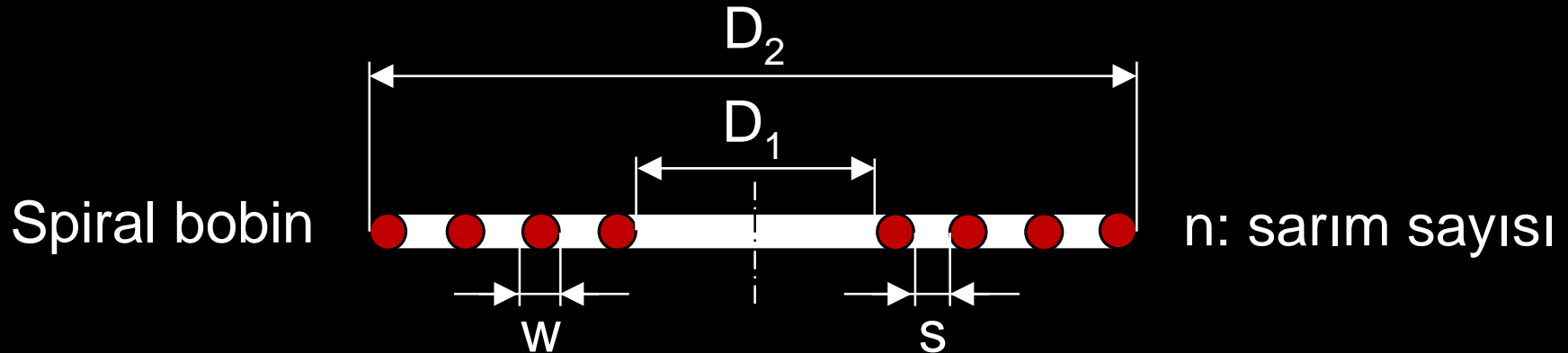
$$C_{2b} = 4\pi\epsilon \times R = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \times R$$

Eşdeğer çıkış kapasitesi

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



# Spiral Birincil Bobin (L1)

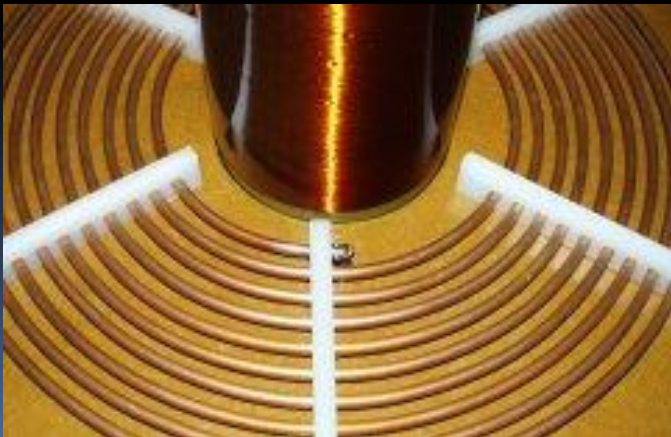
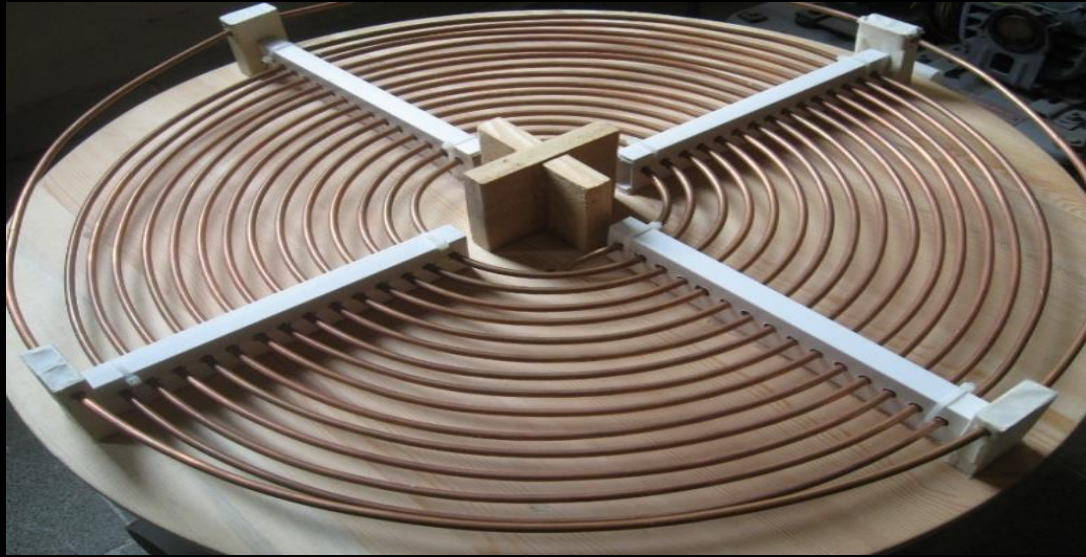


Spiral bobinin endüktansı

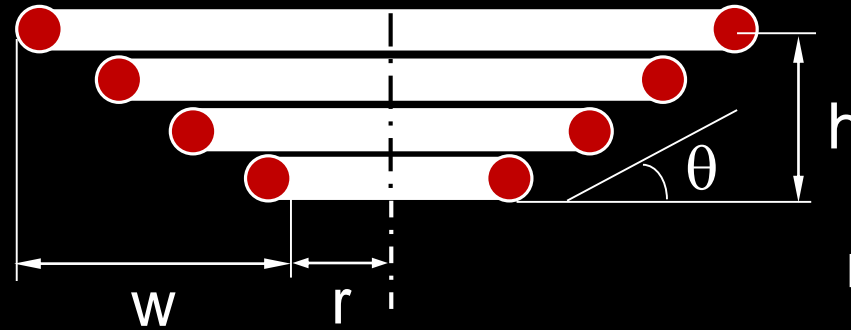
$$L = \frac{n^2 \times A^2}{30A - 11D_1} \quad [\mu\text{H}]$$

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

# Birincil Bobin (L1) Örnekleri



# Ters Konik Birincil Bobin (L1)



n: sarım sayısı

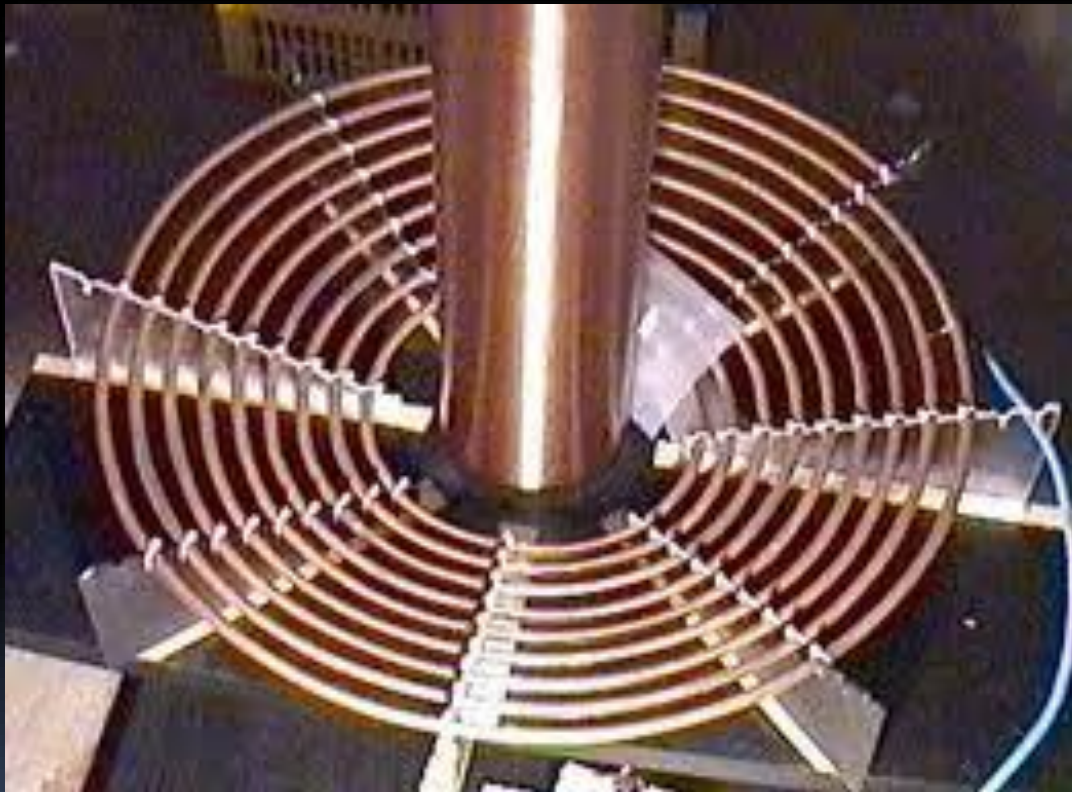
Ters konik bobinin  
endüktansı

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

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

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

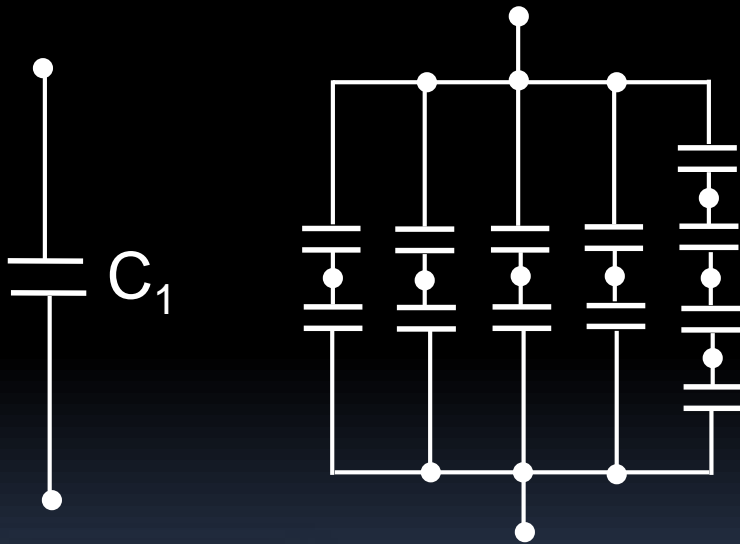
# Ters Konik Birincil Bobin (L1)



# Birincil Kapasite (C1)

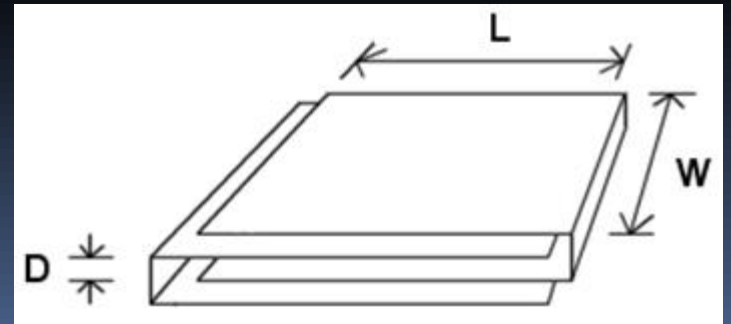
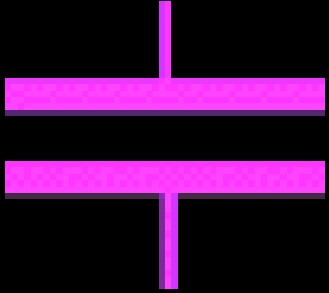
$$C = \frac{1}{2\pi f \times Z}$$

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



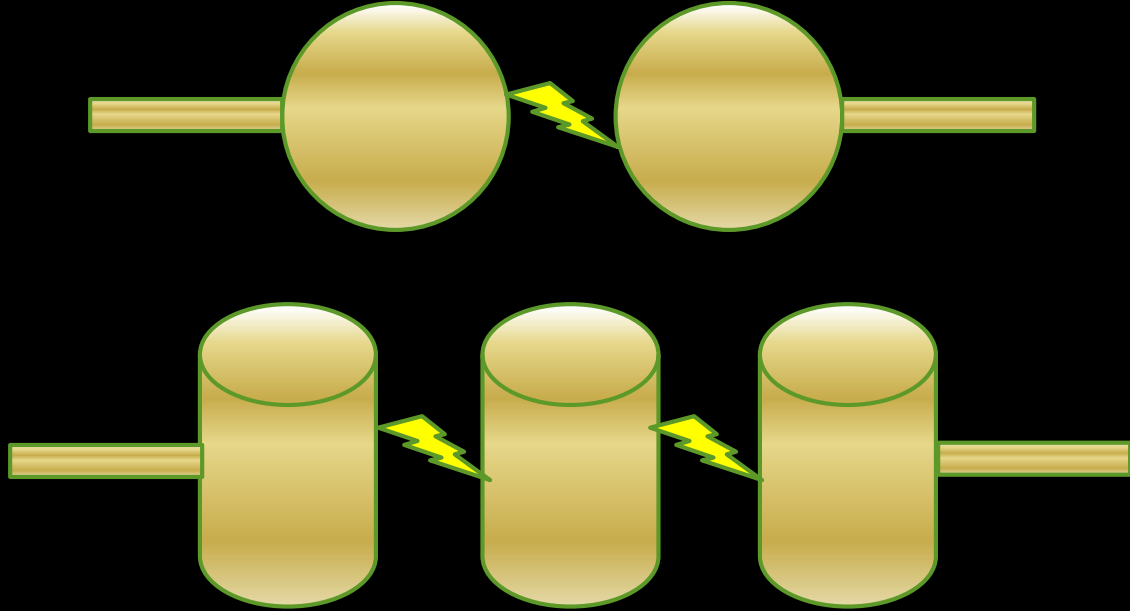
# Birincil Kapasite (C1)

- 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

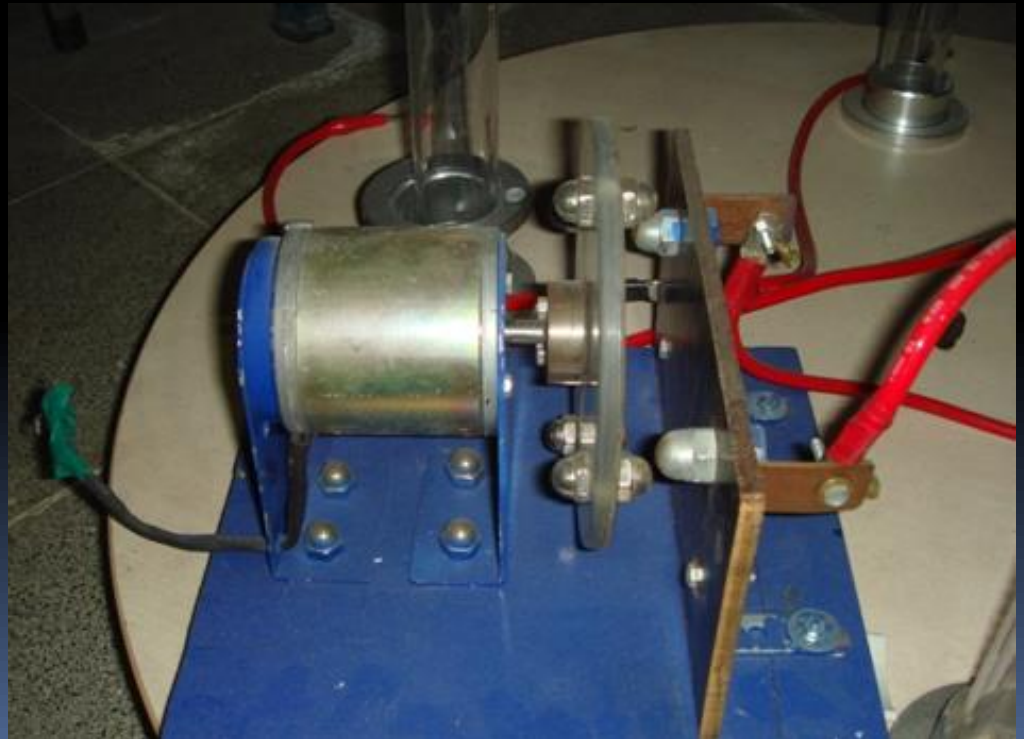


- Döner atlama aralığı
- Yarıiletken anahtarlama
- ...



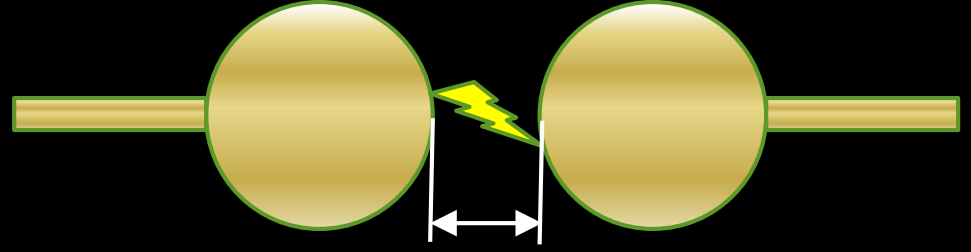


# Atlama Aralığı Örnekleri



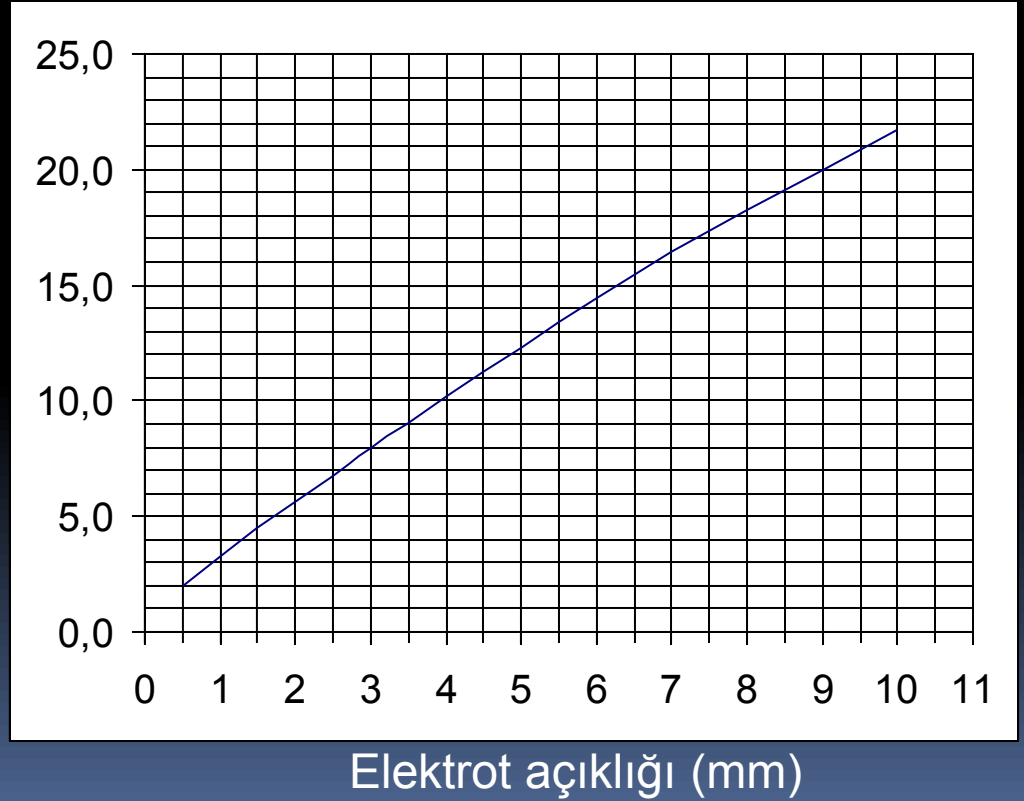


# Statik Atlama Aralığı

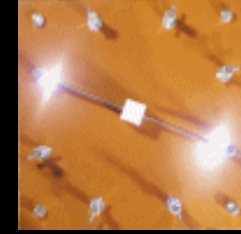
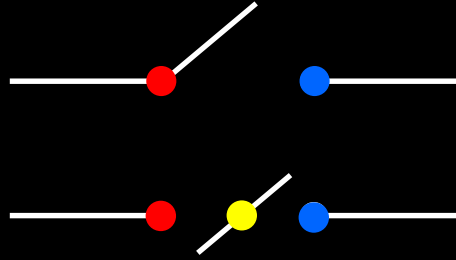


Elektrot Açıklığı (mm)	Atlama Gerilimi (kV <sub>ef</sub> )
0,5	2,0
1,0	3,3
1,5	4,5
2,0	5,7
2,5	6,8
3,0	7,9
4,0	10,2
5,0	12,3
6,0	14,4
7,0	16,4
8,0	18,2
9,0	20,0
10,0	21,7

Atlama gerilimi (kV<sub>ef</sub>)



# Döner Atlama Aralığı



BPS: Atlama aralığında  
saniyedeki atlama sayısı

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

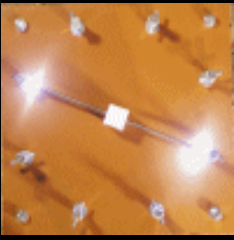
$T_{\text{on}}$ : Atlama ile geçen süre

$T_{\text{off}}$ : 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

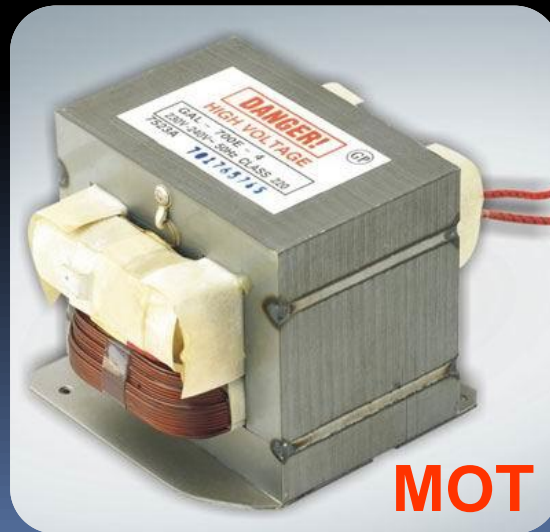
- Neon Transformatörü  
(**NST**: Neon Sign Transformer)
- Güç/Dağıtım Transformatörü  
(**PPT**: Pole Pig Transformer)
- Mikrodalga Fırın Transformatörü  
(**MOT**: Microwave Oven Transformer)
- Ateşleme Transformatörü  
(**OBIT**: Oil-fired Boiler Ignition Transformer)



**NST**



**PPT**



**MOT**



**OBIT**

# Tesla Bobininde Kayıplar

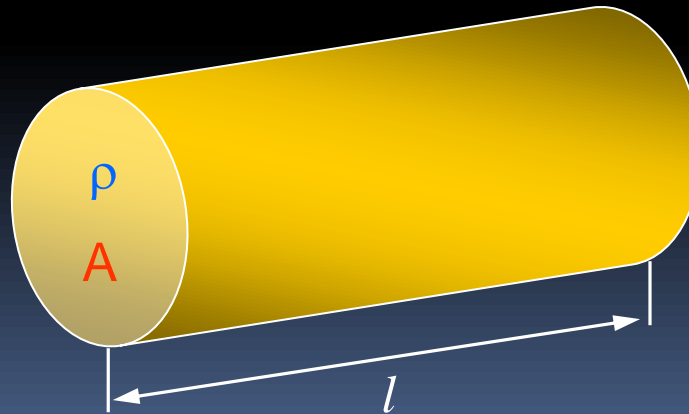
**Direnç:** Bağlantı iletkenlerinin ve sargıların elektriksel dirençlerindeki kayıplar,  $P = R I^2$

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

$\rho$ : 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,  $\delta$

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

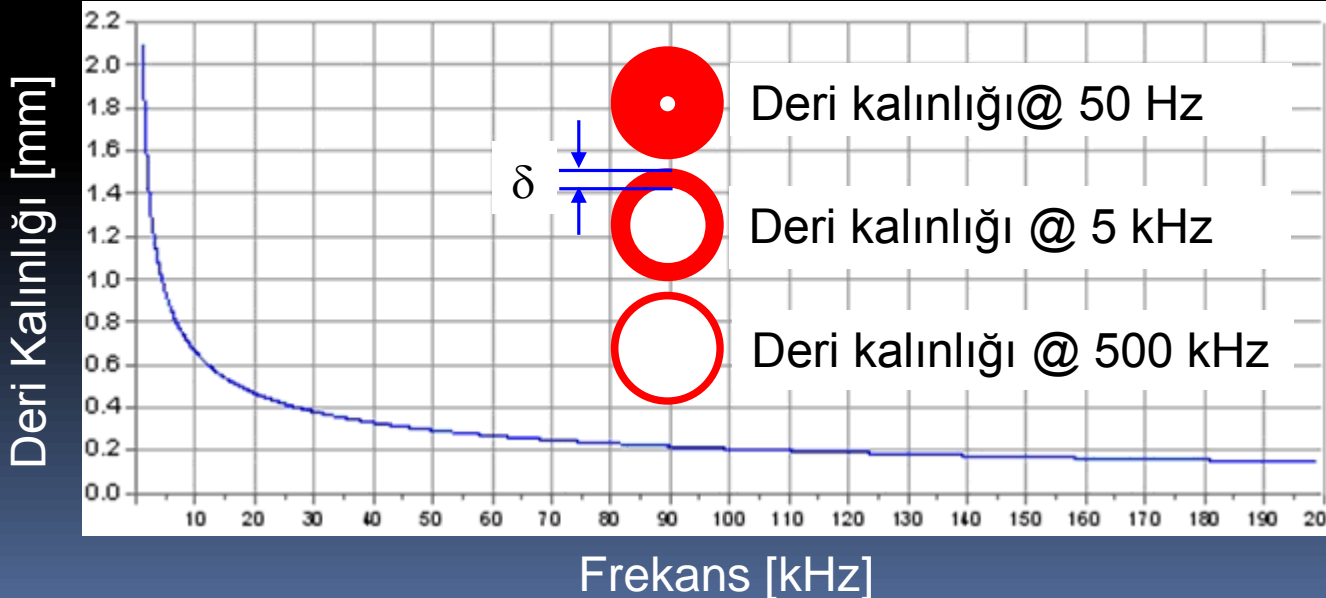
$\rho$ : İletkenin öz direnci ( $\Omega.m$ )

$\sigma$ : İletkenin öziletkenliği (S/m)

$\mu$ : İletkenin manyetik geçirgenliği (H/m)

$f$ : Frekans (Hz)

Bakır İletkende Deri Etkisi



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

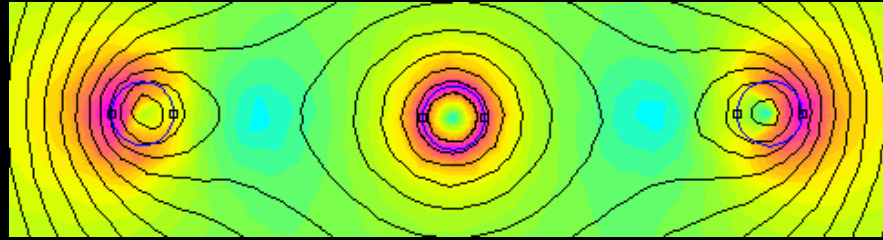
$$\mu = \mu_r \mu_0$$

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

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

# Tesla Bobininde Kayıplar

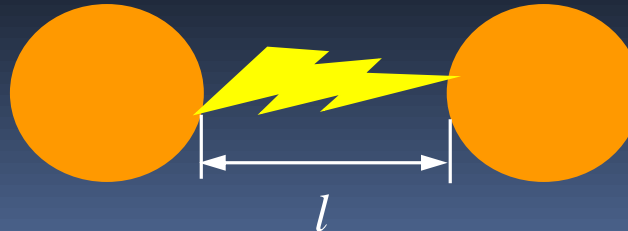
**Yakınlık etkisi:** Sarımların yakınlık etkisi sonucu direnç artar.



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 kullanılır.

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





# Tesla Bobininde Kayıplar

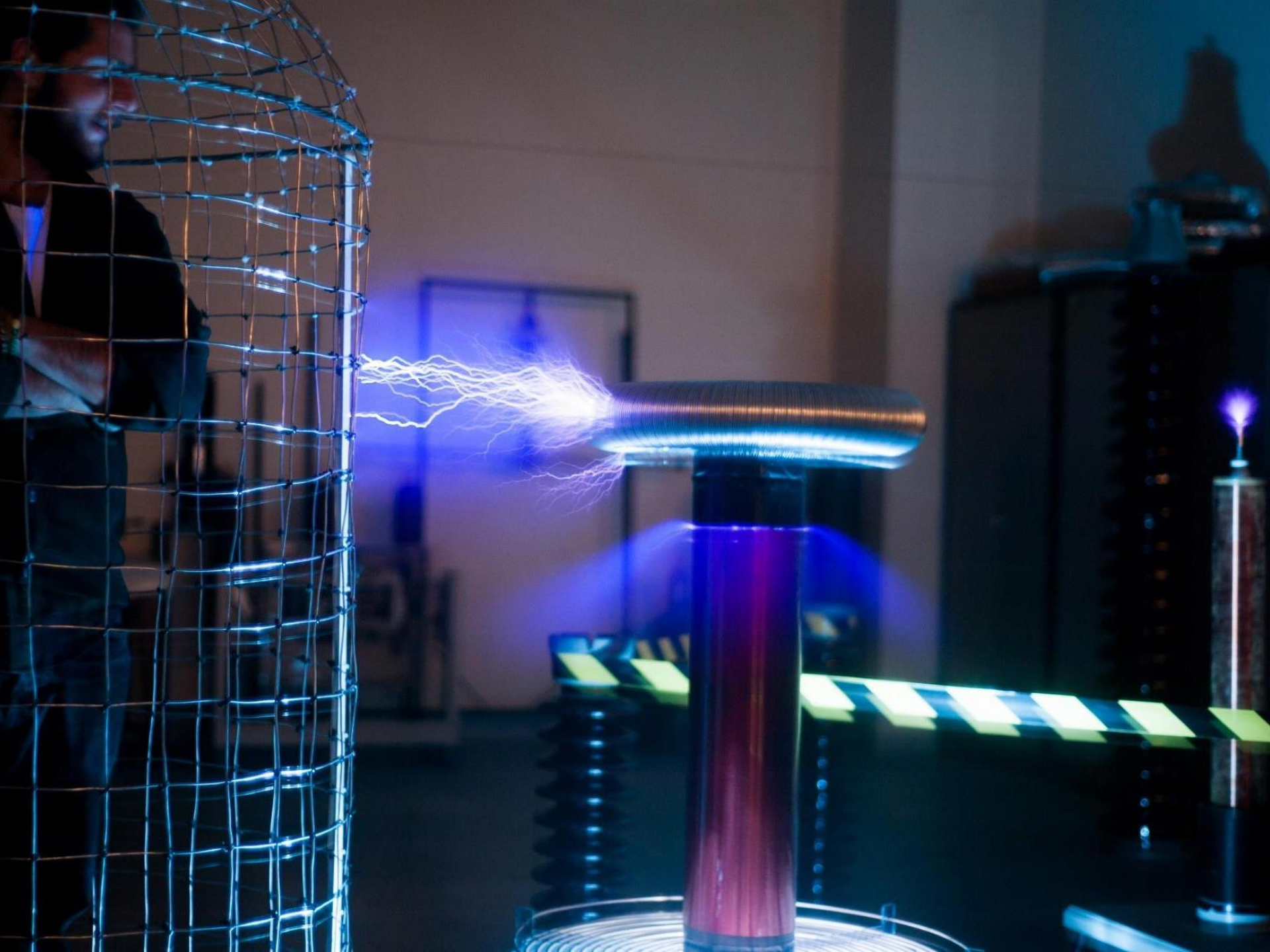
**Dielektrik kayıpları:** Birincil kondansatördeki ve bobinlerin yalıtımındaki dielektrik kayıpları

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

**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 transformatorünün girişine paralel olarak güç faktörünü düzeltmek (PFC: Power Factor Correction) için bir kondansatör ( $C_{PFC}$ ) bağlanarak transformator verimi arttırılabilir.

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

$P$ : Transformatorün gücü (W)

$U$ : Transformatorün giriş gerilimi (V) = 240 V

$f$ : Şebeke frekansı (Hz) = 50 Hz



# Ölçme

Tesla bobininde

- Yüksek frekanslı yüksek gerilimlerin
- Yüksek frekanslı akımların ve
- Frekansın (rezonans frekansının)

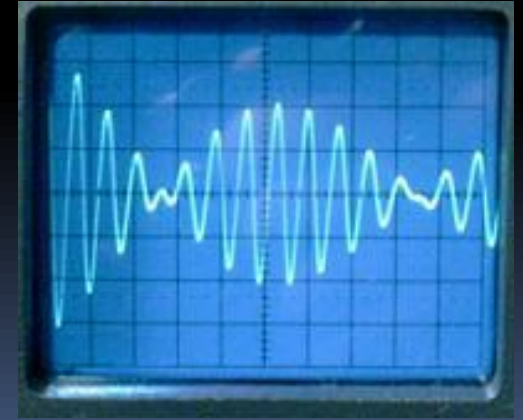
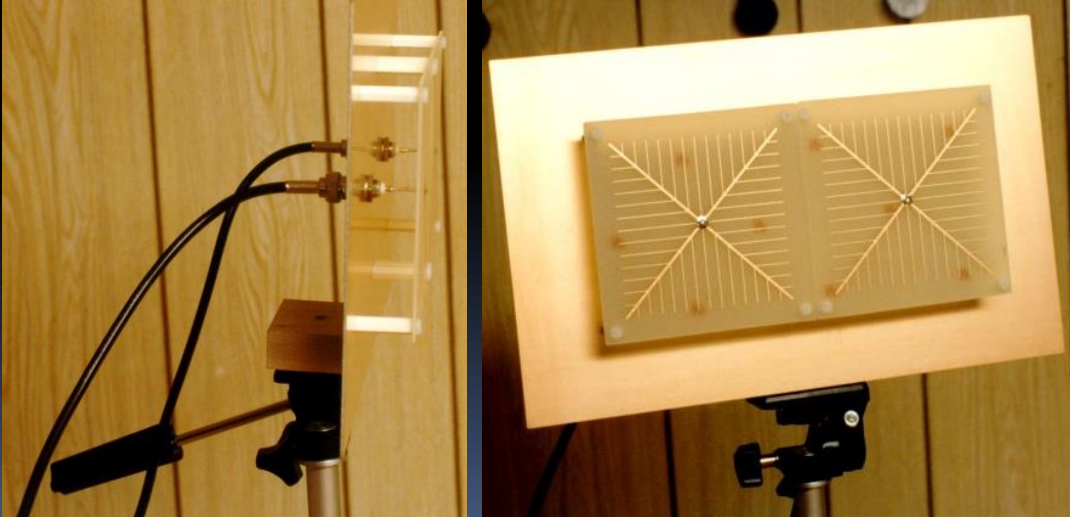
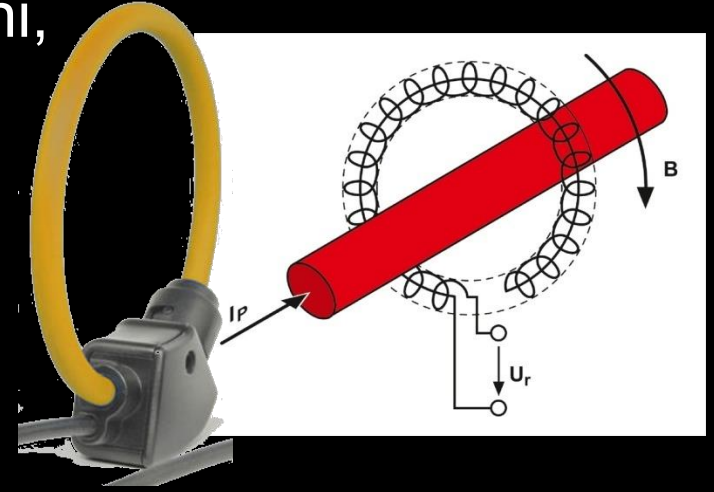
ölçülmesi istenir. Bunun için

- 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 uyumluluđuna 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!**