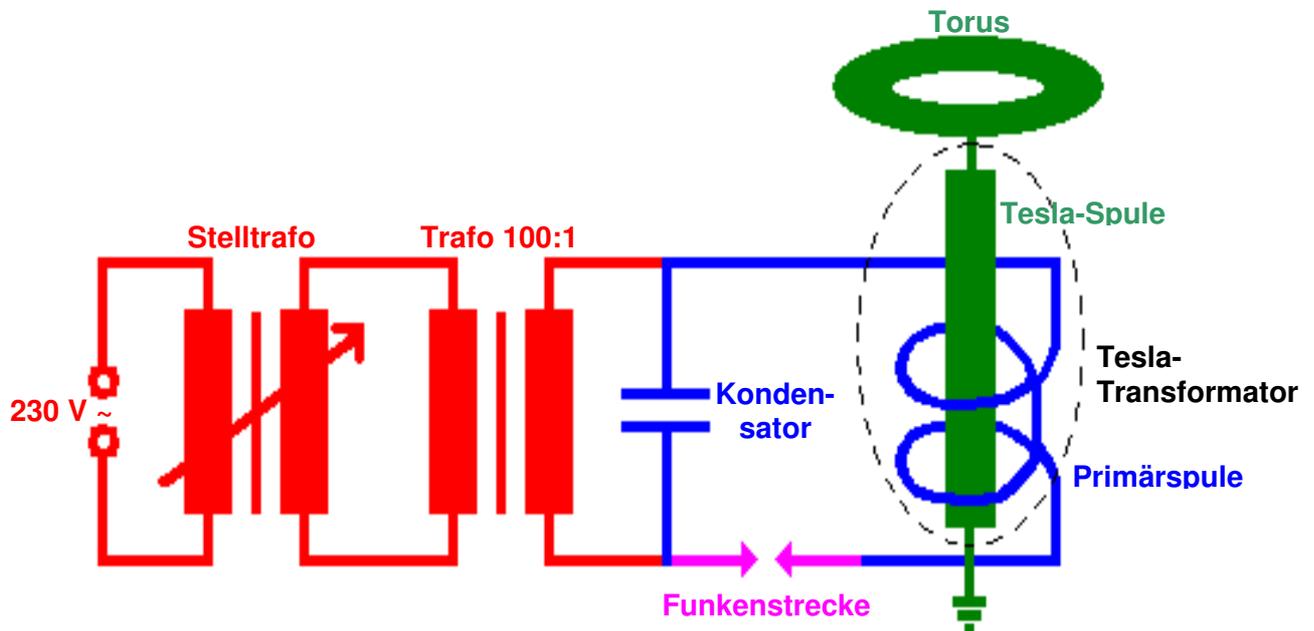


Unsere Tesla-Anlage dient der Erzeugung von Hochspannung, um damit experimentieren zu können.

Prinzipschaltbild der Tesla-Anlage:



Die Tesla-Anlage besteht aus mehreren Komponenten:

Stromversorgung: Ein Ringkern-Stelltransformator ermöglicht uns von der Netzspannung 230 V die Abnahme einer beliebigen Spannung von 0 bis 230 V. Diese Spannung wird von einem weiteren Transformator ver Hundertfacht.

Kondensator: Mit dieser hohen Spannung wird der Kondensator aufgeladen.

Primärspule: Kondensator und Primärspule bilden den **Primärschwingkreis**, der über die

Funkenstrecke geschlossen wird. Während der kurzen Zeit, in welcher der Funke besteht, erfolgt im **Primärschwingkreis** eine Schwingung der Elektronen (elektromagnetische Schwingung).

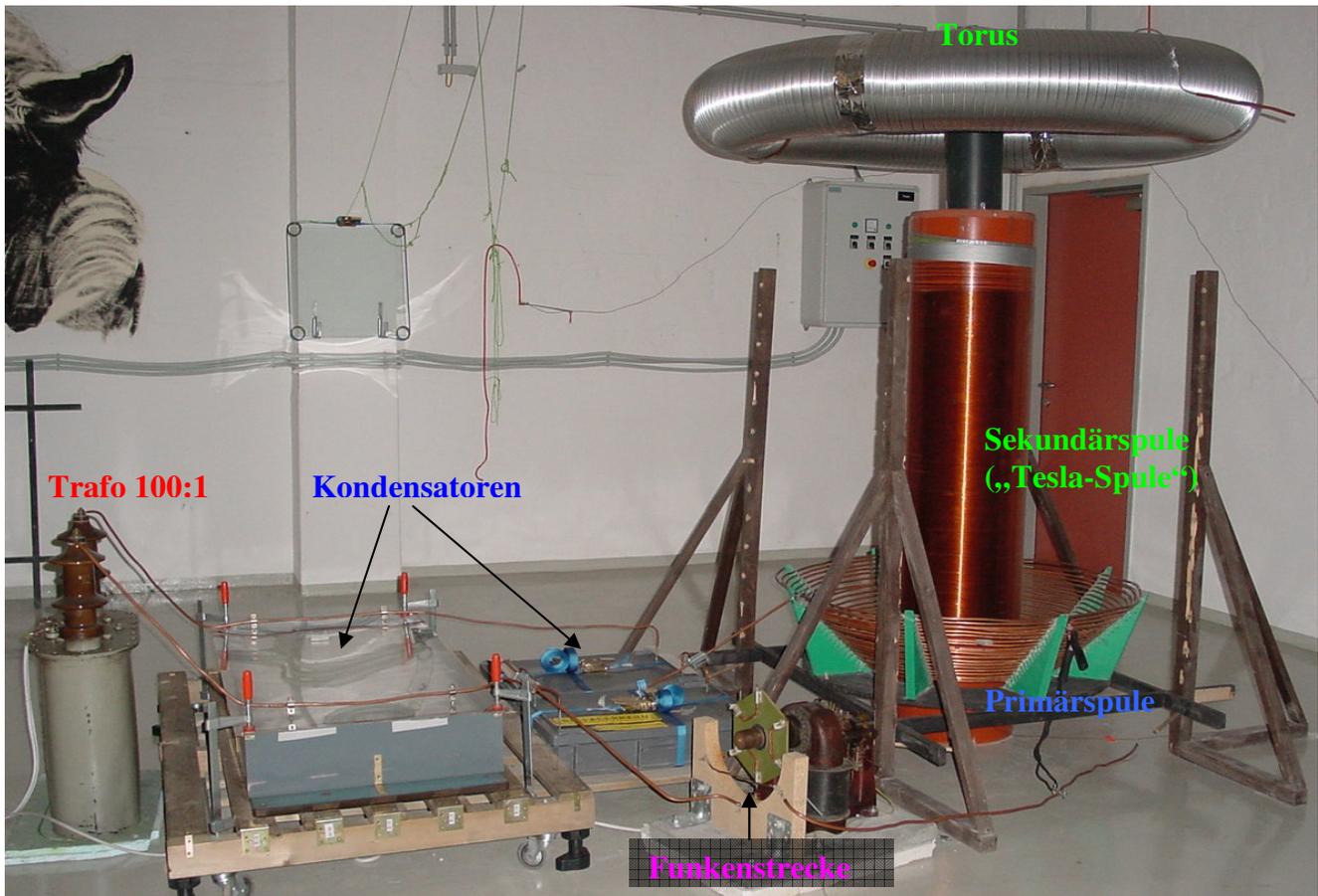
Sekundärspule („Tesla-Spule“): Sie steht in der Achse der Primärspule und hat weitaus mehr Windungen als diese. Die in der Primärspule schwingenden Elektronen induzieren in die Tesla-Spule eine hohe Spannung, die zwischen Torus und Umgebung nochmals erhöht wird.

Primärspule und **Tesla-Spule** bilden den „**Tesla-Transformator**“.

Torus: Der Torus bildet mit seiner Umgebung einen Kondensator und mit der Tesla-Spule den **Sekundärschwingkreis**. Zwischen dem Torus und seiner Umgebung entsteht die Hochspannung, mit der wir experimentieren.

Die beiden Schwingkreise sollten sich in Resonanz befinden, also gleiche Frequenz der schwingenden Elektronen haben.

Dem Prinzipschaltbild entspricht der folgende Aufbau der Anlage:



Die einzelnen Komponenten unserer Tesla-Anlage

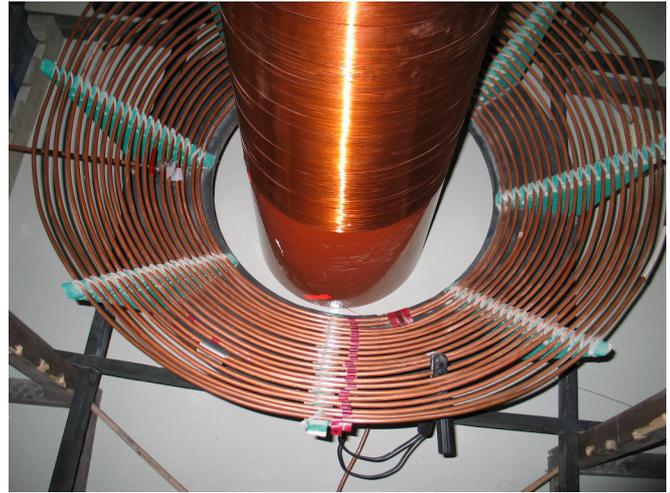
Kondensator

Eigentlich besteht unser Kondensator aus drei Kondensatoren, die parallel geschaltet sind, um die Kapazität und damit die Anzahl der Elektronen, die an der Schwingung im Primärkreis teilnehmen, zu vergrößern. Da die Kondensatoren Spannungen von mehr als 20 kV aushalten müssen, haben wir sie aus 1 mm dicken Aluminiumplatten und 2 x 1 mm dicken Polyethylenplatten als Isolator (Permittivitätszahl $\epsilon_r = 1,8$) gebaut. Da bei 20 kV bereits enorme Verluste durch Koronaentladung um die Platten auftreten, haben wir sie in hochdurchschlagsfestem Transformatorenöl gebaut (um Luftblasen zwischen den Platten zu vermeiden, erfolgte der Zusammenbau tatsächlich im Öl). Unser größter Kondensator, den wir als Schaustück mit einer Plexiglasplatte versehen haben, hat eine Kapazität von 125 nF, die zwei kleineren Kondensatoren haben je 25 nF. Damit beträgt die Gesamtkapazität 175 nF.



Primärspule

Die Primärspule besteht aus 17 Windungen eines Kupferrohres mit 10 mm Durchmesser, die wir mittels Kabelbindern an dreieckigen Holzstücken befestigt haben, um einen konischen Aufbau zu erhalten. Diesen wählten wir deshalb, weil in ihre zylindrische Vorgängerspule häufig Rückentladungen von der Sekundärspule her erfolgten, was zu Schäden an der Lack-Isolation der Sekundärspule führte. Um solche zu vermeiden, muss auch der Kopplungsgrad zwischen Primär- und Sekundärspule gering gehalten werden. Um den Kopplungsgrad verändern zu können, ist unsere Primärspule höhenverstellbar. Von den 17 zur Verfügung stehenden Windungen verwenden wir jeweils so viele, dass Primär- und Sekundär-Schwingkreis auf Resonanz abgestimmt sind.



Der aus Kondensatoren und Primärspule gebildete Primärschwingkreis hat eine Eigenfrequenz von ca. 50 kHz.

Sekundärspule („Tesla-Spule“)

Der sekundäre Schwingkreis enthält zwar eine deutlich sichtbare Spule, ist jedoch kein Schwingkreis im üblichen Sinn, da kein eigenständiger Kondensator vorhanden ist. Stattdessen wird hier die Summe der Kapazität der Spulenkupplungen gegeneinander und vor allem die Kapazität des Torus mit den Wänden des Raumes verwendet. Dies führt zu einer extrem kleinen Kapazität, welche das Pendant zur geringen Induktivität im Primärschwingkreis ist. Diese kleine Kapazität ist mitverantwortlich für die sehr hohe Spannung, die zwischen dem oberen Ende der Sekundärspule und der Umgebung zustande kommt. (Näheres siehe Kapitel ... der FBA „Experimente mit frequenter Hochspannung“). Der Aufbau der Spule ist relativ einfach, wenn auch zeitaufwendig: Auf ein Kanalrohr mit 40 cm Durchmesser sind 1250 m isolierter Kupferdraht (1001 Windungen) aufgewickelt, was einem Viertel der Wellenlänge jener elektromagnetischen Welle entspricht, die vom Sekundärschwingkreis abgestrahlt wird.



Im obersten Teil der Spule, wo die Spannung am größten wird, sind die Windungen in etwas größeren Abständen gewickelt, um Überschläge zu vermeiden. Das untere Ende der Spule ist geerdet. Damit ergibt sich unten ein „Strombauch“ und ein „Spannungsknoten“, oben hingegen ein „Stromknoten“ und ein „Spannungsbauch“, der uns am Torus die Hochspannung liefert.

Torus

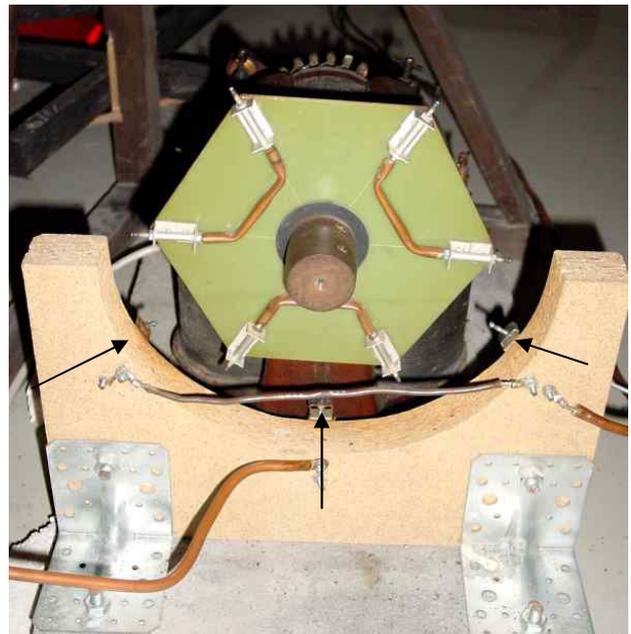
Der Torus ist aus einem Aluminium-Entlüftungsrohr gebogen, ruht auf einem Kupferkreuz mit konkaven Enden und ist mit dem oberen Ende der Sekundärspule leitend verbunden. Durch induktive Kopplung mit der elektromagnetischen Schwingung im Primärkreis geraten auch die Elektronen im Sekundärkreis in Schwingung. Nach unten hin können sie frei schwingen, da die Tesla-Spule unten geerdet ist. Schwingen sie hingegen nach oben, so laden sie den Torus an seiner Oberfläche negativ. In den Körpern der Umgebung werden dadurch die Elektronen weggeschoben (in Nichtleitern werden die Elektronenhüllen der Atome deformiert), wodurch diese dem Torus Flächen mit positivem Ladungsüberschuß zeigen. Wird die Zahl der in den Torus geschobenen Elektronen zu groß und drängen immer noch Elektronen nach, so springen Elektronen vom Torus weg – eine Blitzenladung findet statt. Um die Entladung in eine bestimmte Richtung zu lenken, verwenden wir einen Draht, der vom Torus in Richtung auf den Faradayschen Käfig zeigt, so daß die Blitze in diesen einschlagen.

Funkenstrecke

Die Funkenstrecke dient dazu, den Primärschwingkreis zu schließen. Solange der Funke bestehen bleibt, findet durch ihn hindurch die Elektronenschwingung im Primärschwingkreis statt: die in den Kondensatoren gespeicherten Elektronen versuchen, den Ladungsunterschied auf den Platten auszugleichen und wandern vom Kondensator weg. Der somit entstandene Strom baut in der Primärspule ein Magnetfeld auf, das gerade dann am stärksten ist, wenn die Kondensatoren entladen sind. Damit hätten die Elektronen keinen Grund mehr, weiterzuwandern, werden aber vom zusammenbrechenden Magnetfeld – das nach Lenz seiner Ursache entgegenwirkt – so lange in der ursprünglichen Richtung weitergeschoben, bis die Kondensatorplatten nunmehr die entgegengesetzte Ladung aufweisen wie zu Beginn. Ist der Primärschwingkreis durch den Funken immer noch geschlossen, so erfolgt jetzt die Elektronenwanderung in umgekehrter Richtung. Dieses Hin- und Herwandern zwischen den Kondensatorplatten wird als „elektromagnetische Schwingung“ bezeichnet, weil die im Primärschwingkreis enthaltene Energie zwischen der elektrischen Energie des Kondensatorfeldes und der magnetischen Energie des Spulenfeldes hin- und herschwingt.

Unsere Funkenstrecke ist eine „Rotations-Funkenstrecke“: Der nicht rotierende Teil (Stator) trägt drei Elektroden (im Bild sind sie durch Pfeile gekennzeichnet). Die beiden äußeren sind miteinander und der einen Kondensatorseite verbunden, die mittlere führt zur anderen Kondensatorseite. Der rotierende Teil (Rotor) trägt auf einer Isolatorplatte drei Kupferbügel, die bei ihrer Rotation etwa 200 mal pro Sekunde den Primärschwingkreis schließen. Das bedeutet auch etwa 200 Blitze pro Sekunde.

Angetrieben wird der Rotor von einem Elektromotor, dessen Geschwindigkeit wir mittels eines eigenen Stelltrafos steuern können.



Berechnungen zur Abstimmung der Tesla-Anlage

Für die optimale Funktion einer Tesla-Anlage kommt es in erster Linie darauf an, daß die Komponenten optimal aufeinander abgestimmt sind. Einiges dazu läßt sich schon vor dem Bau der Anlage überlegen:

Die Frequenz der Elektronenschwingung hängt zunächst einmal von der Länge des Drahtes ab, den man auf die Tesla-Spule wickelt: da deren unteres Ende geerdet ist, besitzt sie dort einen „Spannungsknoten“ (die Spannung ist dort Null). An ihrem oberen Ende steigt jedoch bis zum Blitzschlag die Spannung auf einen Maximalwert an; sie besitzt dort also einen „Spannungsbauch“. Der Abstand vom „Knoten“ zum „Bauch“ beträgt ein Viertel der Wellenlänge jener elektromagnetischen Welle, die von den schwingenden Elektronen abgestrahlt wird.

Wir haben 1,25 km Draht (1 mm dick; lackisoliert) aufgewickelt, woraus sich eine Wellenlänge von 4 mal 1,25 km = 5 km ergibt.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit jeder elektromagnetischen Welle ist gleich der Lichtgeschwindigkeit von ca. 300 000 km/s. In die Strecke, die in 1 Sekunde zurückgelegt wird, paßt die Wellenlänge 60 000 mal hinein, was einer Frequenz von 60 000 Hz (= 60 kHz) entspricht.

Dieser Wert muß allerdings korrigiert werden mit einem Faktor, der von der Geometrie der Spule und dem Material des Spulenkerns abhängt und von Paul Drude (dem Herausgeber der „Annalen der Physik“) 1904 tabellarisch aufgelistet worden ist. Für unsere Spule ergibt sich ein Faktor von ca. 0,8. Damit reduziert sich die Frequenz auf ca. 48 kHz.

Um nun den Primärschwingkreis auf die gleiche Frequenz zu bringen, haben wir mittels eines LCR-Meßgerätes die Kapazität unserer drei Kondensatoren gemessen. Diese beträgt C = 175 nF. Die Induktivität L der Primärspule kann dann mit Hilfe der Thomson-Formel

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

zu etwa 63 µH berechnet werden. Dies entspricht nach der Formel für die Induktivität einer kurzen, breiten Spule

$$L = \frac{\mu_0 AN^2}{\sqrt{l^2 + 4r^2}}$$

rund 7 Windungen einer Spule mit r = 0,5 m.

Um aber die Abstimmung auf Resonanz in der Praxis vornehmen zu können, haben wir als einzige variable Größe die Induktivität der Primärspule zur Verfügung. Wir haben 17 Windungen konisch angeordnet, wobei die Induktivität der einzelnen Windungen nach unten hin abnimmt. Der Resonanzfall ist bei optimaler Stärke der Blitzentladungen erreicht. Tatsächlich bringt eine Änderung von einer Windung die Entladung praktisch zum Erliegen, so daß wir mittels einer Kontaktzange um Bruchteile einer Windung variieren, um den optimalen Fall zu erreichen. Die Messung der Induktivität mittels eines LCR-Meßgerätes ergibt dann 58 µH. Der (geringe) Unterschied zum abgeschätzten Wert ergibt sich vor allem aus der Verwendung von Näherungswerten, aber auch daraus, daß für die Herleitung vieler Formeln idealisierte Bedingungen angenommen werden, wie sie in der Praxis nicht vorhanden sind.

Wie kommt es zur hohen Spannung ?

Sieht man die große Windungsanzahl der Sekundärspule im Gegensatz zur geringen Zahl der Windungen bei der Primärspule, denkt man unwillkürlich an einen in der Elektrotechnik üblichen Transformator zur Spannungsänderung, bei dem das Verhältnis der Spannungen mit dem Verhältnis der Windungen übereinstimmt: eine x-mal größere Windungszahl auf der Sekundärseite bringt dort auch eine x-mal größere Spannung zustande.

Dabei vergißt man aber, daß die in der Elektrotechnik üblichen Transformatoren einen Eisenkern besitzen, auf dem die beiden Spulen aufgewickelt sind, und daß dieser Eisenkern dafür sorgt, daß nahezu das gesamte von der Primärspule erzeugte Magnetfeld durch die Sekundärspule geleitet wird, um dort in jeder Spulenwindung eine Spannung zu induzieren, die dann in Summe die Sekundärspannung ergibt. Die Frequenzen der beiden Spannungen sind gleich: Hat man einmal eine Frequenz von 50 Hz, so hat man nach jeder Transformation wieder eine Frequenz von 50 Hz.

Beim Tesla-Transformator hingegen ist die Situation völlig anders: Zwar werden bei unserer Anlage die Kondensatoren mit der Netzfrequenz von 50 Hz geladen, aber nach dem Schließen der Funkenstrecke schwingen die Elektronen mit der mehr als der tausendfachen Frequenz sowohl im Primärschwingkreis als auch im auf Resonanz dazu abgestimmten Sekundärschwingkreis. Weshalb man bei so hohen Frequenzen auf einen Eisenkern verzichtet, liegt auf der Hand: Bei jeder der rund hunderttausend Umpolungen pro Sekunde müßten im Eisenkern die „Elementarmagnete“ (auch „Weißsche Bezirke“ genannt) umgeklappt werden. Bei den 100 Umklappvorgängen in Eisenkernen, die mit Netzfrequenz betrieben werden, führt dies wegen Reibung innerhalb des Eisenkerns zu einer Erwärmung desselben, was mit geringen Verlusten verbunden ist. Eine zweite Verlustquelle sind Wirbelströme, die im Eisenkern entstehen und ebenso zu dessen Erwärmung beitragen. Hunderttausend Umklappvorgänge pro Sekunde aber würden den Eisenkern so stark erhitzen, daß fast die gesamte Energie dafür verwendet werden würde; und die tausendmal raschere Änderung des Magnetfeldes würde auch die Wirbelströme tausendfach stärker machen. Abgesehen davon, daß der Eisenkern überhitzt werden würde, käme kaum etwas von der Energie in die Sekundärspule.

Also muß die Hilfe darin bestehen, den Eisenkern wegzulassen. Die Sekundärspule „spürt“ das Magnetfeld der Primärspule auch so, obwohl natürlich die „Kopplung“ zwischen den beiden Spulen bei weitem nicht so stark ist. Sie ist aber immerhin so stark, daß der Energierückfluß von der Sekundär- in die Primärspule (siehe dazu das letzte Bild dieses Artikels) in Form von Blitzentladungen vor sich gehen kann, wenn die Primärspule die Sekundärspule in deren Mitte umgibt. Deshalb muß die Primärspule so weit abgesenkt werden, daß keine Rücküberschläge stattfinden. Dann ist aber der Kopplungsgrad so gering, daß vor allem die unteren Windungen der Sekundärspule die Magnetfeldänderungen der Primärspule zu spüren kriegen, die oberen hingegen kaum mehr. Dennoch ist gerade bei diesen die Spannung am größten, weil sich ja am oberen Ende der Spule der „Spannungsbauch“ befindet.

Wie groß aber die Spannung zur Umgebung hin wird, hängt nicht nur von den Windungszahlen der Spulen ab, sondern hängt auch stark vom Kondensator ab, der sich auf der Sekundärspule befindet. Dieser besteht zu einem (nicht sichtbaren) Teil aus einer Kapazität, die die Spulenwindungen gegeneinander haben, zum sichtbaren Teil aber aus dem Körper, der oben auf der Sekundärspule sitzt (bei unserer Anlage ist es der Torus). Dieser Körper bildet ja, wie schon gesagt, mit seiner Umgebung (Decke, Wände, Boden) einen Kondensator; und die Kapazität dieses Kondensators führt zu einer „Spannungsüberhöhung“, die im wesentlichen für die hohe Spannung verantwortlich ist, die wir mit unserer Tesla-Anlage erzeugen. Theoretisch schaut dies so aus, daß die Energie, die durch Induktion in die Sekundärspule gelangt, von der Induktivität dieser Sekundärspule abhängt ($E = LI^2/2$). Eine Spule mit 1000 Windungen hat eine „relativ hohe“ Induktivität, was mit sich bringt, daß die Stromstärke I sehr gering gehalten wird. Bei der Elektronenschwingung wird aber die Energie, die zunächst im Magnetfeld der Spule steckt, in elektrische Feldenergie des Kondensators der

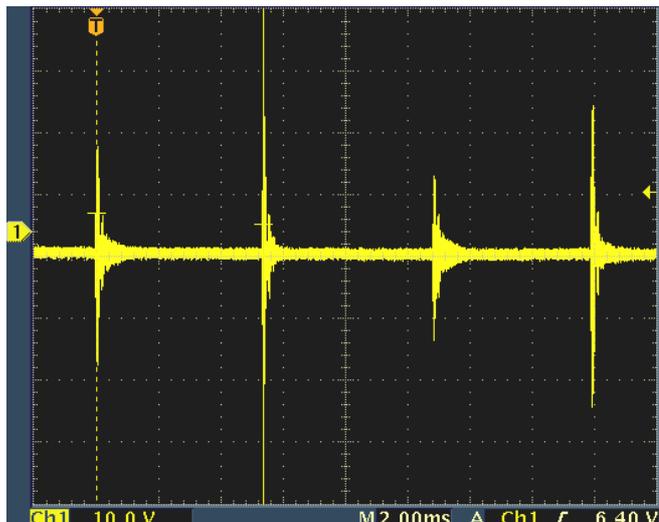
Sekundärspule umgewandelt wird ($E = CU^2/2$). Und da die Kapazität C sekundärseitig „relativ klein“ ist, folgt daraus, daß die Spannung U sehr hoch wird.

Das könnte zunächst zur Annahme verleiten, daß eine besonders kleine Kapazität eine besonders hohe Spannung mit sich bringt. Wir haben mit kleinen Kugeln, kleinen und großen Tori auf der Sekundärspule experimentiert und als eindeutiges Ergebnis erhalten, daß ein großer Torus wesentlich bessere Ergebnisse bringt als ein kleiner Torus oder eine kleine Kugel. Der Grund dafür liegt einerseits darin, daß die Elektronen einen Körper umso eher verlassen, je stärker er an seiner Oberfläche gekrümmt ist und daher das Überschreiten einer gewissen Spannung gar nicht zulassen. Ein zweiter Grund ist darin zu sehen, daß kräftige Entladungen eine große Zahl beteiligter Ladungsträger erfordert, die eher in großen Kondensatoren gespeichert werden können als in kleinen. Und erst, wenn die Spannung zwischen dem Körper am oberen Ende der Sekundärspule und seiner Umgebung eine von der Geometrie des Körpers abhängige Spannung übersteigt, sehen sich die Ladungsträger gezwungen, ihn zu verlassen: Ist der Abstand zur Umgebung zu groß, um ihn zu überspringen, als „Koronaentladung“, die sich in der Luft verliert; ist er klein genug, als „Blitzentladung“ vom Körper zur Umgebung, und zwar in der für den Blitz „attraktivsten“ Richtung, die von uns durch einen am Torus angebrachten Draht vorgegeben ist.

Oszilloskop-Aufnahmen zur Veranschaulichung der Funktionsweise des Tesla-Transformators:

Die Aufnahmen sind nach Spannungsteilung an der Sekundärspule entstanden.

Die erste Aufnahme zeigt, daß in Abständen von etwa 5 ms Entladungen einsetzen, was mit den rund 200 Schließungen der Funkenstrecke pro Sekunde übereinstimmt. Die einzelnen Entladungen sind auch unterschiedlich stark, was dadurch zu erklären ist, daß ja die Aufladung der Kondensatoren mit Wechselstrom erfolgt, der zu unterschiedlichen Zeiten verschieden stark ist, da er einen sinusförmigen Verlauf hat. Zu sehen ist auch, daß die Schwingungen stark gedämpft sind. Nach dem Abreißen des Funkens ist auch die Schwingung zu Ende und die Kondensatoren werden neu geladen.



Das zweite Bild zeigt eine der Entladungen, die gegenüber dem ersten Bild um das 20-fache gedehnt ist. Die rasche Schwingung ist jene der Resonanzfrequenz von 50 kHz in den beiden Spulen des Tesla-Transformators. Diese Schwingung ist aber von einer langsameren mit etwa 8 kHz überlagert, die folgendermaßen zustande kommt: so wie bei gekoppelten mechanischen Pendeln sich die Energie allmählich vom einen auf das andere überträgt und dann wieder retour, so regt auch die elektromagnetische Schwingung in der Primärspule erst allmählich jene in der Sekundärspule an, bis die gesamte Energie in der Sekundärspule ist; dann wird umgekehrt wieder die Schwingung in der Primärspule angeregt, und so geht es insgesamt dreimal hin und her, bis das Erlöschen der Funken in der Funkenstrecke den Schwingkreis wieder öffnet.

