

EXPERIMENTE MIT 2 MILLIONEN VOLT

1. WIE SCHÜTZT MAN SICH VOR BLITZEN?

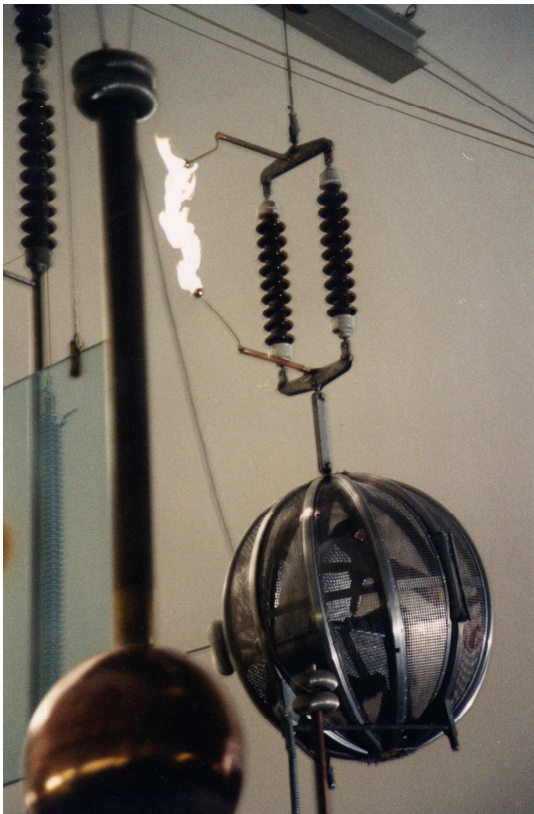
Dieses Thema ist im Zusammenhang mit Blitzen wohl das wichtigste. Weitgehend bekannt ist, dass ein Auto eine Art schützender Käfig ist, in den man sich bei drohendem Gewitter zurückziehen kann (und nicht nur des Regens wegen).

DER FARADAY-KÄFIG

Um zu zeigen, wie ein einigermaßen geschlossener Metallbehälter vor Blitzen schützt, benütze ich einen Käfig, der aus zwei Einkaufswagen besteht und den Einstieg durch eine Klappe ermöglicht. Wenn sich jemand aus dem Publikum dazu bereit erklärt (und das geschieht praktisch immer), begibt er/sie sich in den Käfig, den ich dann in die Nähe des Torus der Tesla-Anlage schiebe und erde. Wenn ich dann die Anlage in Betrieb nehme und heftige Blitze in den Käfig einschlagen, zittert das Publikum um das Heil des darin befindlichen Menschen, der die Prozedur allerdings ohne Schaden übersteht, wie sich nach seiner Befreiung aus dem Käfig zur Erleichterung aller herausstellt.



Einigermaßen von Metall umschlossene Räume, wie etwa das Innere von Autos und Flugzeugen, sind nach dem englischen Physiker Michael Faraday benannte „Faraday-Käfige“ und bieten Schutz vor Blitzen.



Der Faraday-Käfig im Deutschen Museum München

Die Idee, Faraday-Käfige in unser Vorführprogramm aufzunehmen, erhielten wir (das bin ich mit einer Gruppe von Schülern und Studenten, die mit mir gemeinsam die Anlage gebaut hat) bei einem Besuch des *Deutschen Museums* in München, wo Hochspannungsvorführungen mit 1,2 MV stattfinden und die Zuschauer begeistern.

Das dort aufgenommene Foto zeigt ein Experiment, bei dem ein Mitarbeiter in einem Metallkäfig eingeschlossen und hochgezogen wird. Daraufhin wird Spannung angelegt, die durch die Blitzentladung über die Isolatoren hinweg erkennbar wird. Dem Angestellten darf natürlich nichts passieren, da dieses Experiment sonst zu personalintensiv wäre. Warum aber geschieht ihm tatsächlich nichts? Sobald Elektronen auf den Käfig gelangen, verteilen sie sich aufgrund der gegenseitigen Abstoßung auf der Oberfläche und können nicht ins Käfiginnere gelangen.

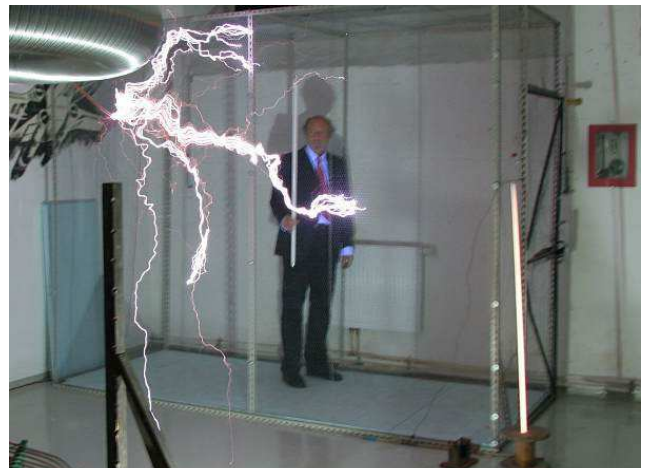
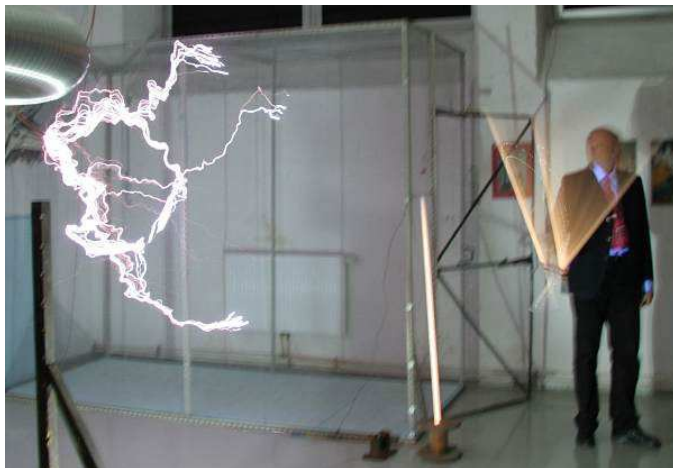
Da es aber für Besucher interessanter ist, selbst im Käfig zu sein, die Blitze auf sich zukommen zu sehen und zu erleben, dass dies gefahrlos ist, beschlossen wir, einen so großen Käfig zu bauen, dass eine ganze Schulklasse darin Platz findet. Wir lassen auch die Blitze direkt in den Käfig einschlagen. Die Besucher können sogar ihre Hände dort an das Gitter legen, wo die Blitze einschlagen, ohne davon mehr zu spüren als ein Kribbeln.



Das Innere eines Faraday-Käfigs ist nahezu feldfrei:

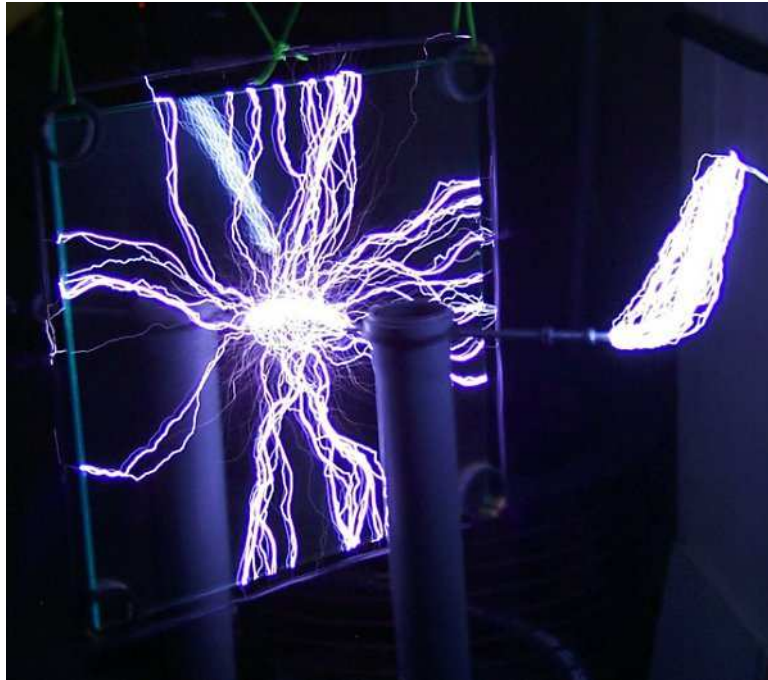
Diese Wirkung eines Metallkäfigs zeigen wir an Leuchtstoffröhren, die nirgendwo angeschlossen sind; sie werden aufgrund der hohen elektrischen Feldstärke, die sich im Raum befindet, durchgezündet. Eine Röhre steckt immer draußen in einem Holzzylinder, eine zweite Röhre hält jemand wie ein Lichtschwert (passend zur Ausstattung des Raumes) in der Hand. Außerhalb des Faraday-Käfigs leuchten beide Röhren; geht aber der Besucher mit der Röhre in den Käfig, leuchtet sie dort nicht mehr, was auf das weitgehend fehlende Feld im Käfig zurückzuführen ist; der kleine Rest eines elektrischen Feldes rührt daher, dass unser Käfig löchrig ist, um durchschauen zu können.

Dieses Experiment zeigt direkt und sehr eindringlich den Unterschied zwischen „außerhalb“ und „innerhalb“ des Käfigs.



2. WIRKUNG EINES ISOLATORS

Wie verhält sich ein Blitz, wenn er an ein undurchdringliches Hindernis gerät? Dabei wird dem Blitz auf seinem Weg zur Erdung eine isoliert hängende, 50 x 50 cm große und 1 cm dicke Glasplatte als Isolator in den Weg gestellt. Zwei Verhaltensweisen der Ladungsträger sind zu beobachten: Einerseits bilden sich Gleitentladungen, die nach ca. 10 cm auf der Glasplatte auslaufen (diese heißen nach ihrem Entdecker Lichtenberg-Figuren), andererseits nehmen Blitzentladungen den Weg um die Glasplatte herum, was spektakulär mit anzusehen und daher sehr publikumswirksam ist.



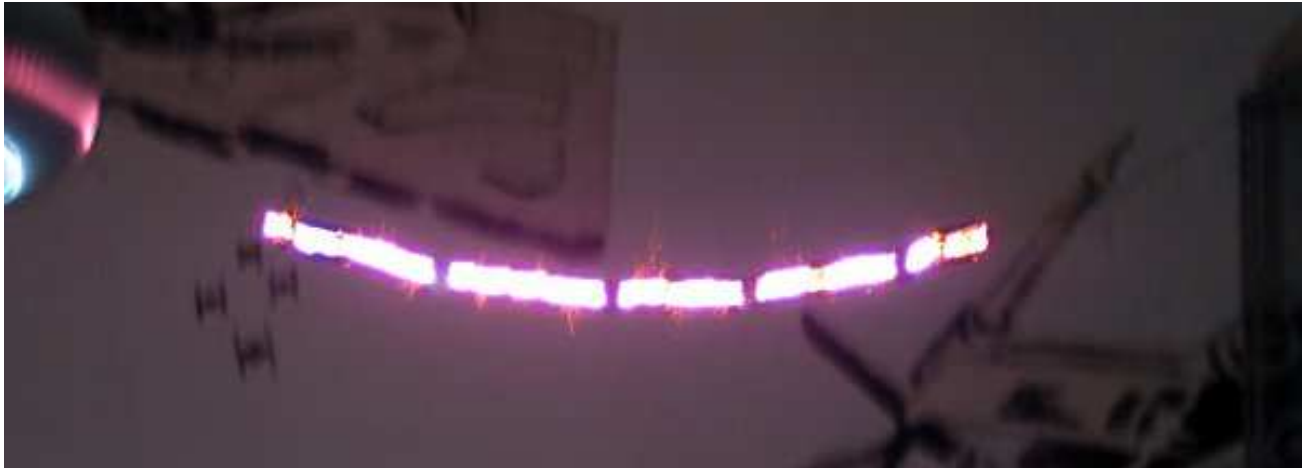
Die beiden Kunststoffrohre, die zu beiden Seiten der Glasplatte stehen, tragen je eine Metallstange. Die hintere Metallstange ist mit dem Torus der Tesla-Anlage kontaktiert. Von dieser hinteren Stange laufen die Blitze um die Glasplatte herum zur vorderen Stange, von wo sie zu einer geerdeten Metallstange springen.

3. BRANDVERHALTEN EINER SCHNUR

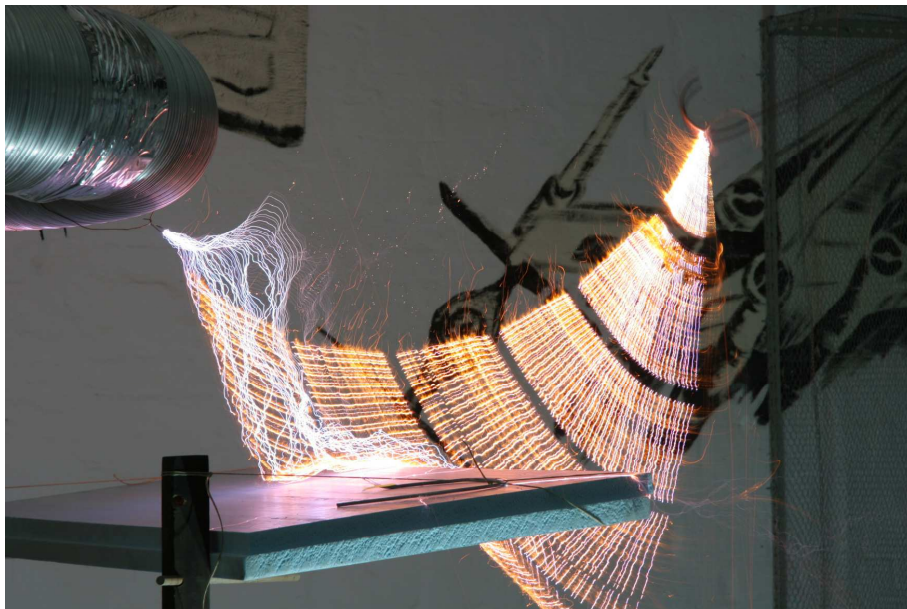
Mit diesem Experiment gehe ich der Frage nach, warum Blitze relativ selten zu Bränden führen (abgesehen davon, dass es halt oft regnet, wenn es blitzt).

An eine leicht brennbare Schnur aus pflanzlicher Naturfaser binde ich einige Beilagscheiben so, dass deren Löcher sich unmittelbar unterhalb der Schnur befinden. Da sich dort aber auch die dicksten Stellen der Beilagscheiben befinden, die den Blitzen die längsten Luftstrecken abnehmen, springen also die Blitze unmittelbar unterhalb der Schnur von Beilagscheibe zu Beilagscheibe und versuchen, mit ihrer Temperatur von einigen tausend Grad, die Schnur in Brand zu setzen. (Das folgende Bild zeigt 4 Beilagscheiben dort, wo sich die dunklen Stellen befinden.)

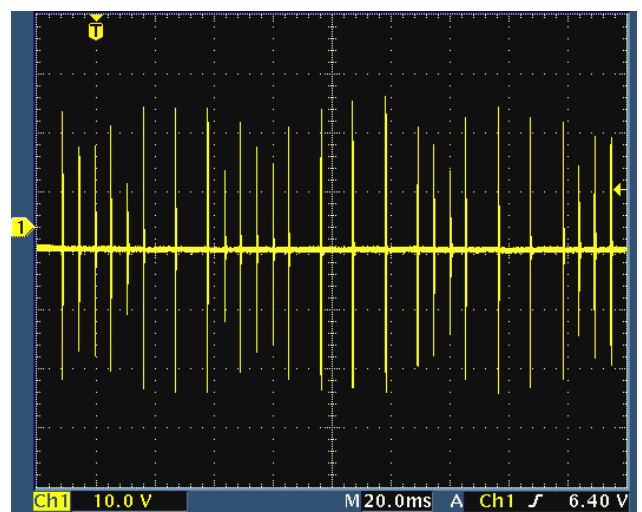
Gibt man der Schnur zunächst nur eine extrem kurze Lebensdauer, so ist man überrascht, wie lange es tatsächlich dauert, bis sie zu brennen beginnt und letztlich durchgebrannt ist. Ein Blitz in der Natur, der ja nur den Bruchteil einer Sekunde dauert, hat somit wenig Chancen, brennbares Material während dieser kurzen Einwirkungszeit auf die Entzündungstemperatur zu erhitzen.



Aus diesem Experiment lässt sich aber auch Genaueres über unsere Blitze erfahren: Nimmt man ein Foto mit Langzeitbelichtung auf, so ist zu erkennen, was geschieht, wenn die Schnur durchgebrannt ist und nach unten fällt:



Statt dass die Entladung abreißt, nimmt der Blitz durch die Ionisierung der Luft um die Schnur herum und durch die hohe Spannung weiterhin den immer länger werdenden Weg längs der Schnur. Da die Entladung immer wieder neu über die Funkenstrecke gezündet wird, kommt es zu einzelnen Überschlägen, die allerdings wegen der zu kurzen zeitlichen Abstände für menschliche Augen nicht zu erkennen sind. Daraus lässt sich mittels der Formel für den freien Fall abschätzen, dass ca. 200 Entladungen pro Sekunde stattfinden. Das passt auch gut zu Speicher-oszilloskop-Aufnahmen, auf denen zu sehen ist, dass in der Zeitbasis von 20 ms etwa 4 Überschläge erfolgen, was innerhalb einer Sekunde ca. 200 Entladungen ergibt. Außerdem lässt sich in beiden Fällen erkennen, dass manchmal Überschläge fehlen, was an der Aufladung der Kondensatoren mittels einer sinusförmigen Wechselspannung liegt.



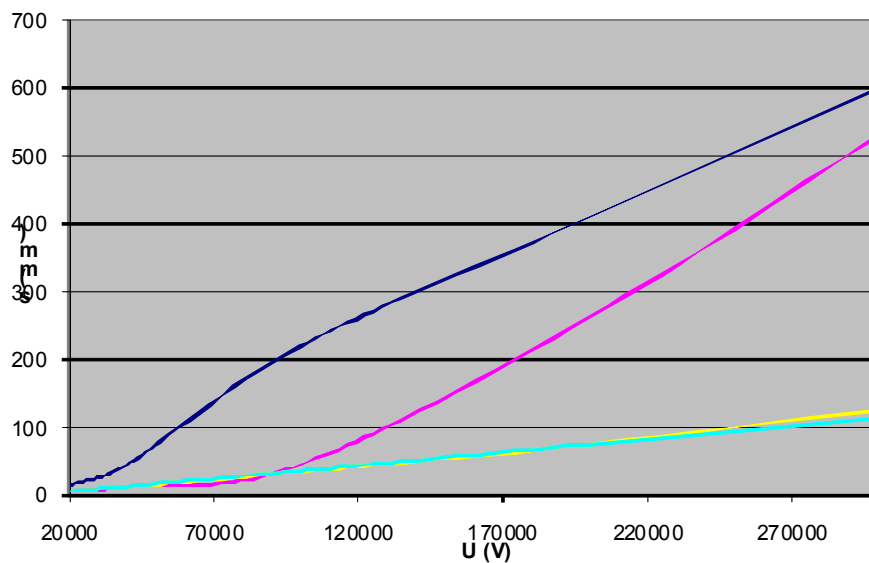
Oszilloskop-Bild zum Vergleich

4. UNSERE SPANNUNGSMESSUNG (2002)

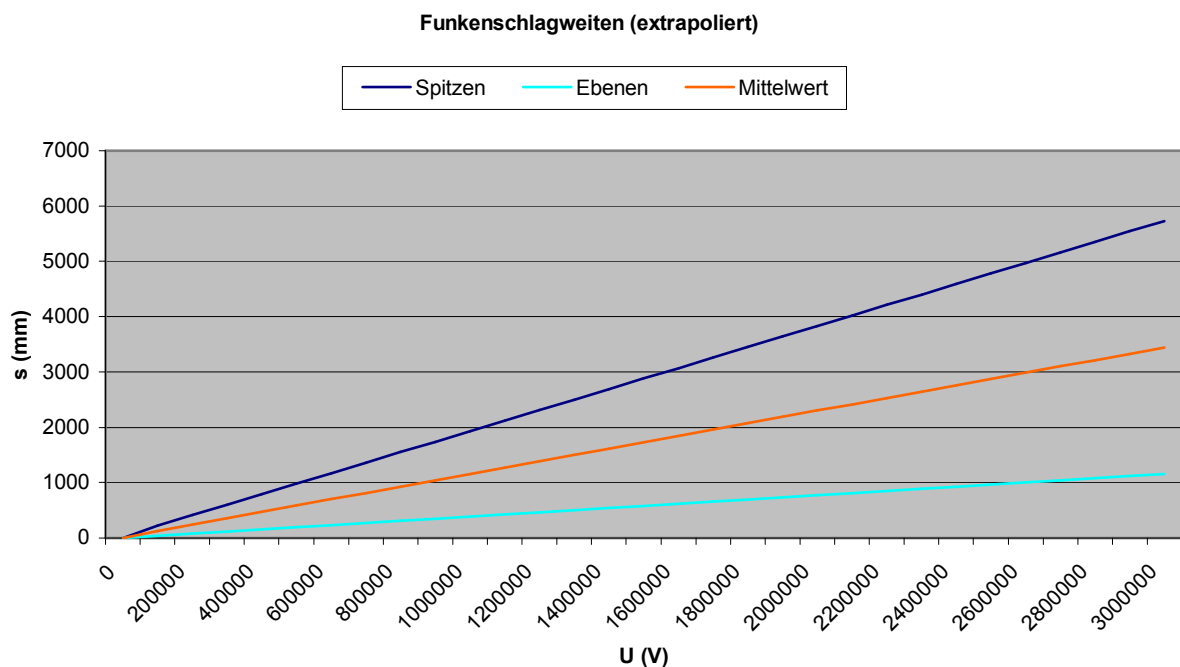
Im Experimentalphysikbuch von Bergmann-Schäfer findet sich folgende Tabelle über den Zusammenhang von Spannung und Funkenschlagweite:

Funkenschlagweiten in mm bei 20°C und 1bar zwischen Objekten				
U(V) zwischen	Spitzen	Kugeln (d=5cm)	Kugeln (d=30cm)	Ebenen
20000	15,5	5,8	6	6
40000	45,5	13	13,3	13,7
100000	220	45	35,7	36,7
200000	410	262	75,3	75,3
300000	600	530	126	114

Graphisch dargestellt ergibt sich folgendes:



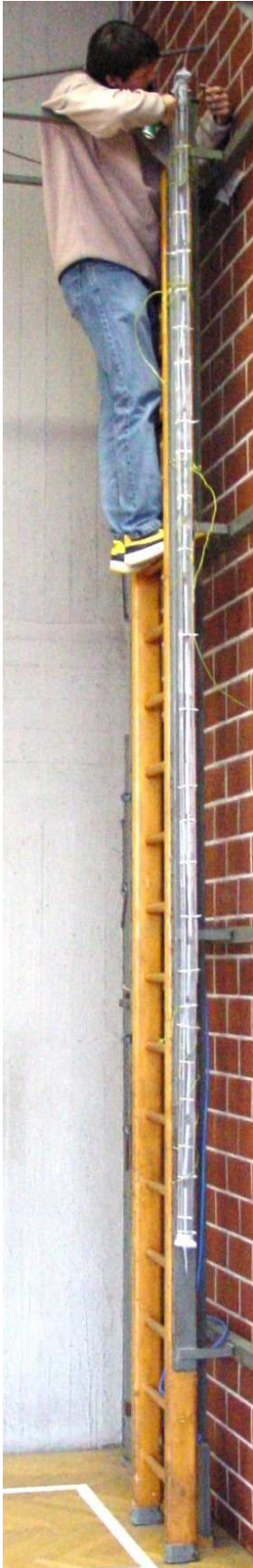
Da wir Entladungen zwischen einer Spitze und der Wand des Faraday-Käfigs haben, entspricht dies am ehesten dem Mittelwert der beiden Messreihen von zwei Spitzen bzw. zwei Ebenen. Extrapoliert man die Ergebnisse der Tabelle bis in den Bereich des Zehnfachen, so erhält man folgende Werte:



Daraus ergibt sich, dass zum Erzeugen eines Blitzes mit einer Länge von ungefähr 2 m eine Spannung von 1,8 MV erforderlich ist. Dies passt ziemlich gut zur Faustregel, die besagt, dass zum Erreichen von 1 mm Funkenstrecke eine Spannung von ungefähr 1000 V nötig ist.

Zur Spannungsmessung am Tesla-Transformator wollten wir eine Spannungsteilung im Verhältnis 100.000:1 durchführen, wobei der eine Teil direkt gemessen und dann ver Hunderttausendfacht werden sollte. Die Spannungsteilung sollte durch Widerstände von 100 G Ω bzw. 1 M Ω realisiert werden. Für den 100 G Ω -Widerstand wollten wir zwanzig 5 G Ω -Widerstände in Serie schalten, weil

der Widerstand so lang sein musste, dass ihn die Blitze nicht überspringen konnten.



Der Bau des 100 G Ω -Widerstandes

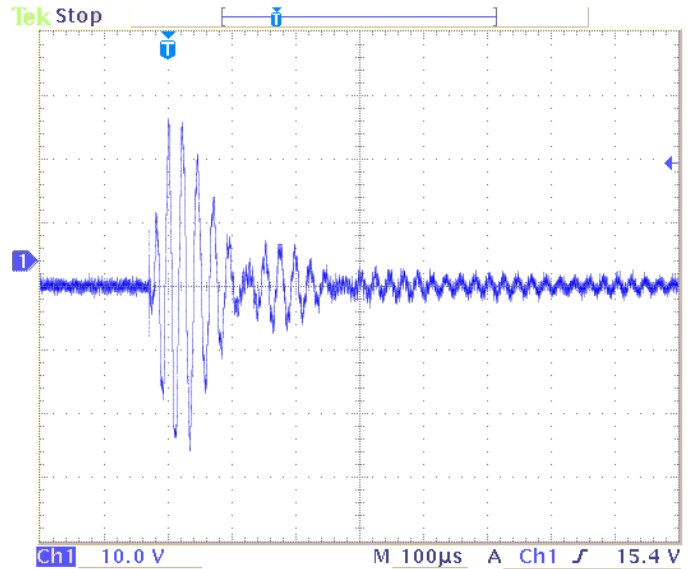
Da sich der Prototyp verhalten hatte wie erhofft, begannen wir mit dem Bau des eigentlichen Widerstandes, den wir für die Spannungsmessung verwenden wollten. Als erstes wurde eine Halterung aus Plexiglas angefertigt, um den widerspenstigen Silikonschlauch gerade zu halten. Dann löteten wir die 20 Widerstände zu einer Kette von 3,8 m Länge zusammen, wobei wir zwischen je zwei Widerstände einen Abstandhalter aus Plexiglas einfügten, um die Widerstände von der Schlauchwand fern zu halten. Schließlich zogen wir die Kette mit Hilfe einer Schnur in den Schlauch und dichteten eine der beiden Schlauchöffnungen mit 2 Schichten Silikon, einer Lackschicht mit Kunststofffasern und nochmals 2 Schichten Silikon ab, damit nur ja kein Öl ausfließen können sollte. Leider hatten wir das Glück nicht auf unserer Seite, denn nach der ersten Befüllung des Schlauches mit Öl, um zu testen, ob das Schlauchende auch wirklich dicht war, merkten wir, dass sich eine der Lötstellen in der Kette gelöst hatte. Das bedeutete: das Öl musste zurück in den Kanister gefüllt, die Dichtung entfernt, der Widerstand aus dem Schlauch gezogen, neu zusammengelötet und wieder hineingezogen werden. Erneut wurde eine Seite abgedichtet und danach wieder Öl in den Schlauch gefüllt. Dafür musste die etwa 4 Meter lange Anordnung senkrecht stehen. Die einzige Möglichkeit dafür war, sie im Turnsaal an eine Leiter zu binden, um nach der Befüllung mit Öl das obere Schlauchende ebenso abzudichten, wie es das untere bereits war. Die Arbeit nahm etwa 3 Wochen in Anspruch. Glücklicherweise war unsere Schule wegen Umbaus des alten Gebäudes übersiedelt, so dass wir im Turnsaal der alten Schule störungsfrei arbeiten konnten.



Thomas Wenk im Jahr 2002 bei den Montagearbeiten am Widerstand im Turnsaal und eine Detailaufnahme des Widerstandes (rechts)

Die eigentliche Messung

Dann wurde der Widerstand endlich eingeweiht: Markus Friedl brachte ein Speicheroszilloskop, mit welchem wir die Spannung messen konnten, die am $1\text{M}\Omega$ -Widerstand anlag. Das Speicheroszilloskop zeichnete uns den Spannungsverlauf der Entladung auf, woraus wir den Maximalwert der Spannung erkennen konnten. Bei jener Einstellung der Anlage, die uns eine Blitzentladung von 2,5 m Länge ergab, maßen wir, wie auf der Abbildung erkennbar, eine Spannung von 25V, woraus sich (allerdings noch ohne Berücksichtigung anderer ohmscher und kapazitiver Widerstände) eine Gesamtspannung von 2,5 MV ergibt. Dies lässt aber schon erkennen, dass die Faustregel, die pro Millimeter Funkenstrecke in unverdünnter Luft eine Spannung von rund 1000 V angibt, bis in den Megavolt-Bereich hinein anwendbar bleibt, was durch die Korrekturrechnung bestätigt wird.



Spannungsabfall am $100\text{ G}\Omega$ -Widerstand

Was uns während der Messung am $100\text{ G}\Omega$ -Widerstand noch aufgefallen ist:

Aus den Entladungen, die im Bereich höherer Spannung (links im folgenden Bild, also beim Torus) auftreten, aber weiter rechts nicht mehr zu sehen sind, kann man erkennen, dass die Spannung längs des Widerstandes abfällt. Es ist dies eine lange bekannte, mittels Messgeräten hinreichend überprüfte Tatsache, die hier aber besonders deutlich sichtbar wird.

