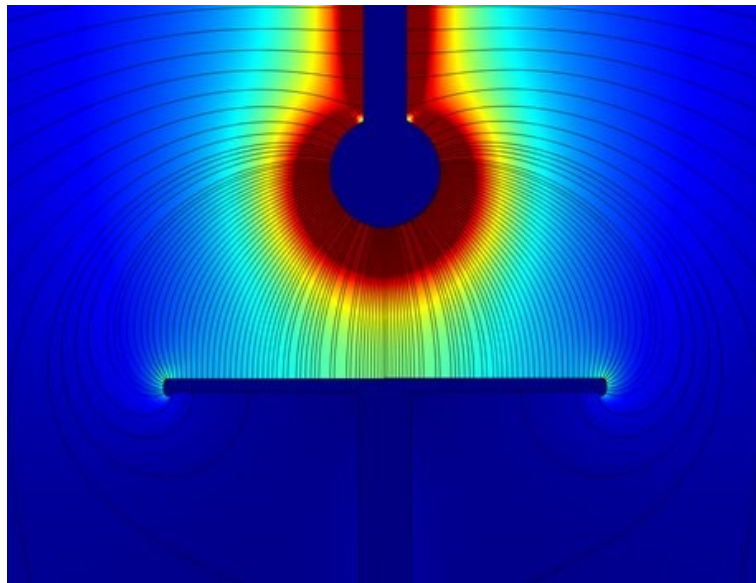


Versuchsanleitung Fachpraktikum HS1

Durchschlagsverhalten von Elektrodenanordnungen bis 200 kV

Labor: ETL C11
Zeit: 13:30 bis 16:30



Übersicht In diesem Fachpraktikum werden die Durchschlagsspannungen von verschiedenen Elektrodenanordnungen in Luft bei Spannungen bis 200 kV und Schlagweiten bis 40 cm experimentell bestimmt. Es soll vermittelt werden, welchen Einfluss die Geometrie, Spannungsform, Polarität und die atmosphärischen Bedingungen auf die Durchschlagsspannung der Anordnungen haben. Jede Gruppe untersucht zunächst eine sog. Referenzanordnung (Kugel - Kugel) und danach zwei weitere, frei wählbare Anordnungen. Die Messergebnisse werden direkt nach dem Versuch mit denen der anderen Gruppen (andere Anordnungen) verglichen und dadurch verifiziert. Schlussendlich fließen alle Messresultate in eine Datenbank ein, die kontinuierlich wächst und als Referenz verwendet werden kann, z.B. in der Vorlesung "High Voltage Engineering".



Voraussetzung für die Zulassung zum Fachpraktikum HS1 ist die Durchsicht der Aufgabenstellung, die schriftliche Bearbeitung der vorbereiteten Aufgaben in Abschnitt 4 und das Studium der Sicherheitsvorschriften im Anhang.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	4
2.1	Spannungsdurchschlag in Gasen	4
2.1.1	Stossionisation in Gasen	4
2.1.2	Kritische-Feldstärke-Kriterium und Durchschlagsvorgang	5
2.1.3	Streamerdurchschlag und Streamerkriterium	8
3	Versuchsaufbau	10
3.1	Hochspannungsprüfquellen	10
3.2	Elektrodenanordnung	10
4	Vorbereitende Aufgaben - Bitte vor dem Versuch lösen	12
4.1	Aufgabe 1	12
4.2	Aufgabe 2	13
5	Hinweise zum Versuchsablauf	15
5.1	Aufbau der Spannungsquellen	15
5.2	Hochspannungsprüfquellen für AC- und DC-Prüfspannungen	16
5.3	Befestigung der Elektroden und Justierung des Abstandes	17
5.4	Normierung der Messwerte	17
5.5	Messwerterfassung und Protokollierung	17
6	Versuchsablauf	19
6.1	AC-Referenzmessung	19
6.2	Hauptversuche	20
6.3	Fragen nach dem Versuch	21
	Literatur	22
	Sicherheitsanweisungen zum Versuch	23

1 Einleitung

Die Durchschlagsspannung einer Elektrodenanordnung hängt sehr stark von ihrer Geometrie ab. Mit modernen Simulationsprogrammen (COMSOL, ANSYS, etc.) lässt sich zwar die Feldverteilung einer Anordnung sehr genau berechnen, eine zuverlässige Bestimmung der Durchschlagsspannungen ist aber nur für einfache Geometrien möglich. Deshalb ist es in der Praxis sehr schwierig vorherzusagen, bei welcher Spannung ein Durchschlag an einer bestimmten Elektrodenanordnung stattfinden wird.

Ein Ansatz, um Aussagen über die Spannungsfestigkeit von Elektrodenanordnungen machen zu können, ist die experimentelle Ermittlung der Durchschlagsspannung. Mit diesem Praktikumsversuch soll ein Gefühl vermittelt werden, wie sich verschiedene Anordnungen verhalten. Es wird untersucht, welche Grössen und Effekte einen Einfluss auf die Durchschlagsspannung haben und wie der Homogenitätsgrad mit dem Auftreten von Korona-Entladungen zusammenhängt.

Da die Literatur fast ausschliesslich Referenzanordnungen wie die Kugel-Kugel Funkenstrecke behandelt, soll mit Hilfe dieses Praktikumsversuches eine Datenbank für vielerlei Anordnungen aufgebaut werden. Und weil die Durchschlagsspannung einer Anordnung auch von statistischen Grössen abhängt, ist es nötig, das Experiment möglichst häufig zu wiederholen. Damit lassen sich äussere Einflüsse, wie etwa ein zu schnelles Steigern der Prüfspannung, weitgehend ausmitteln. Am Ende des Versuchs wird ein Vergleich zwischen der aktuellen Messreihe und dem Mittelwert aller vergangenen Messungen angestellt.



Im Versuch wird mit Hochspannung bis 200 kV experimentiert! Obwohl alle technischen Vorkehrungen getroffen sind die Arbeiten so ungefährlich wie möglich zu machen, muss man sich bei Versuchen mit Hochspannung immer strikt an die Sicherheitsvorschriften halten. Bitte lesen sie die Sicherheitsvorschriften im Abschnitt 6.3 vor Versuchsbeginn sorgfältig!

2 Theorie

In diesem Kapitel werden die wichtigsten theoretischen Kenntnisse, die für diesen Versuch benötigt werden, erklärt.

2.1 Spannungsdurchschlag in Gasen

An einem Praktikumsnachmittag ist es nicht möglich die komplette Theorie des Gasdurchschlags zu behandeln. Es geht hier vielmehr darum, die Effekte verschiedener Geometrien, Spannungsformen und Polaritäten qualitativ zu verstehen. Aber auch dafür braucht es ein Grundverständnis, wie ein Durchschlag zustande kommt. Deshalb sind die Grundlagen zum Gasdurchschlag über das Lawinenwachstum nachfolgend dargestellt. Weiterführende Details werden in der Vorlesung "High Voltage Engineering (227-0117-00)" behandelt.

Damit ein Gas leitfähig wird, muss dieses zunächst ionisiert werden. Bei Normalbedingungen, d.h. Druck von 1 bar und Temperatur von 20 Grad Celsius, sind in Gasen auf der Erdoberfläche nur sehr wenige freie Ionen und Elektronen vorhanden, die ständig von kosmischer und terrestrischer Strahlung (z.B. Röntgenstrahlung, radioaktive Strahlung) erzeugt werden. Diese allein genügen aber nicht, um einen dauerhaften Stromfluss zu gewährleisten, sind aber die Ursache dafür, dass es bei Normalbedingungen überhaupt zu einem dielektrischen Durchschlag kommt. Die vorhandenen Elektronen werden im allgemeinen als Startelektronen bezeichnet. Der entscheidende Prozess zur Ladungsträgervermehrung ist die Stossionisation.

In einem homogenen E-Feld mit Feldstärke E zwischen zwei parallelen Platten werden Ladungsträger durch die Kraft

$$F_e = q \cdot E \quad (1)$$

beschleunigt, wobei q die Ladung des Ladungsträgers ist. In Gasen unter atmosphärischen Bedingungen liegt eine hohe Dichte an Atomen und Molekülen vor. Die beschleunigten Ladungsträger werden daher durch Stöße mit neutralen Gasteilchen abgebremst und abgelenkt, wodurch sich eine mittlere Driftgeschwindigkeit in Richtung des E-Feldes einstellt.

2.1.1 Stossionisation in Gasen

Bei jeder Kollision mit einem Gasteilchen findet ein Energieaustausch zwischen dem Ladungsträger und dem Gasteilchen statt. Solange die kinetische Energie des geladenen Teilchens unter der Ionisationsenergie bzw. Anregungsenergie der Atome und Moleküle des Gases liegt, stösst das geladene Teilchen elastisch [1]. Bei einem elastischen Stoss zwischen dem Elektron und dem neutralen Gasteilchen ist der Energietransfer aufgrund der grossen Massendifferenz sehr gering. Zwischen zwei Stößen wird ein Elektron durch das elektrische Feld beschleunigt. Aufgrund des geringen Energieverlustes bei einem elastischen Elektronenstoss mit einem neutralen Gasteilchen kann das Elektron schnell kinetische Energie akkumulieren, bis es schliesslich die Ionisationsenergie der Atome des neutralen Gases erreicht hat und ionisierend stossen kann. Dadurch wird ein weiteres Elektron und ein positives Ion gebildet wird (= Stossionisation). Da Elektronen sehr schnell hohe kineti-

sche Energien akkumulieren können und sehr beweglich sind, sind für den Entladungsaufbau ausschliesslich diese entscheidend und Kollisionen anderer Ladungsträger werden vernachlässigt. Ein Stromfluss in Gasen wird daher immer aufgrund von Elektronen betrachtet.

2.1.2 Kritische-Feldstärke-Kriterium und Durchschlagsvorgang

Bei jedem ionisierenden Stoss wird ein neues Elektron freigesetzt, welches anschliessend ebenfalls im elektrischen Feld beschleunigt wird, bis es nach einigen Stössen genügend kinetische Energie akkumuliert hat, um ein weiteres neutrales Molekül zu ionisieren [1]. Die Stossionisationsprozesse setzen sich in einem lawinenartigen Wachstum von Elektronen in Richtung der positiven Anode fort (Abbildung 1). Die dabei entstehenden positiven Ionen driften im E-Feld zur Kathode und können dort neue Elektroden aus dem Elektrodenmaterial herausschlagen (Rückwirkung), die als Startelektron für eine neue Lawine zur Verfügung stehen.

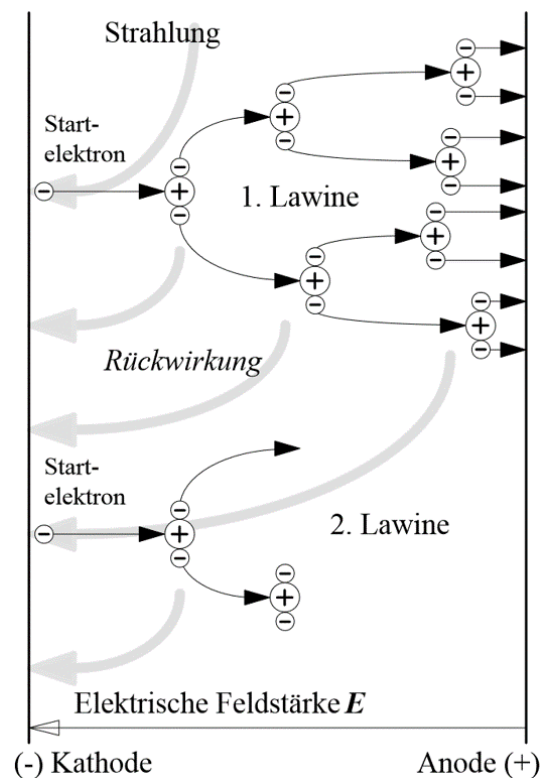


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Auslösungs-, Anlagerungs- und Stossionisationsprozessen, die zu einem lawinenartigen Wachstum von Elektronen führen [2]

Wenn ein Elektron wieder mit einem positiven Ion kollidiert, kommt es wieder zur Ausbildung eines neutralen Gasteilchens. Diesen Vorgang bezeichnet man als Rekombination. Ein Rekombinationsprozess ist immer mit der Aussendung eines Lichtquants (Photon) verbunden. Ein angeregtes Gasteilchen, das in seinen Grundzustand zurückfällt sendet ebenfalls ein Photon aus. Diese Lichtquanten können durch direkte Photoemission im

Gas oder in Wechselwirkung mit dem Kathodenmaterial weitere Elektronen generieren. Diese Elektronen dienen erneut als Startelektronen für den Aufbau weiterer Lawinen.

Freie Elektronen mit geringerer kinetischer Energie als die Ionisationsenergie können sich auch an neutrale Moleküle anlagern. Dadurch werden negative Ionen gebildet. Durch einen solchen Anlagerungsprozess wird zwar die Zahl der Ladungsträger nicht verringert, die Anzahl der freien Elektronen im Gas wird jedoch reduziert. Da negative Ionen viel weniger beweglich als Elektronen sind, wird durch Anlagerung das lawinenartige Wachstum an Elektronen reduziert. Elektronenanlagerung hemmt also den Entladungsaufbau.

Das Anwachsen der Elektronenanzahl dN_e durch Stossionisation zwischen den Positionen x und $x + dx$ kann durch folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$dN_e = \alpha \cdot N_e(x) \cdot dx \quad (2)$$

wobei α ist der Stossionisationskoeffizient ($\alpha = m^{-1}$), der die Anzahl ionisierender Stöße eines Elektrons pro Längeneinheit angibt. $N_e(x)$ beschreibt die Anzahl Elektronen an der Stelle x . Das Verringern der Elektronenanzahl durch Anlagerung ergibt sich analog, η ist der Anlagerungskoeffizient:

$$dN_e = -\eta \cdot N_e(x) \cdot dx \quad (3)$$

Aus beiden Koeffizienten zusammen lässt sich die gesamte Veränderung der Elektronenanzahl darstellen, indem man den effektiven Ionisationskoeffizienten $\alpha^* = \alpha - \eta$ betrachtet:

$$dN_e = (\alpha - \eta) \cdot N_e(x) \cdot dx = \alpha^* \cdot N_e(x) \cdot dx \quad (4)$$

Durch Integration des obigen Ausdrucks erhält man die Anzahl Elektronen $N_e(x)$ an der Stelle x . Betrachtet man nun eine mit N_0 Anfangselektronen an der Kathode startende Lawine, so sind an der Stelle x gerade

$$N_e(x) = N_0 \cdot e^{\int_0^x \alpha^*(x') dx'} \quad (5)$$

Elektronen vorhanden, wobei α^* der effektive Ionisationskoeffizient und abhängig vom Ort x' ist. Bei konstantem α^* , d.h. im homogenen Feld, erhält man für die Anzahl Elektronen in der Lawine

$$N_e(x) = N_0 \cdot e^{\alpha^* \cdot x} \quad (6)$$

Für ein $\alpha^* < 0$ dominiert Anlagerung gegenüber Stossionisation, d.h. das lawinenartige Elektronenwachstum wird gehemmt und kommt rasch wieder zum Erliegen. Bei $\alpha^* = 0$ bleibt die Anzahl Elektronen konstant, da sich Anlagerung und Stossionisation die Waage halten. Ein Anwachsen der Anzahl Elektronen liegt also nur vor, wenn $\alpha^* > 0$ ist. Der

effektive Stossionisationskoeffizient α^* ist eine Funktion in Abhängigkeit des elektrischen Feldes normiert auf den Druck, welcher im Gas vorhanden ist, d.h. $\alpha^*\left(\frac{E}{p}\right)$. Je nach Gas können verschiedene Approximationen für α^* betrachtet werden (siehe Tabelle 1). Die Feldstärke für die $\alpha^* = 0$ ist, wird als kritische Feldstärke E_{krit} bezeichnet. Dies ist eine spezifische Grösse für jedes Gas. Normiert auf den Druck erhält man für Luft und Schwefelhexafluorid SF_6 :

$$\left(\frac{E}{p}\right)_{\text{krit.Luft}} = 24.4 \frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{cm}} \quad (7)$$

$$\left(\frac{E}{p}\right)_{\text{krit.SF}_6} = 87.7 \frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{cm}} \quad (8)$$

Tabelle 1: Verschiedene Approximationsfunktionen für den effektiven Stossionisationskoeffizienten α^* mit der zugehörigen kritischen Verstärkung K_{krit} für den Streamereinsatz [1]

Gas	Approximationsfunktion	Gültigkeitsbereich
Luft	$\frac{\alpha^*}{p} = k \cdot \left[\frac{E}{p} - \left(\frac{E}{p}\right)_{\text{krit}} \right]^2$	$24.4 \frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{cm}} \leq \frac{E}{p} \leq 60 \frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{cm}}, k = 0.22 \frac{\text{cm} \cdot \text{bar}}{\text{kV}^2}$
SF_6	$\frac{\alpha^*}{p} = k \cdot \left[\frac{E}{p} - \left(\frac{E}{p}\right)_{\text{krit}} \right]$	$60 \frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{cm}} \leq \frac{E}{p} \leq 120 \frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{cm}}, k = 28 \frac{1}{\text{kV}}$
K_{krit}	13.8 bis 18.4	-

Gemäss dem Elektrische Feldstärken-Kriterium ist für jede beliebige Elektrodenanordnung eine notwendige Bedingung für den Gasdurchschlag, dass die kritische Feldstärke an irgendeiner Stelle x im Elektrodenzwischenraum überschritten ist:

$$E(x) > p(x) \cdot \left(\frac{E}{p}\right)_{\text{krit}} \quad (9)$$

Wenn also diese Bedingung an keiner Stelle x erfüllt ist, so kann kein Gasdurchschlag auftreten. Für sehr homogene Anordnungen ist mit dem Erreichen der kritischen Feldstärke an irgendeiner Stelle auch im gesamten Elektrodenzwischenraum die kritische Feldstärke erreicht (konstantes E-Feld), wodurch das Elektrische Feldstärken-Kriterium in diesem speziellen Fall sowohl notwendig als auch hinreichend ist. Für schwach oder stark inhomogene Anordnungen ist das Elektrische Feldstärken-Kriterium für den Gasdurchschlag nur eine notwendige Bedingung, nicht jedoch eine hinreichende.

2.1.3 Streamerdurchschlag und Streamerkriterium

Bisher sind wir davon ausgegangen, dass die durch Stossionisation entstehenden Raumladungen, d.h. die Elektronen und positiven Ionen, keine Auswirkung auf das angelegte elektrische Grundfeld haben. Wächst die von einem Startelektron ausgelöste Lawine auf etwa $N_{\text{krit}} \sim 10^6$ bis 10^8 Elektronen an, ergibt sich eine nicht mehr zu vernachlässigende Veränderung der elektrischen Feldstärke in der Umgebung der Lawine, die über das Grundfeld dominiert. So wird es möglich, dass die Lawine auch in Bereiche vorwachsen kann, in denen das Grundfeld noch nicht die kritische Feldstärke erreicht hat. Die Feldstärke der Raumladungen sorgt dafür, dass die Entladung selbsterhaltend wird. Dieser Durchschlagsmechanismus wird als Streamerdurchschlag bezeichnet.

Das Erreichen der kritischen Anzahl Elektronen N_{krit} und damit das Eintreten des Streamerdurchschlages stellt eine hinreichende Bedingung für einen Gasdurchschlag in homogenen und schwach inhomogenen Anordnungen dar. Zahlreiche Messungen haben gezeigt, dass das Streamerkriterium gilt:

$$10^6 \dots 10^8 = N_{\text{krit}} < N_e(x) = N_0 \cdot e^{\int_0^x \alpha^*(x') dx'} \quad (10)$$

$$\rightarrow \int_0^x \alpha^*(x') dx' = K_{\text{krit}} = \ln(N_{\text{krit}}) \sim 13.8..18.4 \quad (11)$$

Für ein besseres Verständnis soll nun die inhomogene Spitze-Platte-Anordnung betrachtet werden (Abbildung 2). In Gebieten hoher Feldstärke überwiegt die Ladungsträgerbildung durch Stoßionisation $\alpha > \eta$, in Gebieten niedriger Feldstärke die Anlagerung von Elektronen $\alpha < \eta$. Die Integration findet in einer inhomogenen Anordnung nicht bis $x = d$ sondern nur bis $x = x_{\text{krit}}$ statt, d.h. gerade über das Gebiet mit positivem α^* . Wird N_{krit} erreicht, so hat die Lawine genügend Raumladung gebildet, um in das feldschwache Gebiet vorwachsen zu können. Wenn N_{krit} nicht erreicht wird, nimmt die Elektronenzahl aufgrund von Anlagerungen wieder ab und es kommt nicht zum Durchschlag.

In Worten: Wenn die Lawine entlang einer Feldlinie die kritische Elektronenzahl erreicht, bevor sie die Anode erreicht, kommt es in einer schwach inhomogenen Anordnung mit Sicherheit zum Durchschlag. Die Zahl der Anfangselektronen N_0 an der Stelle $x = 0$ wird dabei als 1 angenommen, da der Faktor N_0 gegenüber dem exponentiellen Wachstum einen vergleichsweise geringen Einfluss hat. Aus unterschiedlichen Approximationsfunktionen für α^* erhält man die Zahlenwerte für die kritische Elektronenzahl (Tabelle 1).

Ein Vergleich wissenschaftlicher Arbeiten zeigt, dass man in den jeweiligen Geltungsbereichen hinreichend übereinstimmende Ergebnisse für den Streamereinsatz erhält. Für die von Zaengl et al. in [1] angegebenen Funktionen für α^* werden kritische Elektronenzahlen $N_{\text{krit}} = 10^6 \dots 10^8$ angegeben, was einer kritischen Verstärkung von $K_{\text{krit}} = 13.8 \dots 18.4$ entspricht. Daraus kann man Folgendes ableiten. Damit es überhaupt zu einer Lawinenentwicklung kommen kann, muss an irgendeinem Punkt auf den Elektroden die Grenzfeldstärke $\left(\frac{E}{p}\right)_{\text{krit}}$ überschritten sein. Es genügt nicht, die Feldstärke auf den Elektroden zu bewerten. Vielmehr muss man den Feldstärkeverlauf im ganzen Elektrodenraum

berücksichtigen. Man kann für jeden Punkt auf den Elektroden eine Streamereinsatzspannung bestimmen. Die Spannungsfestigkeit der Anordnung entspricht der kleinsten berechneten Streamereinsatzspannung der gesamten Anordnung. Ist innerhalb einer Elektrodenanordnung die Grenzfeldstärke überschritten, jedoch das Streamerkriterium nicht erfüllt, kommt es zu stabilen Teilentladungen (TE), die nicht zum Durchschlag führen.

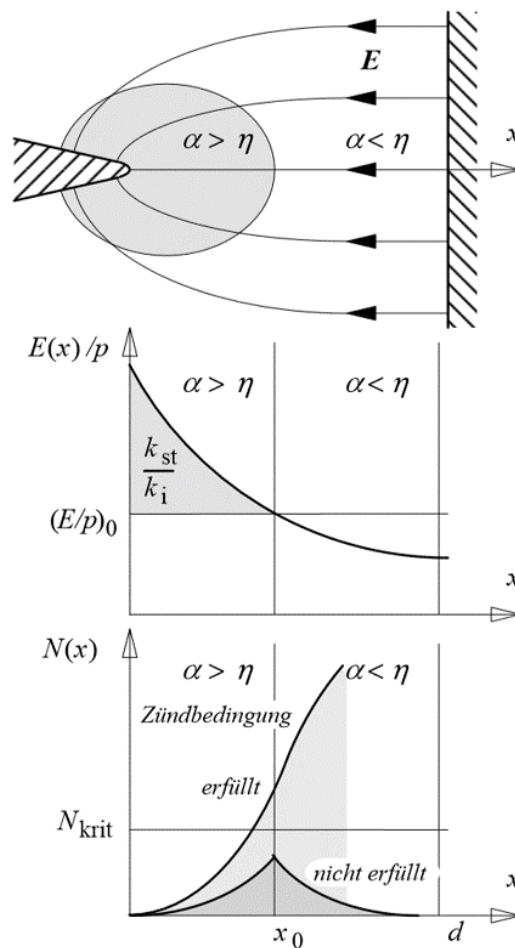


Abbildung 2: Entwicklung von Elektronenlawinen im inhomogenen Feld vor einer negativen Spitze. Oben: Gebiete mit positivem und negativem effektiven Ionisationskoeffizienten; Mitte: Feldstärkeverlauf entlang der x-Achse; Unten: Lawinenentwicklung mit überkritischer und unterkritischer Elektronenzahl [2]

3 Versuchsaufbau

3.1 Hochspannungsprüfquellen

Für die Spannungserzeugung wird der universell einsetzbare Experimentier-Baukasten (MWB Messwandlerbau Bau AG, Bamberg) verwendet. Seit 1960 hat er nicht nur in Hochspannungsinstituten weltweit, sondern auch in Prüffeldern der Industrie Eingang gefunden für die Erzeugung von hohen Wechsel-, Gleich- und Stossspannungen. Der Baukasten verwendet als primäre Hochspannungsquelle für alle Prüfspannungsarten 100-kV-Transformatoren, einzeln oder in Serie geschaltet. Damit lassen sich dann 50-Hz-Prüfspannungen bis 300 kV (rms) und DC- und Stossspannungen bis ca. $\pm 300 \text{ kV}$ (peak) erzeugen.

Während für die Wechselspannungserzeugung lediglich in Serie geschaltete Transformatoren benötigt werden, muss für hohe DC- und Blitzstossspannungen die Wechselspannung zunächst mit Hilfe von einem Einweggleichrichter und Glättungskondensator erzeugt werden.

3.2 Elektrodenanordnung

Die Elektrodenanordnung ist das eigentliche Herzstück von diesem Versuch. Sie ist so aufgebaut, dass alle nötigen Distanzen präzise und schnell von Hand eingestellt werden können. Abbildung 3 zeigt die schematische Elektrodenanordnung für eine in Kugel-Platte-Konfiguration. Es können auch beidseitig andere Elektroden aufgeschraubt werden. Die Länge beider Elektrodenhalterungen (und damit der Abstand der Elektroden) sind manuell justierbar.

Folgende Elektroden sind vorhanden:

- Alu-Platte mit 50 cm Durchmesser
- Spitze 30° mit 25 mm Schaftdurchmesser
- Kugel mit 125 mm Durchmesser
- Stab mit 25 mm Durchmesser (mit flacher Stirnseite)
- Rundstab mit 25 mm Durchmesser (mit halbkugelförmiger Stirnseite)



Abbildung 3: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung (Kugel-Platte)

4 Vorbereitende Aufgaben - Bitte vor dem Versuch lösen

Gegeben seien die vier folgenden Elektrodenanordnungen, wobei die Platte geerdet ist und die obere Elektrode auf dem Hochspannungspotential ϕ liegt.

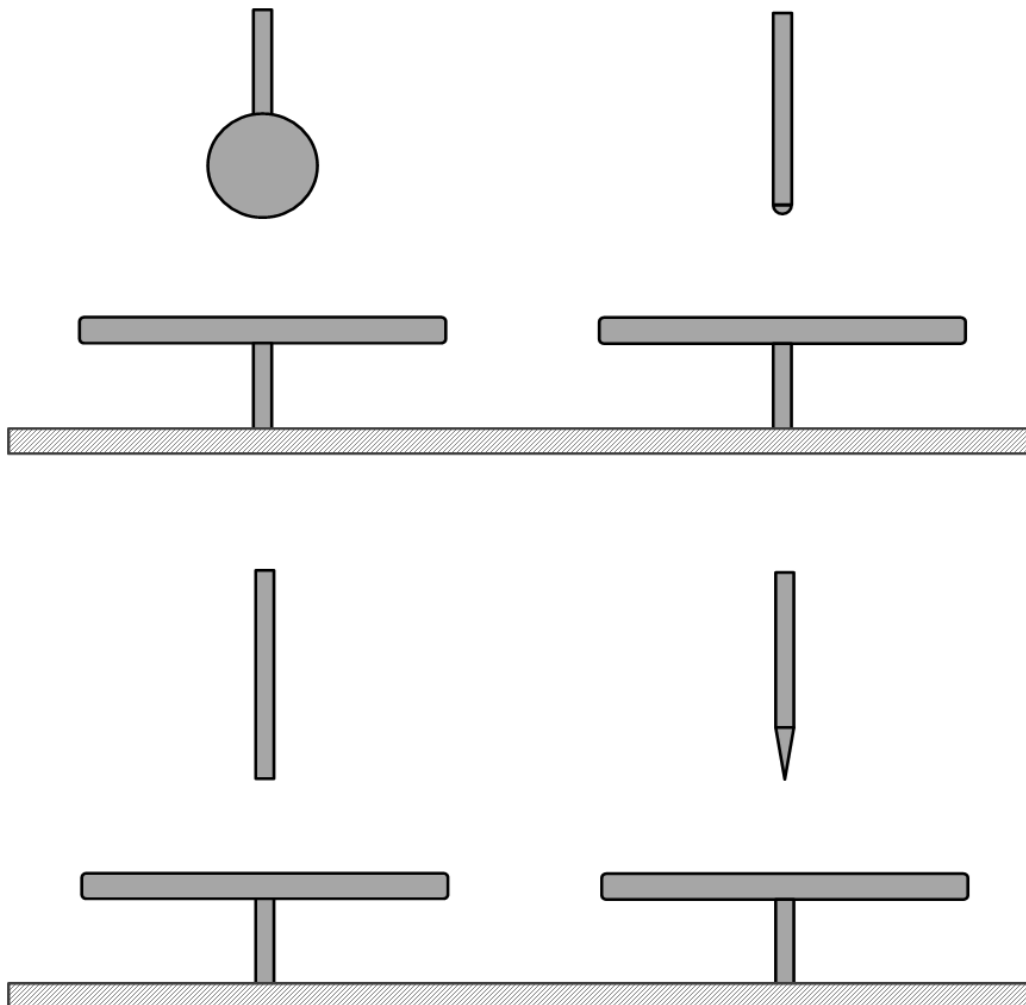


Abbildung 4: Schematische Zeichnungen der verschiedenen Elektrodengeometrien. Kugel-Platte (oben links), Rundstab-Platte (oben rechts), Stab-Platte (unten links), Spitze-Platte (unten rechts).

4.1 Aufgabe 1

- Zeichnen Sie die Äquipotential- und Feldlinien des elektrischen Feldes qualitativ in die Elektrodenanordnungen von Abbildung 4 ein.

- b) Wie verhält sich das Feld an Kanten, Spitzen und Ecken? Warum ist das so?
- c) Welche Anordnung hält am meisten, welche am wenigsten Spannung? Begründen Sie kurz Ihre Aussagen.

4.2 Aufgabe 2

Die Kugel in der Elektrodenanordnung von Abbildung 4 habe einen Durchmesser von 12.5 cm. Der Abstand der Kugel zur Platte betrage 10 cm, die Platte habe einen Durchmesser von 50 cm. Die Anordnung befindet sich in Luft bei einem Druck von 1 bar.

- a) Ist das elektrische Feld in dieser Anordnung eher homogen oder inhomogen? Achten Sie auf das Verhältnis von Kugeldurchmesser zum Abstand der Elektroden.
- b) Was ist die kritische Feldstärke E_{krit} ? Geben Sie eine Erklärung und den für diese Aufgabe relevanten Wert an.
- c) Geben Sie eine sinnvolle Abschätzung der Durchschlagsspannung für die Kugel-Platte Anordnung an.

- d) Ist Ihre Abschätzung auch für eine Spitze-Platte-Anordnung gültig? Begründen Sie kurz.

5 Hinweise zum Versuchsablauf

5.1 Aufbau der Spannungsquellen

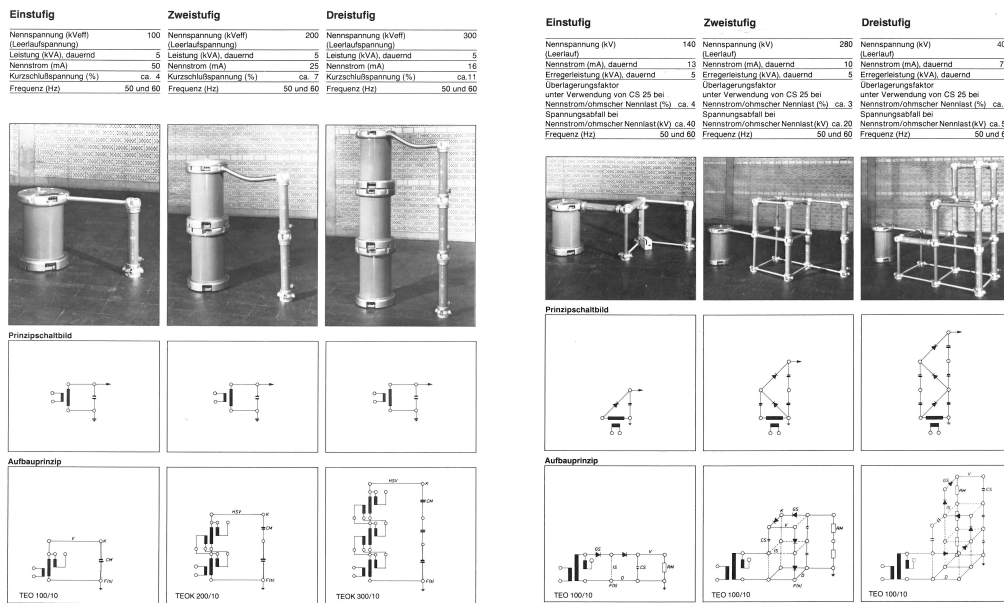
Um aufzuzeigen, dass die Spannungsform einen Einfluss auf die Durchschlagsspannung hat, können Sie den Durchschlagsversuch wahlweise mit Wechsel- oder Gleichspannung durchführen. Am Versuchsnachmittag werden Sie zusammen mit dem anwesenden Assistenten zwei Versuche auswählen, abhängig davon, welche Daten in der Gesamtdatenbank aktuell noch benötigt werden. Bevor die eigentliche Messung beginnen kann, muss zunächst die jeweilige Spannungsquelle aufgebaut werden. Für den Aufbau stehen Ihnen die Schaltpläne und Fotos von Abschnitt 5.2 zur Verfügung. Diese Informationen finden Sie auch im Praktikum auch noch einmal als A4-Ausdrucke vor. Zur Schonung der HS-Elektroden beim Durchschlag werden bei den AC- und DC-Versuchen zwischen den Ausgang der HS-Quelle und Elektrode zusätzliche Widerstände (z.B. $2 \times 375 \Omega$) zur Strombegrenzung eingesetzt. Diese Widerstände sind in den AC- und DC-Schemata von Abschnitt 5.2 nicht eingezeichnet, weil sie für den Eigenschutz der Spannungsquelle nicht unbedingt erforderlich sind. Bitte halten Sie sich beim Aufbau genau an den Schaltplan und die Fotos. Der Assistent wird Ihnen mit der Handhabung der HS-Bauteile behilflich sein und den Aufbau am Schluss auch überprüfen.



Nehmen Sie die Hochspannungsquelle nach einem Aufbau oder Umbau nicht alleine in Betrieb! Lassen Sie den korrekten Aufbau vom Prüfkreis immer durch einen Betreuer des High Voltage Laboratory überprüfen.
Es gilt ein striktes 4-Augen-Prinzip!

5.2 Hochspannungsprüfquellen für AC- und DC-Prüfspannungen

Im vorliegenden Praktikumsversuch werden nur zweistufige Prüfschaltungen verwendet, was 50-Hz-Wechselspannungen bis 200 kV (rms) und Gleichspannungen bis ca. ±200 kV ermöglicht.



(a) AC-Prüfkreis

(b) DC-Prüfkreis

Abbildung 5: Schaltbilder der Versuchsaufbaus



(a) AC-Prüfkreis im Labor



(b) DC-Prüfkreis im Labor

Abbildung 6: Prüfkreise im Labor 200 kV mit zwei Strombegrenzungswiderstände von je 375 Ω

5.3 Befestigung der Elektroden und Justierung des Abstandes

Alle Elektroden sind schraubbar und können ohne Werkzeug von Hand gelöst und befestigt werden. Achten Sie bitte beim Anbringen bzw. Lösen der Elektroden darauf, dass diese nicht herunterfallen - **Danke!**

Für die Feinjustierung der Abstände verfügt die Elektrodenhalterung über ein Millimeter-Gewinde. Mit den vorhandenen Kunststoff-Lehren können die Elektrodenabstände überprüft und genau eingestellt werden.

5.4 Normierung der Messwerte

Die Durchschlagsspannung U_d einer Elektrodenanordnung ist vom Zustand der atmosphärischen Luft abhängig. Bei schwach inhomogenen Funkenstrecken, wie etwa der Kugel-Kugel- oder Kugel-Platte-Anordnung, ist die Durchschlagsspannung hauptsächlich von der Luftdichte abhängig, während die Luftfeuchtigkeit entgegen dem allgemeinen Empfinden im Normalfall vernachlässigbar ist. Allgemein gilt:

$$U_d = U_{d0} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (12)$$

wobei k_1 zur Luftdichtekorrektur und k_2 zur Luftfeuchtekorrektur dienen. Dabei wird k_2 meist vernachlässigt. U_{d0} ist die Durchschlagsspannung unter Normalbedingung. Um die im Praktikum ermittelten Durchschlagsspannungen mit vergangenen Messungen vergleichen zu können ist eine Korrektur der Werte auf atmosphärische Normalbedingungen notwendig; U_d ist die gemessene Durchschlagsspannung und U_{d0} kann entsprechend berechnet werden. Unter atmosphärischen. Normalbedingungen versteht man eine Temperatur $T = 20^\circ\text{C}$, Luftdruck $p = 1013 \text{ mbar}$ und eine Luftfeuchte (absolut) $h = 11 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$. Die Luftfeuchtekorrektur k_2 kann in dieser Referenzmessung vernachlässigt werden, die Luftdichtekorrektur k_1 berechnet sich wie folgt:

$$k_1 = \frac{p}{1013} \cdot \frac{(273 + 20)}{273 + T} \quad (13)$$

wobei p der aktuelle Luftdruck in mbar und T die aktuelle Temperatur in Grad Celsius ist.

5.5 Messwerterfassung und Protokollierung

Für die Messungen steht Ihnen ein Peak-Voltmeter zur Verfügung mit dem festgehalten werden kann, wie gross die AC- oder DC-Spannung unmittelbar vor dem Durchschlag war. Für AC-Spannungen wird in der Regel der Scheitelwert geteilt durch $\sqrt{2}$ angezeigt. Für den Fall, dass die Spannung symmetrisch und monofrequent ist, entspricht dies dem Effektivwert. Je nach Belastung der Quelle ist die Spannungsform aber nicht symmetrisch oder enthält höhere harmonische Komponenten. Um die Information über den Scheitelwert nicht zu verlieren, wird diese Berechnung gewählt.

⇒ Bitte notieren Sie immer das originale Messsignal vom Peak-Voltmeter OHNE Luftdichtekorrektur und ohne Umrechnung auf den Scheitelwert im Falle von AC-Messungen.

Da ein solches elektronisches Messinstrument intern nur Spannungen von einigen 10 V bis 100 V verarbeiten kann, werden für die eigentliche Messwernerfassung im HS-Prüfkreis Hochspannungsteiler eingesetzt. Für DC-Spannungen ist dies ein hochohmiger ohmscher Teiler ($280\text{M}\Omega$), für AC-Spannungen ein kapazitiver Teiler mit ca. 350 pF.

Wird ein Digital-Oszilloskop an das Peak-Voltmeter angeschlossen, kann zusätzlich der Durchschlagsvorgang auch zeitlich aufgelöst beobachtet werden.

6 Versuchsablauf

Zuerst wird eine AC-Referenzmessung mit der Prüfanlage durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Anlage korrekt funktioniert. Dann werden zwei Messreihen zur experimentellen Bestimmung der Durchschlagsspannung bei unterschiedlichen Elektrodenanordnungen durchgeführt.

6.1 AC-Referenzmessung

Die Referenzmessung wird mit einer Kugel-Kugel-Anordnung mit einem Abstand von 4cm durchgeführt. Die so ermittelten Messwerte können mit den Norm-Durchschlagsspannungen U_{d0} aus der IEC-Norm 60052 "Voltage measurement by means of standard air gaps" verglichen werden. Bei guter Übereinstimmung, d.h. bei Messwertabweichungen von $\leq \pm 3\%$, kann mit dem eigentlichen Versuch begonnen werden. Andernfalls prüfen Sie bitte den Versuchsaufbau, die Messgeräte und Luftdichteablesung auf Korrektheit.

Der Ablauf ist wie folgt:

1. Bauen Sie die AC-Prüfquelle (siehe Abschnitt 5.2) auf und lassen Sie diese vom Assistenten abnehmen.
2. Montieren Sie zwei Kugeln (125 mm) als Elektrodenpaar.
3. Stellen Sie eine Distanz von 4 cm ein.
4. Wann erwarten Sie den Durchschlag? Stellen Sie diese Spannung ein und schalten Sie an.
5. Wiederholen Sie die Messung fünf Mal und tragen Sie die Messwerte $U_{d,i}$ in die Tabelle 2 ein. Tragen Sie Peak-Werte ein. (Achtung: Das Messgerät zeigt RMS-Werte an!)
6. Berechnen Sie den Mittelwert.
7. Lesen Sie den aktuellen Luftdruck, die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit an der Druckmesseinrichtung im Labor ab und notieren Sie diese hier.
Luftdruck: Temperatur: Luftfeuchtigkeit:
8. Berechnen Sie mit den Formeln in Abschnitt 5.4 den normierten Mittelwert U_{d0} .
9. Vergleichen Sie den normierten Mittelwert mit der IEC Norm 60052. Ist die Abweichung $\leq \pm 3\%$? Weshalb gibt es trotz Normierung immer noch eine Abweichung?

Abstand	$U_{d,1}$	$U_{d,2}$	$U_{d,3}$	$U_{d,4}$	$U_{d,5}$	Mittelwert	Normierter Wert
4 cm							

Tabelle 2: Referenzmessungen der Durchschlagsspannung $U_{d,i}$ mit Wechselspannung

6.2 Hauptversuche

Die begrenzte Zeit am Versuchsnachmittag macht es nötig, aus Tabelle 3 zwei Versuche auszuwählen. Wählen Sie diejenigen aus, die Ihnen am interessantesten erscheinen und sprechen Sie sich mit dem Assistenten ab. Es soll mindestens eine Anordnung mit Gleichspannung gewählt werden.

Elektroden. Anordnung	Spannungsart	Elektrodenabstände [cm]		
		Bereich 1 – 10 cm	Bereich 11 – 20 cm	Bereich > 21 cm
Kugel - Platte	AC, DC _{pos} DC _{neg}	2, 4, 6, 8, 10 2, 4, 6, 8, 10	12, 14, 16, 18 12, 14, 16	
Rundstab-Platte	AC, DC _{pos} DC _{neg}	6, 8, 10 4, 6, 8, 10	12, 14, 16, 18, 20 12, 14, 16	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
Stab – Platte	AC, DC _{pos} DC _{neg}	6, 8, 10 4, 6, 8, 10	12, 14, 16, 18, 20 12	
Spitze – Platte	AC, DC _{pos} DC _{neg}	6, 8, 10 4, 6, 8, 10	12, 14, 16, 18, 20 12, 14, 16	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
Kugel – Kugel	AC, DC _{pos} , DC _{neg}	2, 4, 6, 8, 10	12, 14, 16	

Tabelle 3: Übersichtstabelle Elektrodenanordnungen, Spannungsarten und Schlagweiten

Das Vorgehen ist wie folgt:

1. Befestigen Sie die Elektroden für den ersten Versuch an der Elektrodenhalterung und stellen Sie den ersten Abstand ein.
2. Bauen Sie die erste von Ihnen gewählte Spannungsquelle auf.
3. Hat der Assistent den Versuchsaufbau abgenommen, können Sie mit den Messungen beginnen.
4. Verwenden Sie zum Schutz der Ohren immer einen Gehörschutz.
5. Fahren Sie die Spannung langsam und gleichmässig mit ca. $5 \frac{\text{kV}}{\text{s}}$ bis zum Durchschlag hoch und lesen Sie dann am Peak-Voltmeter den Durchschlagswert ab.
6. Tragen Sie den Messwert in das Messprotokoll gemäss Vorlage am Computer ein.
7. Wiederholen Sie die Messung für jede Elektrodenabstand 5 Mal.
8. Stellen Sie den nächsten Elektrodenabstand gemäss Tabelle 3 ein und messen Sie wieder 5 Mal. Wiederholen Sie den Vorgang für die restlichen Elektrodenabstände.
9. Wiederholen Sie das gesamte Vorgehen für den zweiten gewählten Versuchsaufbau.

6.3 Fragen nach dem Versuch

1. Plotten Sie Ihre Messreihe mit dem zur Verfügung gestellten Programm. Was beobachten Sie?

2. Vergleichen Sie Ihre Messreihe mit dem Mittelwert aller vergangenen Messreihen. Woher kommen eventuelle Abweichungen?

Mit dem Beantworten dieser zwei Fragen ist der Versuchsnachmittag beendet. Danke für Ihre Arbeit! Deine Messreihe wird in die Datenbank aufgenommen. Falls gewünscht, kann als Abschluss noch das grosse Hochspannungslabor ETL E31 besichtigt werden.

Literatur

- [1] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, and W. Zaengl, *Hochspannungstechnik-Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung*. Springer-Verlag, 1986.
- [2] K. A., *Hochspannungstechnik-Grundlagen, Theorie, Anwendung*. VDI-Verlag, 1996.

Sicherheitsanweisungen zum Versuch

Grundlagen

Jeder Hochspannungsprüfkreis, der nicht sichtbar geerdet ist, muss als unter Spannung stehend betrachtet werden. Nicht nur die Berührung, sondern schon eine blossen Annäherung kann lebensgefährlich sein. Die zentralen NOT-AUS-Schalter an den Wänden in den Laboratorien dürfen nur in einer echten Notsituation betätigt werden. Sie bewirken eine sofortige Abschaltung der ganzen Laboranspeisung und lösen zusätzlich in den Korridoren der Gebäude ETL und ETZ Alarm aus. Damit ist eine rasche und qualifizierte Hilfeleistung durch Mitarbeiter der Fachgruppe sichergestellt. Alle Prüflaboratorien sind mit ausfallsicheren Notleuchten versehen.

Versuchsaufbau

Teile, die Hochspannung führen, dürfen sich nur innerhalb des abgeschrankten Versuchsfeldes befinden. Sie sind so zu sichern und aufzustellen, dass ausserhalb des Versuchsfeldes zu keinem Zeitpunkt Gefahr besteht. Der Zugang zu einem Versuchsfeld ist mit Gittern und einer Absperrtüre(n) zu sichern. Entlang dem Gitterzug ist mindestens eine Warnlampe (grün/rot) gut sichtbar anzubringen. Die Erdungsstange(n), sowie sämtliche Absperrgitter und Absperrtüren, sind in den elektr. Sicherheitskreis mit einzubeziehen. Bei jedem Prüfplatz ist zusätzlich auch ein lokaler NOT-AUS-Schalter vorzusehen. Er bewirkt nur die sofortige Abschaltung dieses Prüfplatzes, löst keinen Alarm aus und beeinflusst die anderen Prüfanalgen im Labor nicht. Vor dem ersten Einschalten einer HS-Prüfanlage(n) ist die Funktion sämtlicher Sicherheitseinrichtungen im lokalen Prüfkreis einzeln zu überprüfen.

Versuchsbetrieb

Der Sicherheitskreis und lokale NOT-AUS-Schalter darf nicht zum routinemässigen Ausschalten der HS-Prüfanlage(n) missbraucht werden. Vor dem Betreten eines Prüffeldes sind alle HS-Prüfanlagen zuerst abzuschalten. Der Prüfkreis ist danach mit der Erdungsstange(n) kontaktsicher und bleibend zu erden. Besonders bei Gleich- und Stossspannungsanlagen ist darauf zu achten, dass sämtliche Kondensatoren im Versuchsfeld entladen und geerdet werden. Bei Serieschaltungen Kondensatoren immer einzeln erden! Vor dem Einschalten der HS-Prüfquelle(n) ist zu kontrollieren ob:

- alle Personen das Versuchsfeld verlassen haben
- die Erdungsstange(n) entfernt und am richtigen Ort eingehängt ist
- der Zugang zum Versuchsfeld mit der Absperrtüre(n) verschlossen ist.

Für alle Niederspannungsversuche (230 V / 400 V) gelten die allgemeinen Vorschriften für Arbeiten in einem Laboratorium der ETH Zürich.

Bei Unsicherheiten jeder Art ist unbedingt ein verantwortlicher Mitarbeiter des High Voltage Laboratory beizuziehen!