

Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel
 Fakultät Elektrotechnik
 Institut für Elektrische Anlagen und Automatisierungstechnik
 Labor für Elektrische Festigkeit
 Laborleiter: Prof. Dr.-Ing. Martin Könemund
 Versuchsbetreuung: Dipl.-Ing. Gerald Hiller



Versuch-Nr. 2: **Untersuchungen mit hoher Gleichspannung an einer Kugel-Zylinder-Anordnung**

Testat:

Versuchsdatum: Abgabedatum:

Ausgearbeitet von:

Mitarbeiter:

Achtung: Bei Versuchen mit Gleichspannung ist erhöhte Vorsicht geboten, da die auf den Kondensatoren gespeicherte Ladung und damit die Spannung auch nach Abschalten der Anlage über einen längeren Zeitraum erhalten bleibt. Die Erdungsvorschrift ist sorgfältig zu beachten!!! **Nicht** benutzte Kondensatoren müssen geerdet werden, weil sie gefährliche Ladungen aufnehmen können.

Ziel

Ermittlung der Durchschlagsspannung einer Kugel-Zylinder-Anordnung in Abhängigkeit von der Polarität und der Schlagweite in Luft.

Ermittlung der Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Anordnung in SF₆-Gas in Abhängigkeit vom Gasdruck bei konstanter Schlagweite und positivem Potential an der Spitze.

Aufgabenstellung

In diesem Versuch wird die Durchschlagsspannung einer Zylinder-Kugel-Anordnung in Abhängigkeit von der Spannungspolarität und der Schlagweite *s* in atmosphärischer Luft ermittelt. Im zweiten Teil des Versuchs soll die Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Anordnung bei konstanter Schlagweite *s* in SF₆-Gas bei unterschiedlichen Drücken bestimmt werden. Die erforderliche Gleichspannung wird mit einer Greinacher-Verdoppelungsschaltung erzeugt.

Beschreibung der Anlage

Mit Bild 1 soll der Aufbau der Versuchsanlage erläutert werden:

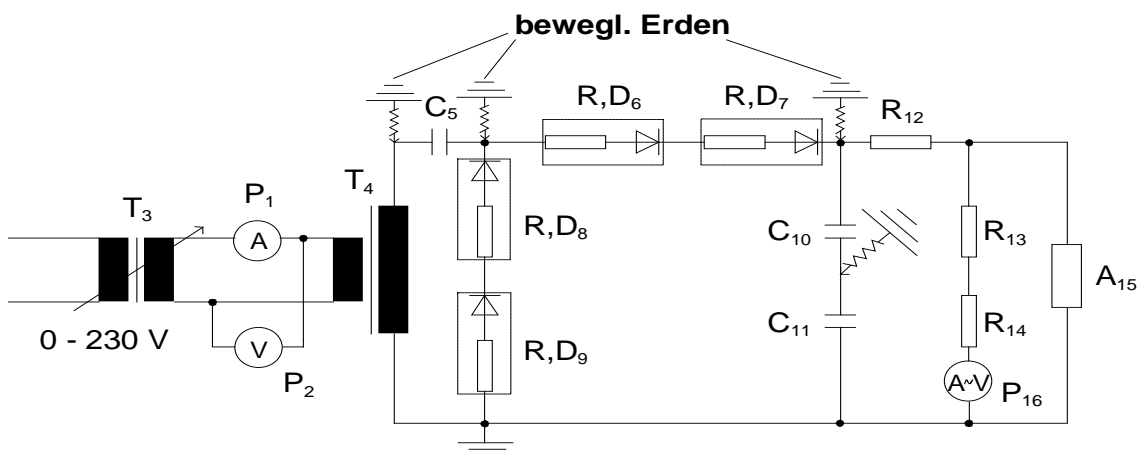


Bild 1: Schaltbild der Gleichspannungsanlage in Raum L 018

Man erkennt, dass der Hochspannungstransformator über einen an das 230 V-Wechselspannungsnetz angeschlossenen Stelltransformator erregt wird. Hinter dem Hochspannungstransformator schließt sich eine Greinacher-Schaltung an, die hier als Verdoppelungsschaltung ausgeführt ist.

Mit den Widerständen R_{13} und R_{14} kann eine Messung der Gleichspannung durchgeführt werden, auf die die Kondensatoren C_{10} und C_{11} aufgeladen sind. Dazu wird der Strom, der durch die Widerstände fließt, gemessen und in die dazugehörige Spannung umgesetzt (Messgerät P_{16}). Da die Quelle nur mit geringen Strömen belastet werden kann, sind die Widerstände entsprechend hochohmig gewählt.

Mit A_{15} ist der jeweilige Prüfling gekennzeichnet, also die Messkugelfunkenstrecke bzw. die Kugel-Zylinder-Anordnung bzw. die Spitze-Platte-Anordnung unter SF_6 -Gas. Anhand der folgenden Darstellungen in Bild 2 soll die Wirkungsweise einer Greinacher-Verdoppelungsschaltung erläutert werden. Im Bild sind die Schaltungspunkte angegeben, deren Potenzialverläufe im darunterliegenden Diagramm zu sehen sind. Nach dem Einschalten des Transformators steigt das Potential von a und b gemäß der kapazitiven Spannungsteilung an, da V_2 geöffnet ist. Zum Zeitpunkt t_1 schließt V_2 und das Potential von b bleibt konstant. Das Potential von a verläuft nun wie die Transformatorspannung c, vermindert um die konstante Spannung an C_1 . Dies ist durch die vertikale Schraffur angedeutet. Bei t_2 verhindert die Diode V_1 , daß das Potential von a kleiner als 0 wird. Es fließt während der Zeit t_2 bis t_3 ein Strom über V_1 , durch den C_1 umgeladen wird. Bei t_4 erfolgt abermals eine Spannungsteilung, und der Vorgang wiederholt sich, bis der eingeschwingene Zustand erreicht ist.

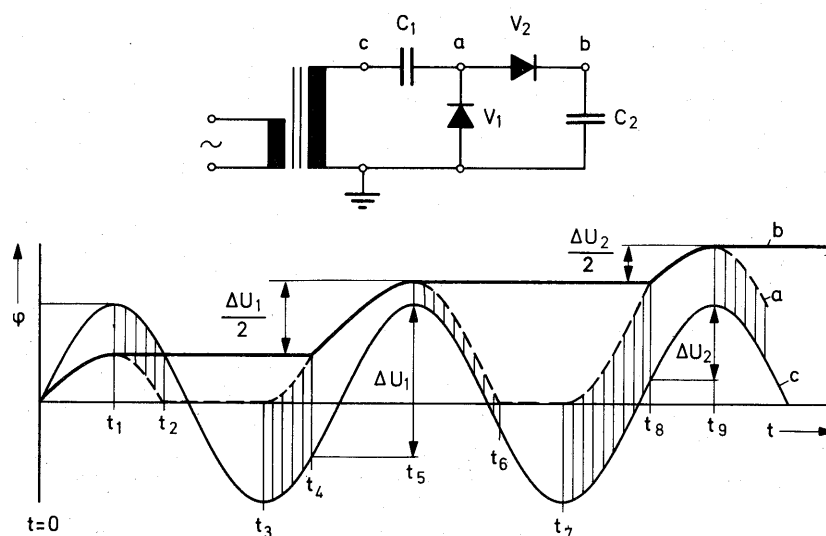


Bild 2: Schaltbild einer Greinacher-Verdoppelungsschaltung und die dazugehörigen Potentialverläufe der einzelnen Schaltungspunkte

Kalibrierung der Anlage

Wie in den anderen Versuchen auch muss die Anlage zunächst kalibriert werden. Dazu wird eine Kugelfunkenstrecke verwendet, deren Kugeln einen Durchmesser von 10 cm besitzen.

Da die **Mess-Kugelfunkenstrecke** aus zwei durchmessergleichen Kupferkugeln besteht, kann die Durchschlagsspannung U_d in Luft nach dem Paschen-Gesetz berechnet werden, da das entstehende Feld nur schwach inhomogen ist, wenn die Schlagweite s nicht größer als der halbe Kugeldurchmesser eingestellt wird. In der VDE 0433 sind die auf Normalbedingungen bezogenen Durchschlagsspannungen von Kugelfunkenstrecken verschiedener Kugeldurchmesser abhängig von der Schlagweite s in Tabellenform angegeben.

Wegen der Bedingung, dass die Schlagweite nicht größer als der halbe **Kugeldurchmesser** sein sollte, stellt man zur Kalibrierung Schlagweiten zwischen **ca. 1 und 5 cm** ein. Dann erhöht man die Unterspannung U_u bis der Durchschlag erfolgt. Beim Durchschlag nimmt man die **Unterspannung U_u (P_2 sep. Messgerät)** auf. Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, werden drei Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse gemittelt werden. Aus der VDE 0433 kann man jetzt entsprechend der eingestellten Schlagweite die Gleichrichtwerte der Durchschlagsspannungen entnehmen. Da diese Werte für Normalbedingungen gelten, müssen sie auf die tatsächlichen **Umgebungsbedingungen umgerechnet** werden. Dazu ist die Messung des Luftdrucks p und der Temperatur T notwendig. Mit diesen Werten und den Normalwerten errechnet sich die relative Gasdichte δ nach Gleichung (1):

$$\delta = \frac{T_0 \cdot p}{T \cdot p_0} \quad (1)$$

In Gleichung (1) müssen die Temperatur in Kelvin und der Druck in bar bzw. mbar eingesetzt werden. Dabei setzt man für T_0 eine Temperatur von **293 K** ein und für p_0 einen Druck von **1013 mbar**.

Der korrigierte Gleichrichtwert der Durchschlagsspannung errechnet sich nach Gleichung (2):

$$\bar{U}_d = k_0 \cdot \bar{U}_{d0} \quad (2),$$

wobei gilt, dass im Bereich $0,95 \leq \delta \leq 1,05$ und für Schlagweiten $s \leq 1$ m der Korrekturfaktor $k_0 = \delta$ ist.

In allen anderen Fällen gilt für die Beziehung zwischen Korrekturfaktor k_0 und relativer Gasdichte δ Tabelle 1:

| | | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| relative Gasdichte δ | 0,85 | 0,90 | 0,95 | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 |
| Korrekturfaktor k_0 | 0,86 | 0,91 | 0,95 | 1,00 | 1,05 | 1,09 | 1,13 |

Tabelle 1: Beziehung zwischen relativer Gasdichte δ und Korrekturfaktor k_0

Zur Kontrolle der so ermittelten Spannung nimmt man zusätzlich mit dem Messgerät P_{16} den Gleichrichtwert der Durchschlagsspannung auf.

Hat man die Messung beendet, so zeichnet man die Messwerte in eine Kalibrierkurve ein, so dass man eine Abhängigkeit zwischen Durchschlagsspannung und Unterspannung erhält.

Durchführung des Versuchsteils mit der Kugel-Zylinder-Anordnung

Anders als im homogenen Feld ist der Einsatz der selbständigen Gasentladung nicht unbedingt gleichzusetzen mit dem Erreichen der Durchschlagsspannung U_d . Bei der Kugel-Zylinder-Anordnung tritt die Höchstfeldstärke E_{\max} an der Kugel auf. Erreicht sie einen bestimmten Wert, die Anfangsfeldstärke E_a , so kann es dort zu einer

sichtbaren Vorentladung (auch Korona- oder Glimmentladung) kommen, ohne dass ein Durchschlag auftritt. Die zugehörige Spannung heißt Anfangsspannung U_a (auch

Korona- oder Glimmeinsetzspannung). Der Ausnutzungsfaktor η wird umso kleiner, also die Inhomogenität des Feldes umso größer, je mehr die Schlagweite s anwächst. Andererseits kann bei kleinen Schlagweiten das Feld so schwach inhomogen sein, dass dann wieder die Durchschlagsgesetze des homogenen Feldes gelten.

Allgemein gilt bei inhomogenen Feldern für die Anfangsspannung

$$U_a = E_a \cdot s \cdot \eta \quad (3)$$

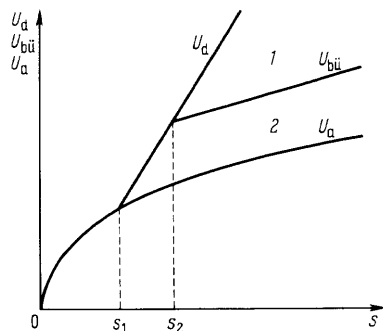


Bild 3:

Darstellung der Anfangsspannung U_a , Büscheleinsetzspannung $U_{b\ddot{u}}$ und Durchschlagsspannung U_d abhängig von der Schlagweite s

(1: Glimmen, 2: Stielbüschel)

In Bild 3 ist das Durchschlagsverhalten einer solchen Anordnung vereinfacht dargestellt. Bei Schlagweiten $s < s_1$ fällt die Durchschlagsspannung $U_d = U_a$ mit der Anfangsspannung zusammen. In solchen schwach inhomogenen Feldern mit Ausnutzungsfaktoren etwa im Bereich $0,2 < \eta < 1$ gelten die Durchschlagsmechanismen wie im homogenen Feld, so dass sich die Durchschlagsspannungen in ähnlicher Weise berechnen lassen.

Bei stark inhomogenen Feldern ($s > s_1$), etwa mit Ausnutzungsfaktoren $\eta < 0,2$, tritt an der Kugel bei Spannungssteigerung zunächst eine geräuschlose, nur sehr schwach sichtbare Glimmentladung ein, aus der sich bei Schlagweiten $s > s_2$ vor dem Erreichen der Durchschlagsspannung U_d eine plötzlich einsetzende, gut hör- und sichtbare Büschelentladung (Stielbüschel) entwickelt. Die zugehörige Spannung wird als Büscheleinsetzspannung $U_{b\ddot{u}}$ bezeichnet. Büschelentladungen treten bei Wechselfeldern vorwiegend in der positiven Halbschwingung auf.

Ermittlung der Durchschlagsspannung in Luft

Die zur Kalibrierung benutzte Kugelfunkenstrecke wird durch eine Kugel-Zylinder-Anordnung ersetzt. Dann wird der Versuch zunächst **mit positiver Kugel** und negativem Zylinder durchgeführt. Dabei werden für **verschiedene Schlagweiten** je drei **Unterspannungsmesswerte** U_u aufgenommen, die anschließend gemittelt werden. Die zugehörige Oberspannung wird aus der Kalibrierkurve entnommen. Anschließend sind die gleichen Messungen mit **negativer Kugel** und positivem Zylinder durchzuführen. Dazu muss die Polarität aller Ventile in der Greinacher-Verdoppelungsschaltung umgedreht werden. Die dabei auftretenden Effekte sind zu dokumentieren und zu erläutern.

Für den Bereich der schwachen Inhomogenität der Felder soll die Durchschlagsspannung nach Gleichung (3) berechnet werden, da in diesem Fall die Anfangsspannung mit der Durchschlagsspannung fast zusammenfällt. Um die Anfangsspannung bzw. die Durchschlagsspannung berechnen zu können, muss zunächst die Feldstärke nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$E_a = \delta \cdot k_1 \cdot \left(1 + \frac{k_2}{\sqrt{\delta \cdot r_k}} \right) \quad (4)$$

Dabei gilt für die Konstanten k_1 , k_2 und r_k :

$$k_1 = 30 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$k_2 = 0,47 \sqrt{\text{cm}}$$

$$r_k = 10 \text{ mm} \hat{=} 1 \text{ cm}$$

Mit diesen Größen und dem Luftdichtekorrekturfaktor kann man die Feldstärke berechnen. Den Ausnutzungsfaktor η ermittelt man nach dem Schnittverfahren mit den Geometrie Kennwerten p und q .

Danach ist ein Vergleich der gemessenen mit den berechneten Werten möglich. Es sind außerdem die Abweichungen zu erläutern.

Durchführung des Versuchteils mit der Spitze-Platte-Anordnung bei verschiedenen Drücken unter SF₆-Gas

Bei kleinen Drücken entwickelt sich der Durchschlag aus einer stabilen Vorentladung. Dieser Druckbereich wird als koronastabilisierter Bereich bezeichnet. Der Durchschlag erfolgt hier nach dem Streamermechanismus. Freie Elektronen im Gebiet vor der Spitze initiieren auf die Kathode zulaufende Elektronenlawinen, die Ionen hinterlassen und somit eine positive Raumladungswolke bilden. Diese wirkt wie eine Vergrößerung des Elektrodenkopfes und führt zu einer Vergleichmäßigung des Feldes, die eine Voraussetzung für den Streamermechanismus ist. Die Aufrechterhaltung der Vorentladung erfordert ständigen Nachschub an Sekundärelektronen, die im wesentlichen durch Fotoionisation entstehen.

Mit steigendem Gasdruck p nimmt jedoch die Fotoionisation stark ab, und der wichtigste Mechanismus für die Erzeugung von Sekundärelektronen geht zurück, so dass auch die Voraussetzungen für Vorentladungen entfallen. Es ergeben sich nun Durchschlagsverhältnisse, wie sie im schwach inhomogenen Feld vorliegen. Der Durchschlagsmechanismus wechselt u. U. nahezu sprunghaft von dem des stark inhomogenen Feldes ($U_d > U_a$) in jenen des schwach inhomogenen ($U_d = U_a$) über. Der Durchschlag erfolgt nun durch einen unmittelbar von der Spitze zur Gegenelektrode vorwachsenden, hochtemperierten Entladungskanal, also nach dem Leadermechanismus. Der kritische Druck, bei dem dieser Übergang einsetzt, beträgt für Luft etwa $p_{kr} = 12$ bar und für SF₆-Gas etwa 1,5 bar. Durch Zumischung bestimmter Gase, z. B. 5 % Sauerstoff O₂, kann der Korona-stabilisierte Bereich verbreitert und p_{kr} erhöht werden.

Versuchsdurchführung

Die Spitze-Platte-Anordnung ist in ein Vakuumgefäß eingesetzt. Die Schlagweite s ist nicht variabel. Sie hat den konstanten Wert von $s = 20$ mm. Im ersten Schritt

muss das **Vakuumgefäß evakuiert** werden. Dabei ist darauf zu achten, dass man die **Zuleitung der SF₆-Gasflasche mit anschließt** und sie somit auch evakuiert. Andernfalls wird das Messergebnis verfälscht, da eine zu starke Durchmischung mit Luft auftreten würde. Die Durchführung erfolgt so, dass man den **Druck von ca. 0,4 bar bis 4,0 bar** schrittweise erhöht und dabei jeweils dreimal **die Unterspannung bis zum Durchschlag erhöht**.

Auswertung des Versuchs

Zunächst ist ein Raumschaltbild der Anlage anzufertigen. Außerdem sind Skizzen der Prüflinge aufzunehmen. Das Wirkschaltbild kann aus diesem Umdruck übernommen werden bzw. es kann darauf verwiesen werden. Die bei der Durchführung des Versuchs beobachteten Effekte sind zu dokumentieren und zu erläutern. Ferner sind die Messwerte grafisch zu dokumentieren. Abschließend sind die erhaltenen Ergebnisse zu diskutieren.

Verwendete Geräte

| Nr.: | Gerät | Bezeichnung | Technische Daten/Type |
|------|-----------------------|------------------|---|
| 1 | Schalttafelinstrument | P ₁ | Strommesser |
| 2 | Drehspulmessgerät | P ₂ | Klasse 1,5 |
| 3 | Stelltransformator | T ₃ | |
| 4 | Transformator | T ₄ | Form TEO 100/10 Art: LT Betriebsart: DB Frequenz 50 Hz Nennspannung: 2x0,22/100/0,22 kV Nennstrom: 2x11,4/0,05/22,7 A Nennleistung: 5 kVA Kurzschlußspannung: 3,9 % Fert.-Nr.: 82/47087 Schaltgruppe: I;O Kühlart 5 Prüfspannung: 120/3 kV |
| 5 | Kondensator | C ₅ | 10000 pF/140 kV |
| 6 | Widerstand + Diode | R,D ₆ | 100 kΩ/140 kV/20 mA |
| 7 | Widerstand + Diode | R,D ₇ | 100 kΩ/140 kV/20 mA |
| 8 | Widerstand + Diode | R,D ₈ | 100 kΩ/140 kV/20 mA |
| 9 | Widerstand + Diode | R,D ₉ | 100 kΩ/140 kV/20 mA |
| 10 | Kondensator | C ₁₀ | 10000 pF/140 kV |
| 11 | Kondensator | C ₁₁ | 10000 pF/140 kV |
| 12 | Widerstand | R ₁₂ | 50 kΩ/125 W |
| 13 | Widerstand | R ₁₃ | 280 MΩ/140 W |
| 14 | Widerstand | R ₁₄ | 280 MΩ/140 W |
| 15 | Kugelfunkenstrecke | A ₁₅ | 2 x Ø 100 mm |
| 16 | Prüfling | A ₁₅ | Kugel-Zylinder |
| 17 | Prüfling | A ₁₅ | Spitze-Platte |
| 18 | DC-Voltmeter | P ₁₆ | GM 78 |
| 19 | SF ₆ -Gas | | |

Untersuchungen mit hoher GleichspannungKalibrierung:

| Messwert | s/mm | U_{u1}/V | U_{u2}/V | U_{u3}/V | $U_{u_{mittel}}/V$ | U_d Tabelle /kV | $\delta * U_d$ /kV |
|----------|------|------------|------------|------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 10 | | | | | | |
| 2 | 20 | | | | | | |
| 3 | 30 | | | | | | |
| 4 | 40 | | | | | | |

Positives Potential an der Kugel:

| s/mm | U_{u1}/V | U_{u2}/V | U_{u3}/V | $U_{u_{mittel}}/V$ | U_d/kV |
|------|------------|------------|------------|--------------------|----------|
| 5 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 20 | | | | | |
| 30 | | | | | |
| 40 | | | | | |
| 50 | | | | | |
| 60 | | | | | |
| 65 | | | | | |

Negatives Potential an der Kugel:

| s/mm | U_{u1}/V | U_{u2}/V | U_{u3}/V | $U_{u_{mittel}}/V$ | U_d/kV |
|------|------------|------------|------------|--------------------|----------|
| 5 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 20 | | | | | |
| 30 | | | | | |
| 40 | | | | | |
| 50 | | | | | |
| 60 | | | | | |
| 65 | | | | | |