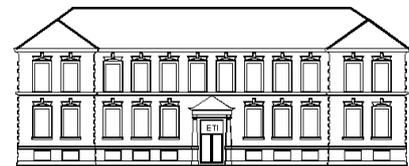


Energietechnisches Praktikum



Versuch: Isolierstoffe

Dielektrische Festigkeit von Isolierstoffen



ETI

Stand: 13.10.2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Gasentladungen	4
2.1	Ladungsträgergeneration	4
2.2	Überblick über unselbständige und selbständige Gasentladung	5
2.2.1	Unselbständige Gasentladung.....	5
2.2.2	Selbständige Gasentladung.....	5
2.3	Die Townsendentladung	7
2.3.1	Die Elektronenlawine	7
2.3.1.1	Die Ionisierungszahlen α , β und γ	7
2.3.1.2	Berechnung der Stromverstärkung.....	10
2.3.1.3	Experimentelle Bestimmung der Ionisierungszahlen α und γ	11
2.3.2	Die Townsend'sche Zündtheorie	11
2.3.3	Das Gesetz von Paschen	12
2.4	Die Kanalentladung – der Streamer Mechanismus	14
2.5	Unterschied Kanalentladung – Townsendentladung	15
2.6	Entladung in Anordnungen mit inhomogenem Feld	16
2.6.1	Einleitung Koronaentladung.....	16
2.6.2	Ursachen der Koronaentladung	16
2.6.3	Polaritätseffekt.....	17
2.6.4	Trichel-Impulse	20
3	Elektrische Festigkeit von flüssigen und festen Isolierstoffen	21
3.1	Durchschlag in Mineralöl	21
3.1.1	Faserbrückendurchschlag	21
3.1.2	Verschmutzung und Alterung.....	22
3.2	Durchschlag von festen Isolierstoffen	23
3.2.1	Rein elektrischer Durchschlag.....	23
3.2.2	Wärmedurchschlag	23
3.2.3	Teilentladungen (TE), Erosionsdurchschlag, elektrische Alterung.....	25
4	Literatur	26
5	Fragen	27
	Protokoll zum Praktikum Elektroenergiesysteme	28

1 Einleitung

Die grundsätzliche Aufgabe der Hochspannungstechnik besteht darin, die elektrische Beanspruchung eines Isoliersystems unter allen Bedingungen deutlich geringer zu halten als dessen elektrische Festigkeit tatsächlich ist. Dies wird über die Steuerung der elektrischen Felder sowie die Kombination geeigneter Isolierstoffe erreicht.

Die Dimensionierung einer Isolierung erfordert genaue Kenntnisse über Art, Höhe und Dauer der elektrischen Beanspruchung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Umgebungsverhältnisse. Zudem müssen auch die Eigenschaften der Isolierstoffe bekannt sein, damit neben dem richtigen Material auch eine wirtschaftliche Ausführung gewählt werden kann.

Die wichtigste Aufgabe der Isolierstoffe ist es, spannungsführende Leiter gegeneinander und gegen Erde zu isolieren. Daneben haben sie aber auch häufig mechanische Aufgaben zu übernehmen und müssen in der Lage sein, thermischen und chemischen Beanspruchungen Stand zu halten. Meist treten derartige Beanspruchungen gleichzeitig auf, so dass die gegenseitige Beeinflussung bekannt sein muss. Entscheidend ist aber letztlich die Dauer- und Alterungsbeständigkeit unter den verschiedenartigen, im Betrieb vorkommenden Beanspruchungen.

An die dielektrischen Eigenschaften des Isolierstoffes stellt man folgende Anforderungen:

- hohe elektrische Festigkeit
- geringe dielektrische Verluste sowie eine geringe Restleitfähigkeit
- geeignete relative Dielektrizitätszahl (eine von 1 verschiedene relative Dielektrizitätszahl wird durch Polarisation des Isolierstoffs verursacht. Neben der Verschiebungspolarisation ist für Isolierstoffe auch die Orientierungspolarisation und Grenzflächenpolarisation von Bedeutung.)
- Alterungsstabilität der genannten Eigenschaften

Reicht die elektrische Festigkeit nicht aus, so wird die elektrische Isolierung versagen, d. h. es kommt zu Entladungen oder Durchschlägen. Je nach Isolationsmedium müssen Gasentladungen oder Entladungen in festen und flüssigen Stoffen betrachtet werden.

2 Gasentladungen

2.1 Ladungsträgergeneration

Entscheidend für die Erzeugung von Ladungsträgern ist die Bereitstellung einer Energie in mindestens der Höhe der elementspezifischen Ionisierungsenergie, die wiederum stark von der Anziehungskraft zwischen dem zu entfernenden Elektron und dem Atomkern abhängt. Man unterscheidet bei der Ladungsträgergeneration in Gasen zwischen mehreren Erzeugungsarten, die hier kurz aufgezählt werden sollen:

- **Stoßionisation:** Beim Zusammenstoß eines beschleunigten Elektrons mit einem Gasmolekül unterscheidet man zwei Fälle: Im ersten Fall liegt die kinetische Energie des Elektrons unterhalb der diskreten Anregungsenergie eines Hüllenelektrons. Das Elektron wird vom Atom abgelenkt, die kinetische Energie des Elektrons bleibt dabei erhalten. Man spricht von einem elastischen Stoß. Im zweiten Fall, dem unelastischen Stoß, liegt die kinetische Energie über der Anregungsenergie. Es wird Energie auf ein gebundenes Elektron im Atom übertragen. Dieses gelangt auf ein höheres Energieniveau, fällt aber nach kurzer Zeit aufgrund der Instabilität des Anregungszustands unter Aussendung eines Photons in den ursprünglichen Zustand zurück. Übersteigt die kinetische Energie des stoßenden Elektrons allerdings die Ionisierungsenergie des Atoms, so wird das Atom beim Zusammenprall ionisiert. Es liegt eine Stoßionisation vor, ein Hüllenelektron wurde vom Atom abgetrennt.
- **Photoionisation:** Ein Photon mit ausreichend hoher Energie kann beim Auftreffen ein Molekül anregen oder ionisieren. Energie, die dabei nicht umgesetzt wurde, wird in kinetische Energie der erzeugten Ladungsträger umgewandelt.
- **Thermoionisation:** Bei der Thermoionisation werden durch die thermische Bewegung der Moleküle Ladungsträger erzeugt. Innerhalb eines Lichtbogens werden die Ladungsträger hauptsächlich durch diese Ionisierungsart generiert.
- **Feldemission:** Hohe elektrische Feldstärken ($E_{\min} > 10^9 \text{ V/m}$) können zur direkten Auslösung von Elektronen aus einer metallischen Elektrode führen. Verunreinigungen an der Elektrodenoberfläche führen zu einer lokalen Feldstärkeüberhöhung, so dass auch bei Feldstärken kleiner als E_{\min} Feldemission auftreten kann.

2.2 Überblick über unselbständige und selbständige Gasentladung

2.2.1 Unselbständige Gasentladung

Die Ladungsträger werden durch äußere Bedingungen in die Entladungsstrecke eingebracht, z. B. aufgrund der kosmischen Strahlung oder der thermischen Bewegung. Diese ständige geringfügige Ionisierung des Gases (Gleichgewicht zwischen Generation und Rekombination) durch von außen zugeführte Energie führt zu einer elektrischen Leitfähigkeit. Die Trägerdichte ist dabei unter Normalbedingungen verschwindend gering. Beim Anlegen einer Spannung fließt deshalb ein kleiner elektrischer Strom. Die Sättigungsstromdichte liegt bei etwa 10^{-18} A/cm^2 . Erhöht man die Spannung weiter, so kommt es über den Lawinenaufbau zu einer Stromverstärkung. Diese Entladungen sind jedoch nicht in der Lage, sich selbst zu erhalten.

2.2.2 Selbständige Gasentladung

Selbständige Entladungstypen unterscheidet man allgemein in:

- raumladungsfreie Entladung, die sog. Townsendentladung
- raumladungsbeschwerte Entladung, die sog. Kanalentladung

Bei einer weiteren Erhöhung der Spannung bis zur sogenannten Zündspannung (U_z), nimmt die Leitfähigkeit der Gasstrecke stark zu: Es stellen sich selbst erhaltende Gasentladungen ein. Der Strom durch die Entladungsbahn besteht dabei in der Bewegung von positiven und negativen Ionen sowie freien Elektronen. Die Ladungsträger werden durch die Entladung selbst erzeugt. Dies geschieht vorwiegend durch:

- Stoß- bzw. Photoionisierung (Bildung von Ionenpaaren durch Photonen)
- Loslösung von Elektronen aus den Elektroden durch elektrische Felder

Die sich bildenden Raumladungen haben zunächst noch keinen großen Einfluss auf das elektrische Feld (Townsendentladung). Der Strom nimmt weiter zu und es entstehen Raumladungen, die zu Feldveränderungen führen (Kanalentladung). Dadurch ergibt sich ein weiterer Stromanstieg, selbst bei fallender Spannung. Für das menschliche Auge entsteht eine Art Leuchterscheinung (Glimmentladung) durch die immer intensiver werdenden Stoß- und Rekombinationsprozesse.

Bei sehr großen Strömen werden hauptsächlich durch Thermoionisation neue Ladungsträger gebildet. Es entsteht ein Plasma mit hoher Leitfähigkeit. Um den Strom weiter zu treiben, reicht eine geringe Spannung aus (Bogenentladung). Diese wird auch allgemein als Lichtbogen bezeichnet **/küc2005/**. Eine Begrenzung des Stroms durch äußere Beschaltungselemente ist unbedingt erforderlich (Bild 2-1).

Die Strom-Spannungs-Charakteristik nach Bild 2-2 zeigt einen Überblick über alle Entladungsformen.

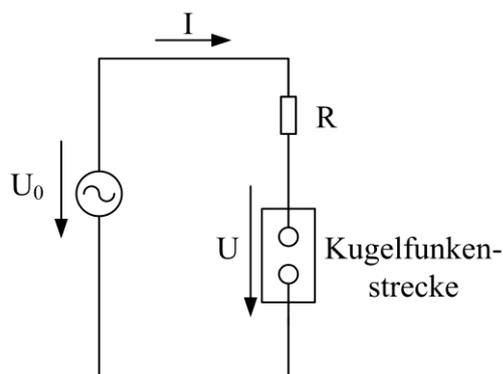


Bild 2-1: Ersatzschaltbild einer Entladungsstrecke

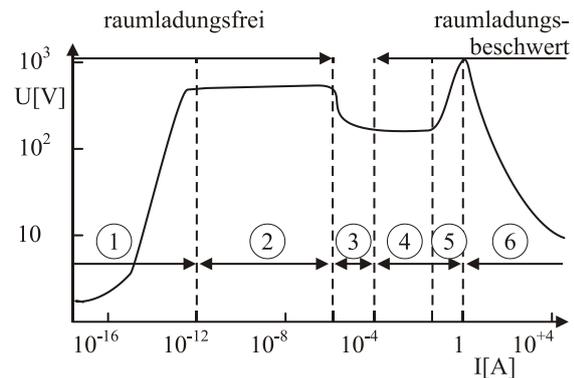


Bild 2-2: Charakteristik der unselbständigen und selbständigen Entladung

1. Unselbständige Entladung
2. Townsendentladung
3. Übergang zur raumladungsbeschwertem Entladung
4. Normale Glimmentladung (Korona)
5. Anormale Glimmentladung
6. Bogenentladung (Kanalentladung)

2.3 Die Townsendentladung

Der Abschnitt der Townsendentladung ist in die Erklärung der Elektronenlawine, der Townsend'schen Zündtheorie und dem Gesetz von Paschen unterteilt.

2.3.1 Die Elektronenlawine

2.3.1.1 Die Ionisierungszahlen α , β und γ

Besteht in einem Raum, der mit einem Gas beim Druck p gefüllt ist, ein homogenes elektrisches Feld der Feldstärke E und wird an der Stelle $x = 0$ ein freies Elektron erzeugt, so wird es wegen der zufälligen Zusammenstöße mit den neutralen Atomen nicht geradlinig gegen die Richtung des Feldes beschleunigt. Stattdessen führt es eine vorwiegend ungeordnete Bewegung aus, bei der es im Mittel jedoch entgegen der Feldrichtung Energie aufnimmt (Bild 2-3). Bei jedem elastischen Zusammenstoß wird das Elektron in seiner Richtung abgelenkt, bis nach einer größeren Anzahl von Zusammenstößen die angesammelte Energie zur Auslösung eines Elektrons und somit zur Ionisierung eines Atoms ausreicht. Die Anzahl der Ionenpaare, die im Mittel durch ein Elektron auf einer Wegstrecke von 1 cm in Feldrichtung erzeugt werden, heißt Elektronenionisierungszahl α oder „Erster Townsend'scher Ionisierungskoeffizient“. Es gilt der Zusammenhang:

$$\alpha = p \cdot f \left(\frac{E}{p} \right)$$

Die gebildeten positiven Ionen werden in Richtung des elektrischen Feldes beschleunigt und driften zur Kathode. Die Anzahl der von den pos. Ionen je Wegeinheit in Feldrichtung erzeugten neuen Ionenpaare wird als Ionisierungszahl β bezeichnet. Ähnlich wie oben gilt der Zusammenhang:

$$\beta = p \cdot g \left(\frac{E}{p} \right)$$

Jedoch ist die Ionisierungszahl β aufgrund der, im Vergleich zu Elektronen viel größeren Ionenmasse (Trägheit aufgrund der Masse und $v_{(pos. Ion)} = \frac{v_{(Elektron)}}{100}$), wesentlich kleiner (Faktor 100) als die Ionisierungszahl α . Dieser Effekt kann also in erster Näherung vernachlässigt werden.

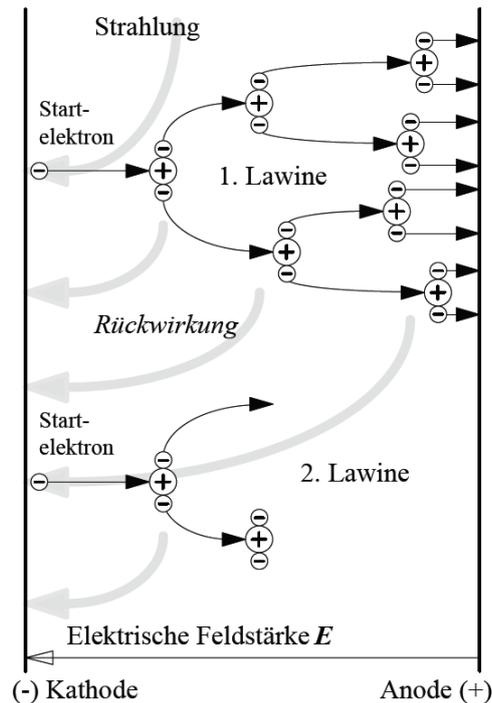


Bild 2-3: Physikalisches Modell zur Beschreibung des Townsend- bzw. Generationenmechanismus, zur Ableitung der Zündbedingung nach Townsend und zur Ableitung des Paschen-Gesetzes

Bei vorgegebener Feldstärke E , Druck p und Elektronenionisierungszahl α , werden also auf der Strecke $x \dots x + dx$

$$dN = N(x) \cdot \alpha \cdot dx$$

neue Ionenpaare erzeugt, wenn $N(x)$ die Anzahl der Elektronen an der Stelle x ist. Durch Integration folgt

$$N(x) = N_0 \cdot e^{\alpha x}$$

mit N_0 als Zahl der Anfangselektronen an der Stelle $x = 0$ (Kathode).

Auf die Anode im Abstand d gelangen also $N = N_0 \cdot e^{\alpha d}$ Elektronen, d. h. ein Anfangsstrom i_0 verursacht einen Strom der Größe

$$i = i_0 \cdot e^{\alpha d}$$

Mit der Definition des ersten Townsend'schen Ionisierungskoeffizienten und der vorangehenden Gleichung zur Beschreibung des Stromes, erwartet man einen linearen Verlauf von $\ln(i/i_0) = \alpha \cdot x = p \cdot f\left(\frac{E}{p}\right) \cdot x = F(x)$ bei konstantem E/p (Bild 2-4). Stattdessen ergibt sich ein ansteigender Verlauf, bei dem die Steilheit mit größer werdendem E/p zunimmt.

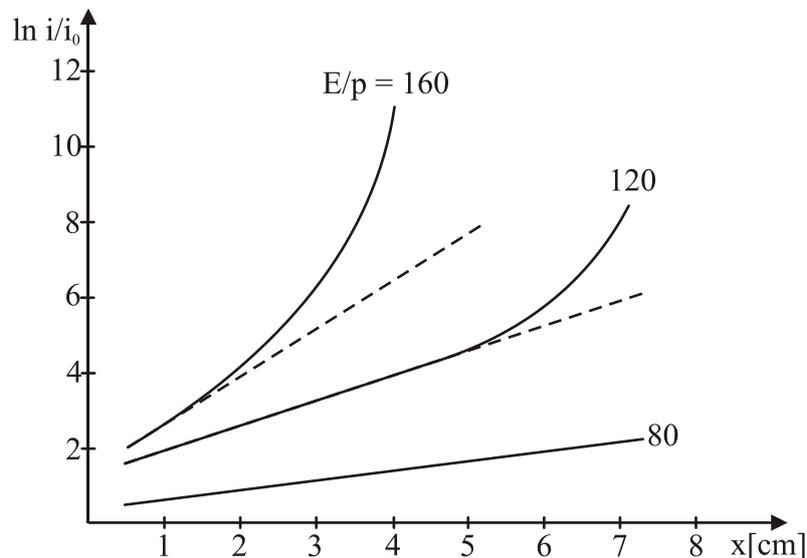


Bild 2-4: Funktion $\ln(i/i_0) = F(x)$ für Luft

Dieser Verlauf ist durch die Rückwirkung positiver Ionen und des Photoeffekts auf die Kathode begründet. Die auch als Rückwirkungskoeffizient bezeichnete Oberflächen-Ionisierungszahl γ gibt dabei die Anzahl der Folgeelektronen an, die von einem positiven Ion oder durch den Photoeffekt aus der Kathodenoberfläche herausgeschlagen werden. Die Oberflächenionisierungszahl γ wird auch als „Zweiter Townsend'scher Ionisierungskoeffizient“ bezeichnet.

Mit einer zeitlichen Analyse ergibt sich:

- Zur Erzeugung einer Nachfolgelawine mittels positiver Ionen benötigt man die Zeit aus der Summe der Laufzeit der Primärlawine und der Rücklaufzeit der Ionen zur Kathode. Dies entspricht der Laufzeit einer Lawine nach dem Townsendmechanismus. Für eine Schlagweite von $d = 1$ cm in Luft ergibt sich ungefähr folgende Zeit:

$$\tau_{\text{ges}} = \tau_{\text{Elektron}} + \tau_{\text{Ion}} = 10^{-7} \text{ s} + 10^{-5} \text{ s} \approx 10 \mu\text{s}$$

- Zur Erzeugung einer Nachfolgelawine mittels der Photonen wird praktisch nur die Laufzeit der Primärlawine benötigt, da die Rücklaufzeit der Photonen zur Kathode vernachlässigt werden kann. Die Gesamtzeit für $d = 1 \text{ cm}$ in Luft ergibt sich daher zu

$$\tau_{\text{ges}} = \tau_{\text{Elektron}} = 10^{-7} \text{ s} = 100 \text{ ns}$$

Dies entspricht der in Kapitel 2.5 beschriebenen Aufbauzeit der Kanalentladung.

2.3.1.2 Berechnung der Stromverstärkung

Unter Vernachlässigung der Ionisierungszahl β lässt sich folgende Berechnung durchführen: Die $n_1 = n_0 \cdot e^{\alpha d}$ zur Anode gelangenden Elektronen bilden auf ihrem Weg $n_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1)$ positive Ionen. Letztere wandern zur Kathode und schlagen dort $\gamma \cdot n_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1)$ Elektronen heraus, die wiederum neue Elektronenlawinen auslösen. Bei der Ankunft an der Anode hat sich die Anzahl der Elektronen auf

$$n_2 = \gamma \cdot n_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1) \cdot e^{\alpha d}$$

unter Erzeugung von

$$\gamma \cdot n_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1) \cdot e^{\alpha d} - \gamma \cdot n_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1) = \gamma \cdot n_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1)^2$$

positiven Ionen erhöht.

Die durch letztere wiederum ausgelösten Elektronenlawinen führen zu

$$n_3 = \gamma^2 \cdot n_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1)^2 \cdot e^{\alpha d}$$

neuen Elektronen usw..

Die Anzahl der insgesamt auf die Anode auftreffenden Elektronen ist gegeben durch $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$. Diese Reihe konvergiert für $\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) < 1$ gegen

$$n = n_0 \cdot \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1)}$$

Ein primär ausgelöster Strom i_0 wird also auf, siehe unten, verstärkt.

$$i = i_0 \cdot \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1)}$$

2.3.1.3 Experimentelle Bestimmung der Ionisierungszahlen α und γ

Zur experimentellen Bestimmung der Ionisierungszahlen α und γ wird die Funktion $\ln(i/i_0) = F(x)$ bei konstantem Wert E/p Punkt für Punkt aufgenommen (Bild 2-4).

Der Wert von α entspricht der Steigung der Kurve in ihrem unteren, linearen Teil (solange die Kurve linear verläuft gilt $\gamma = 0$). Mit dem so gewonnenen Wert von α kann der Wert γ aus der obigen Stromgleichung bestimmt werden.

2.3.2 Die Townsend'sche Zündtheorie

Aus der Stromgleichung ist ersichtlich, dass der Strom i gegen unendlich geht, wenn gilt:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1$$

Diese Gleichung wird als Townsend'sche Zündbedingung bezeichnet [Küc2005 S.164]. Da jedes von der Kathode ausgehende Elektron auf dem Weg zur Anode $(e^{\alpha d} - 1)$ neue Ionenpaare erzeugt, wovon die positiven Ionen zur Kathode wandern und $\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1)$ neue Anfangselektronen bilden, entsteht in diesem Fall für jedes ursprüngliche Elektron gerade wieder ein neues Anfangselektron. Zur Aufrechterhaltung der Entladung bedarf es demnach keiner weiteren Auslösung von Primärelektronen durch eine fremde Energiequelle. Die unselbständige geht damit in eine selbständige, sich selbst aufrechterhaltende Entladung über.

Die Townsend'sche Zündbedingung ist jedoch idealisiert, da Vereinfachungen wie die Vernachlässigung der Rekombination und Diffusion von Ladungsträgern angenommen werden. Weiter wird vorausgesetzt, dass Verzerrungen des von außen aufgeprägten elektrischen Feldes durch Raumladungen, die sich in der Gasstrecke bilden, keinen Einfluss haben. Da die Elektronenwolke lawinenartig exponentiell mit dem Abstand von der Kathode anschwillt und die erzeugten positiven Ionen wegen ihrer geringen Beweglichkeit nur vergleichsweise langsam abwandern, kann die hierbei entstehende positive Raumladungszone Feldverzerrungen hervorrufen. In solch einem Fall sind die obigen Betrachtungen nicht mehr gültig. Die Raumladungen nehmen mit der Länge d der Entladungsstrecke und dem Gasdruck p zu. Die Bestimmung der Zündspannung aus der Townsend'schen Zündbedingung ist daher nur für kleine Werte von $p \cdot d$ möglich; die Grenze liegt bei $p \cdot d = 25 \dots 130 \text{ kPa} \cdot \text{cm}$.

Zum Beispiel wird bei $d = 2$ mm Elektrodenabstand im homogenen Feld in Luft unter Normalbedingungen ($p = 1$ bar und $T = 293$ K) eine Durchschlagsspannung von $U_d = 7,5$ kV gemessen. Das Paschengesetz besagt nun, dass bei zehnfach größerem Abstand mit der gleichen Durchschlagsspannung zu rechnen ist, wenn der Druck auf ein Zehntel reduziert wird **/küç2005/**.

2.3.3 Das Gesetz von Paschen

Die Ionisierungszahlen α und γ können allgemein in der Form

$$\alpha = p \cdot f\left(\frac{E}{p}\right) \text{ und } \gamma = h\left(\frac{E}{p}\right)$$

geschrieben werden. Das Einsetzen dieser Ausdrücke in die Townsend'sche Zündbedingung führt auf:

$$h\left(\frac{E}{p}\right) \cdot \left(e^{p \cdot f\left(\frac{E}{p}\right) \cdot d} - 1 \right) = 1$$

Da $\frac{E}{p} = \frac{E \cdot d_z}{p \cdot d_z} = \frac{U_z}{p \cdot d_z}$ mit der Zündspannung U_z und $e^{\alpha d} \gg 1$ ist, kann die

Beziehung wie folgt geschrieben werden:

$$p \cdot d_z \cdot f\left(\frac{U_z}{p \cdot d_z}\right) = \ln \frac{1}{h\left(\frac{U_z}{p \cdot d_z}\right)}$$

Bei Auflösung dieser Gleichung nach U_z ergibt sich die Zündspannung damit als eine Funktion, die nur noch vom Produkt aus Druck und Abstand abhängig ist:

$$U_z = \Phi(p \cdot d_z)$$

Dies wird als das Gesetz von Paschen bezeichnet. Es gilt stets nur für kleine Werte von $p \cdot d$. Das Gesetz besagt, dass die Zündspannung eine Funktion des Produktes aus Druck und Elektrodenabstand ist.

Zusammenfassend gilt: Um den Übergang von der unselbständigen zur selbständigen Entladung einzuleiten, muss nach Townsend ein Startelektron zur Verfügung stehen und das Gesetz von Paschen muss erfüllt sein.

Bei der Townsendentladung entstehen mehrere Lawinen nacheinander. Im folgenden Kapitel wird erläutert, wie letztlich der dünne Durchschlagskanal

entsteht und wodurch es insbesondere bei großen Schlagweiten zu verhältnismäßig kurzen Durchschlagsverzugszeiten kommt, obwohl sich die positiven Ionen mit relativ geringer Driftgeschwindigkeit fortbewegen.

2.4 Die Kanalentladung – der Streamer Mechanismus

Wie bereits in Bild 2-2 beschrieben spielt bei der Kanalentladung die Raumladung eine wichtige Rolle. Sie verändert den Aufbau einer Lawine grundlegend.

Die Elektronenlawine entwickelt sich zunächst wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben. Die schnell fortschreitende Welle lässt jedoch eine Ansammlung positiver Ionen hinter sich (Bild 2-5 links außen). Erreicht die Anzahl der Elektronen im Kopf der Lawine den kritischen Wert $e^{\alpha d} \approx 5 \cdot 10^8$, d. h. dass sich für $\alpha x \approx 20$ ergibt, dann wird die Feldstärke vor dem Lawinenkopf so groß, dass als Folge von Anregungs- und Ionisierungsvorgängen von dort energiereiche elektromagnetische Strahlung ausgeht (Bild 2-5, Mitte links). Hierdurch werden vorgelagerte Sekundärlawinen eingeleitet, die sich schließlich zu einem schnell vorwachsenden Entladungskanal vereinigen. Es ergibt sich eine beträchtliche Erhöhung der Ionisierungsausbeute (Bild 2-5, Mitte rechts).

Zur näheren Betrachtung der Feldstärke: Mit zunehmender Entwicklung der Lawine entsteht zwischen dem mit Elektronen gefüllten, also negativ geladenen Lawinenkopf und den positiven Ionen des Lawinenrumpfes ein Raumladungsfeld, das dem Grundfeld entgegengerichtet ist. Hierbei muss man berücksichtigen, dass sich der größte Teil der positiven Ionen unmittelbar hinter dem Lawinenkopf befindet. Zwischen beiden Ladungen wird deshalb das Grundfeld teilweise kompensiert und die Feldstärke stark herabgesetzt. Nicht nur vor dem Lawinenkopf, sondern auch im hinteren Bereich des Lawinenrumpfes wird deshalb die Feldstärke stark angehoben, so dass es in diesem Bereich zu verstärkten Strahlungsemissionen kommt (Bild 2-5, links).

Neue Anfangselektronen werden durch den Photoeffekt auch auf der zur Kathode weisenden Seite des Raumladungskopfes gebildet. Im hohen Feld der Raumladung entstehen Lawinen großer Verstärkung, wodurch sich die Plasmabrücke schnell zur Kathode hin ausdehnt. Dies führt zur Ausbildung des kathodengerichteten Kanals, bis schließlich eine vollständige, leitende Überbrückung der Elektroden hergestellt ist (Bild 2-5, rechts außen).

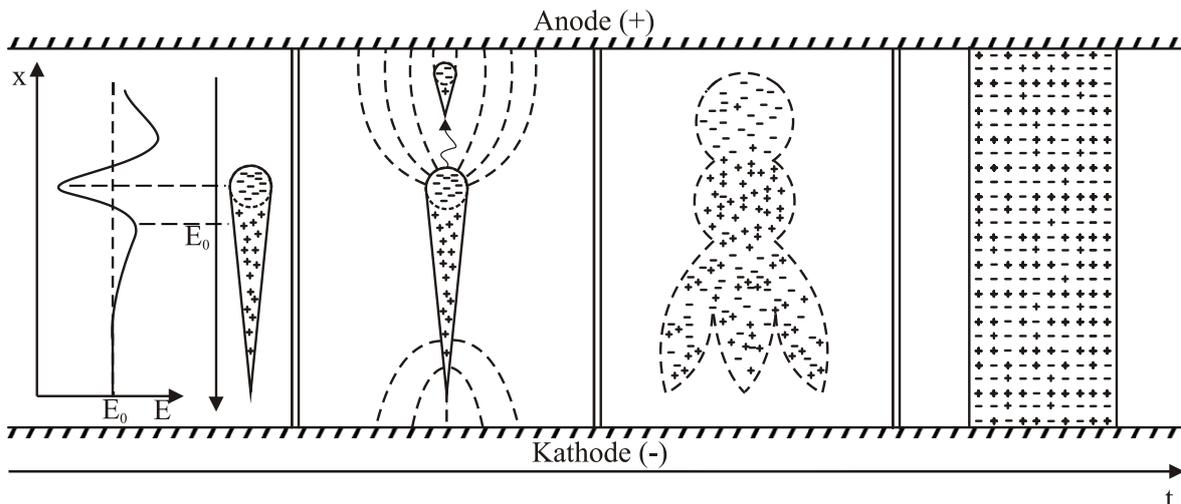


Bild 2-5: Entwicklung einer Lawine hoher Verstärkung zu einem durchgehenden Kanal (Plasma)

2.5 Unterschied Kanalentladung – Townsendentladung

Die Kanalentladung unterscheidet sich von der Townsendentladung im Wesentlichen in drei Punkten:

- Es muss eine kritische Verstärkung von $\alpha x_{krit} \approx 20$ erreicht werden. Dies entspricht im homogenen Feld in Luft etwa dem Wert $p \cdot d \approx 200 \text{ kPa} \cdot \text{cm}$, d.h. in Ionisierungsdurchläufen bei Atmosphärendruck vollzieht sich der Durchschlag bis zu einer Schlagweite von 2 cm.
- Die Aufbauzeit der Kanalentladung beträgt für eine Schlagweite von $d = 1 \text{ cm}$ etwa 10^{-7} s gegenüber 10^{-5} s bei der Townsendentladung. Diese Zeit wird allein durch die Geschwindigkeit der Elektronen auf dem Weg x_{krit} , der bis zur kritischen Verstärkung $\alpha x_{krit} \approx 20$ zurückgelegt werden muss bestimmt. Die anschließende Kanalentwicklung zu Anode und Kathode verläuft durch den Photoeffekt so schnell, dass ihre Zeitdauer in erster Näherung vernachlässigt werden kann. Beim Anlegen höherer Spannungen wird die Aufbauzeit infolge des stark anwachsenden α -Wertes und des daraus folgenden schnelleren Erreichens der Grenze αx_{krit} noch kleiner. Derartige Aufbauzeiten sind im Townsend-Mechanismus durch die Rücklaufzeit der schweren Ionen unmöglich.
- Die Kanalentladung ist raumladungsbeschwert.

2.6 Entladung in Anordnungen mit inhomogenem Feld

2.6.1 Einleitung Koronaentladung

Im homogenen und schwach inhomogenen Feld leitet die selbständige Gasentladung den Zusammenbruch der Isolierfähigkeit der freien Gasstrecke – den elektrischen Durchschlag – ein. Bei stark inhomogenen Feldern führt sie dagegen zum Einsatz einer Koronaentladung (leuchtende Büschel oder Stiele) in unmittelbarer Nähe der Elektroden wo die Feldstärke an z. B. spitzen Ecken und Kanten am Höchsten ist. Die Koronaentladung führt nicht zum vollständigen Durchschlagen der Gasstrecke, da die Trägerdichte durch den Entladungsmechanismus selbst begrenzt wird.

2.6.2 Ursachen der Koronaentladung

Es soll im Weiteren als Beispiel einer inhomogenen Feldanordnung eine Spitze-Platte-Anordnung betrachtet werden.

Die Erscheinung der Koronaentladung hat ihre Ursachen darin, dass die Feldstärkeverteilung zwischen Spitze und Platte stark nicht linear ist. Bild 2-6 zeigt die Feldstärke E und die Elektronen-Ionisationszahl α in Abhängigkeit vom Abstand x von der Spitze für Luft bei 1013 mbar einer Spitze-Platte-Anordnung bei Verwendung eines Metallstiftes mit einer kugelförmigen Spitze und einer großen Platte als Gegenelektrode. Durchmesser des Metallstiftes 0,4 mm; Elektrodenabstand 3 cm; Gesamtspannung 5 kV.

Man sieht, dass die Feldstärke von ihrem Höchstwert 110 kV/cm an der Spitzenoberfläche schnell auf geringe Werte abfällt. In einem Abstand von 0,03 cm beträgt sie nur noch etwa 30 kV/cm. Die Elektronenionisationszahl α fällt von dem sehr hohen Anfangswert $\alpha = 1270$ Ionenpaare je cm Weglänge rasch auf sehr niedrige Werte ab. Im Abstand von 0,04 cm von der Spitze ist der Wert von α auf unter 1 abgesunken.

Neue Ladungsträger können also nur im Raum unmittelbar um die Spitze gebildet werden. Bei positiver Spitze strömen dabei positive Ionen aus dem Bereich sehr hoher Feldstärke in Richtung der großflächigen Gegenelektrode. Sie gelangen dabei bald in ein feldschwaches Gebiet und bewegen sich nur noch mit geringer

Geschwindigkeit fort. In einem Abstand sammelt sich vor der Spitze eine positive Raumladung an.

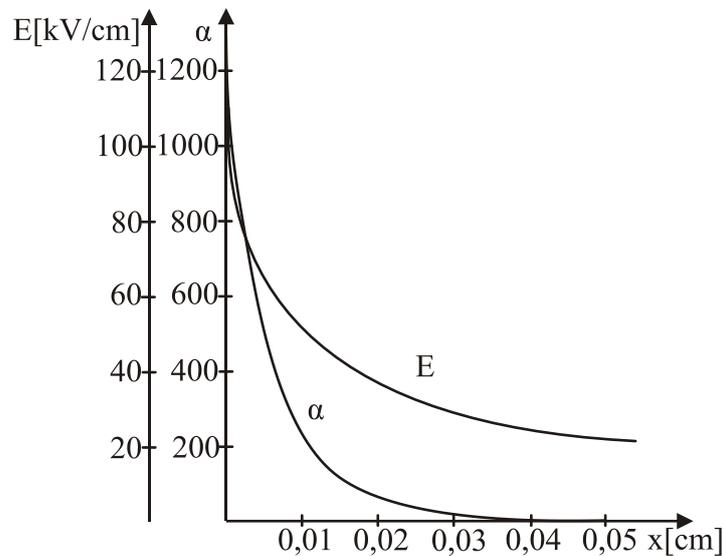


Bild 2-6: Feldstärke E und Ionisierungszahl α in einer Spitze-Platte-Anordnung

Die Ladungsträger, die bei negativer Polung von der Spitze wegströmen, sind freie Elektronen oder negative Ionen. Wegen ihrer höheren Beweglichkeit werden freie Elektronen im Allgemeinen relativ rasch von der negativen Spitze abwandern. Der Aufbau einer negativen Raumladung wird quantitativ erst von größerer Bedeutung sein wenn schwer bewegliche negative Ionen gebildet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen:

Trägererzeugung findet nur in nächster Umgebung der Spitze statt; auf der gesamten Reststrecke werden keine neuen Ionenpaare gebildet. Das ausgedehnte äußere Gebiet der Koronaentladung wirkt im Wesentlichen wie ein in Serie geschalteter Widerstand.

2.6.3 Polaritätseffekt

Wie schon angedeutet, treten je nach Polarität der Spitzenelektrode verschiedene charakteristische Erscheinungsformen der Koronaentladung auf. Bild 2-7 und Bild 2-8 geben einen Überblick. Zuvor wird der effektive Ionisierungskoeffizient α_e beschrieben:

$$\alpha_e = \alpha - \eta$$

wobei η den Anlagerungskoeffizienten beschreibt. Er gibt die relative Abnahme der eine Längeneinheit durchlaufenden Elektronen bzw. die Anlagerungswahrscheinlichkeit eines Elektrons je Längeneinheit an.

Lawinenbildung ist nur bei $\alpha_e > 0$ möglich. D. h. die Bildung neuer Elektronen durch Stöße muss gegenüber der Anlagerung von Elektronen überwiegen, damit sich überhaupt eine Lawine bilden kann.

Positive Spitze

Negative Spitze

Voraussetzungen für Lawine

Erzeugt äußere Strahlung ein Startelektron im Nahbereich der Spitze, kann eine Lawine entstehen, die in Richtung der Spitze vorwächst.

Ein Startelektron muss in einem sehr kleinen Bereich direkt an der Spitze zur Verfügung stehen (ein Zündverzug aufgrund statistischer Streuzeit bis zur Entstehung eines Startelektrons ist möglich).

Lawinenverlauf

Folgelawinen können weiter im Gasvolumen starten, da sich die Feldstärke vor der Spitze durch die aufgebaute Raumladung verschiebt.

Als Folge entsteht bei Erreichen der Einsetzspannung deshalb zunächst eine unregelmäßige Folge von Koronaimpulsen, die auch von der Austrittsarbeit des Kathodenmaterials abhängt. Die entstehenden Streamer wachsen in ein feldschwaches Gebiet hinein.

Nach Erreichen der kritischen Elektronenzahl für den Streamermechanismus entstehen ständig neue Folgelawinen durch intensive Photoionisation. Die Elektronen werden über die positive Spitze abgeleitet.

Nach Überschreiten von $\alpha_e = 0$ reduziert sich die Elektronenanzahl in den Lawinen durch Anlagerung an elektronegative Gasmoleküle. Es entsteht eine negative Raumladung.

Feldstärke und Raumladung

Vor der Spitze bleibt eine positive Raumladungswolke aus den verhältnismäßig schlecht beweglichen Ionen zurück. Dadurch wird die elektrische Feldstärke vor der positiven Spitze reduziert und im feldschwachen Bereich erhöht.

Die Lawinen hinterlassen vor der Spitze eine positive Raumladungswolke. Es ergibt sich eine erhebliche Erhöhung der Feldstärke vor der Spitze und eine Vergleichmäßigung der Feldverteilung bis zur Gegenelektrode.

Veränderung α_e

Der Ionisierungskoeffizient $\alpha_e = 0$ wird zu größerem Wert $x = x_0$ verschoben.

Der Ionisierungskoeffizient $\alpha_e = 0$ wird zu kleinerem Wert $x = x_0$ verschoben.

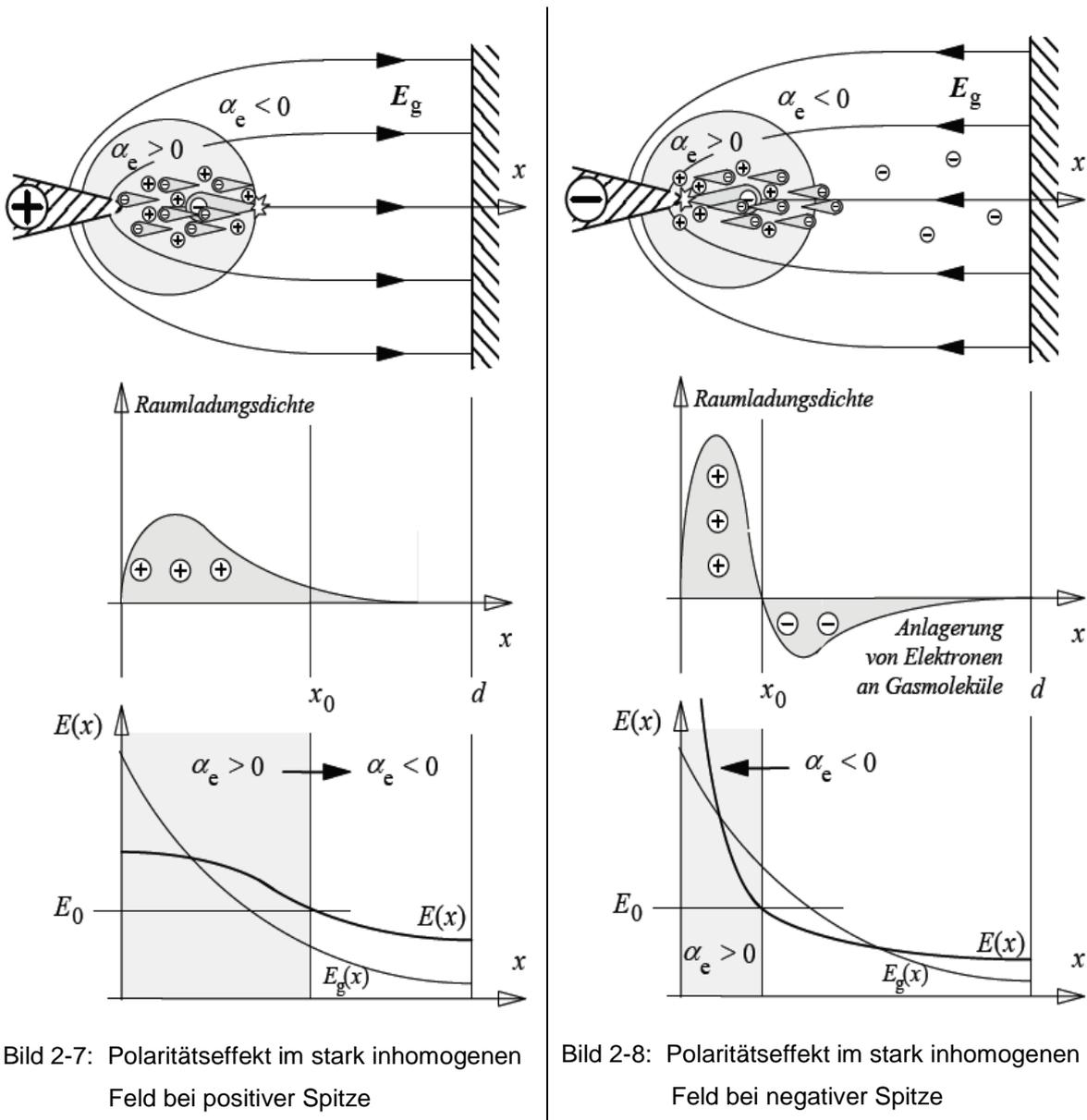


Bild 2-7: Polaritätseffekt im stark inhomogenen Feld bei positiver Spitze

Bild 2-8: Polaritätseffekt im stark inhomogenen Feld bei negativer Spitze

Oben: Ausbildung von Streamern; Mitte: Ausbildung der Raumladung; Unten: Feldstärkeverlauf entlang der x -Achse

Das Grundfeld $E_g(x)$ in obiger Abbildung beschreibt den Verlauf der inhomogenen Grundfeldstärke einer Spitze-Platte Anordnung und $E(x)$ den Verlauf der Feldstärke unter Berücksichtigung der Raumladung.

Durch den gleichmäßigen Feldverlauf im feldschwachen Bereich vor der negativen Spitze wird das Streamerwachstum hinausgezögert. Dadurch ergibt sich für die Durchschlagsspannungen:

$$U_{d(neg. Spitze)} > U_{d(pos. Spitze)}$$

2.6.4 Trichel-Impulse

Das Anwachsen der negativen Raumladung kann die Feldstärke vor der negativen Spitze soweit absenken, dass die Vorentladung erlischt. Erst wenn die negativen Ionen abgewandert sind, zündet die Vorentladung erneut. Die so entstehenden, regelmäßig auftretenden Impulse werden als Trichel-Impulse bezeichnet.

Der Zeitabstand zwischen 2 Impulsen wird mit zunehmender Spannung aufgrund der erhöhten Ionenwanderungsgeschwindigkeit kleiner, d. h. die Wiederholfrequenz der Trichel-Impulse nimmt zu. Werden genauso viele negative Ionen gebildet wie abfließen, so geht die impulsförmige Vorentladung in eine gleichmäßige Entladung über.

3 Elektrische Festigkeit von flüssigen und festen Isolierstoffen

3.1 Durchschlag in Mineralöl

Mineralöl spielt als flüssiger Isolierstoff die größte Rolle. In jüngster Zeit wird jedoch auch der Einsatz von Ölen auf Basis nachwachsender Rohstoffe (z. B. Rapsöl) als Isolierstoff eingesetzt und weiter erforscht. Derzeit existiert noch keine geschlossene Theorie für den Öldurchschlag, die mit jener des Gasdurchschlages vergleichbar wäre. Zwei Mechanismen spielen in der Praxis allerdings immer wieder eine Rolle:

- der Faserbrückendurchschlag
- der Durchschlag infolge von Verschmutzung und Alterung.

3.1.1 Faserbrückendurchschlag

Mineralöl wird meist in Verbindung mit Zellulose in Form von Papier oder Transformerboard als Mischdielektrikum eingesetzt. Im Öl befinden sich dann zu einem bestimmten Grad Zellulosefasern. Vor allem bei längeren Beanspruchungszeiten richten sich die Fasern im elektrischen Feld aus und reihen sich aneinander (Bild 3-1). Da Zellulose stark hygroskopisch ist, enthalten die Fasern einen hohen Wasseranteil. Sie stellen leitfähige Bahnen dar, die zu einer lokalen Feldverzerrung und damit zu einer Schwachstelle des Dielektrikums führen.

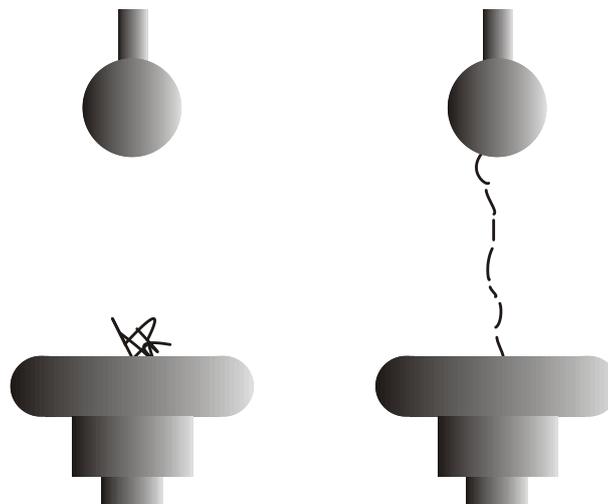


Bild 3-1: Aufbau einer Faserbrücke; links: ohne Spannung; rechts: mit anliegender Spannung

3.1.2 Verschmutzung und Alterung

Mineralöl reagiert chemisch mit dem Sauerstoff der Luft. Über einen Zeitraum von Monaten bis Jahren bilden sich organische Säuren (Ameisensäure, Essigsäure). Die Säuren bestehen aus polaren Molekülen und erhöhen die Leitfähigkeit des Öls. Zusätzlich wird Mineralöl in Laufe der Zeit durch thermische Beanspruchung, d. h. hohe Temperaturen in der Isolieranordnung, chemisch zersetzt. Diese Zersetzungsprodukte und die Säuren stellen Verunreinigungen bzw. Partikel dar, welche die Spannungsfestigkeit des Öls deutlich reduzieren.

Die Spannungsfestigkeit von Mineralöl wird wesentlich durch seinen Wassergehalt beeinflusst. Wasser kann sich bis zu einem gewissen Grad im Öl lösen. Steigt der Wassergehalt über die maximale Löslichkeit weiter, so spricht man von einer Emulsion. Hochspannungstechnisch von Bedeutung ist nur der Bereich der Lösung. In Bild 3-2 ist die Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke E_d vom relativen Wassergehalt angegeben. Der relative Wassergehalt im Öl ergibt sich als Quotient des tatsächlichen Wassergehaltes $W_{\vartheta m}$ und des temperaturabhängigen Sättigungs-Wassergehaltes W_{sat} .

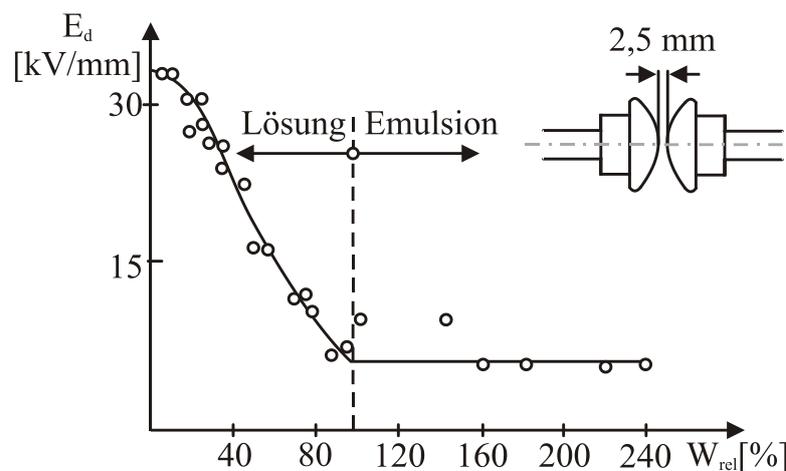


Bild 3-2: Durchschlagfeldstärke E_d von Mineralöl in Abhängigkeit des relativen Wassergehaltes W_{rel} im homogenen Feld (kalottenförmige Norm-Prüfanordnung)

3.2 Durchschlag von festen Isolierstoffen

Bei festen Isolierstoffen können drei Durchschlagsmechanismen unterschieden werden:

- der rein elektrische Durchschlag
- der Wärmedurchschlag
- der Teilentladungs / (TE)-Durchschlag infolge von Alterung und Materialerosion (meist aufgrund von herstellungstechnisch bedingten Schwachstellen, z. B. Lunker (Hohlraum bei einem Gießvorgang))

3.2.1 Rein elektrischer Durchschlag

Zur Erklärung des rein elektrischen Durchschlages dient das Bändermodell der Festkörperphysik. Das Leitungsband von Isolierstoffen ist nur schwach besetzt. In Isolierstoffen stehen daher extrem wenige Elektronen zur Verfügung, weswegen die Leitfähigkeit auch sehr gering ist. Durch die Wirkung eines starken äußeren elektrischen Feldes können freie Elektronen aus den Elektroden herausgelöst werden (äußere Feldemission) oder aus dem Valenzband ins Leitungsband angehoben werden (innere Feldemission). Die innere Feldemission erklärt man sich durch eine Verzerrung der Energiezustände durch das äußere Feld so, dass durch quantenmechanische Effekte wie das Tunneln Elektronen ins Leitungsband gelangen. Die dazu nötigen Feldstärken sind bei reinen Kristallen extrem hoch. Praktische kristalline Feststoffe, wie z. B. mineralische Materialien (Quarz, Glimmer) oder hochpolymere Kunststoffe (Polyäthylen, PE) weisen aber Unregelmäßigkeiten auf. Dies sind z. B. Korngrenzen, an denen sich Verunreinigungen sammeln, oder eingelagerte Fremdatome. Dies führt zu energetischen Zuständen im Bändermodell unterhalb des Leitungsbandes, aus denen sich bereits bei niedrigeren äußeren Feldstärken Elektronen herauslösen lassen.

3.2.2 Wärmedurchschlag

Ein Wärmedurchschlag tritt auf, wenn die einem Isolierstoff zugeführte Wärmeleistung P_{zu} dauerhaft größer ist, als die abgeführte Wärmeleistung P_{ab} . Diese Bedingung bewirkt ein Ansteigen der Temperatur in dem Isolierstoff, bis dieser thermisch zerstört wird. Der Wärmedurchschlag spielt vor allem bei Isolierstoffen mit hohem Verlustfaktor ($\tan \delta$) eine Rolle. Die zugeführte Wärmeleistung P_{zu} ergibt sich aus der Verlustleistung P_{diel} im Dielektrikum und

der zugeführten Stromwärmeleistung P_S . Die Stromwärmeleistung P_S ist temperaturunabhängig.

Die Wärme des Isolierstoffs wird an den Kontaktflächen mit den Elektroden an diese abgegeben. Mit der Kontaktfläche A und der Wärmeübergangszahl α erhält man für die Wärmeleistung P_{ab} , die über die Elektroden mit der Umgebungstemperatur T_U vom Isolierstoff abgeführt werden kann:

$$P_{ab} = \alpha \cdot A \cdot (T - T_U).$$

Bild 3-3 zeigt die prinzipiellen Verläufe der abgegebenen Wärmeleistung P_{ab} und der zugeführten Wärmeleistung P_{diel} ($P_S = 0$). Der Betriebspunkt A ist thermisch stabil, da die Steigung der abgegebenen Wärmeleistung größer ist, als die der zugeführten Leistung. Die obere Bedingung ist also erfüllt. Betriebspunkt B wäre dagegen thermisch instabil, da die abgeführte Wärmeleistung deutlich schwächer ansteigt, als die dielektrische Verlustleistung.

Für eine geringere Wärmeübergangszahl $\alpha_1 < \alpha_2$ wird die Neigung der Geraden $P_{ab} = P_{ab}(T, \alpha_1)$ flacher. Bei gleichzeitig höherer Umgebungstemperatur $T_{U,2} > T_{U,1}$ existiert kein Schnittpunkt zwischen den Kennlinien der zu- und der abgeführten Leistung mehr. Für eine niedrigere Spannung $U_1 < U_2$ verläuft die zugeführte Verlustleistung $P_{diel} = P_{diel}(T, U_1)$ flacher und im vorliegenden Beispiel existiert ein Schnittpunkt C als Grenzbetriebspunkt. Allerdings führt bereits ein leichter Temperaturanstieg zu Instabilität, da dann die Steigung der Verlustleistung $P_{diel}(T, U_1)$ größer ist, als die Steigung der abgeführten Wärmeleistung.

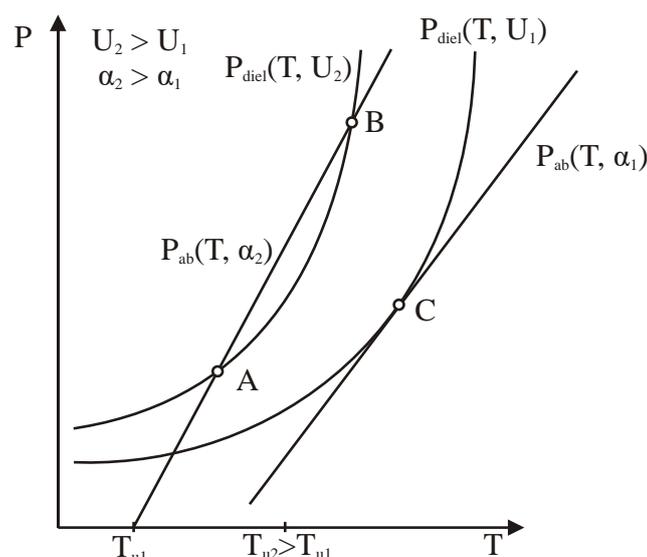


Bild 3-3: Prinzipielle Verläufe der Wärmeleistungen in einem Isoliersystem zur Erklärung des Wärmedurchschlags

3.2.3 Teilentladungen (TE), Erosionsdurchschlag, elektrische Alterung

Bei festen Isolierstoffen können nach sehr langer Beanspruchungszeit Durchschläge deutlich unter der Grenz-Spannung für thermische Dauerfestigkeit der Isolierung beobachtet werden. Dieser Durchschlagsvorgang wird von Teilentladungen (TE) eingeleitet. Im Betriebsmitteldiagnostik werden Teilentladungen näher erläutert.

4 Literatur

- /Schz1968/ Schulz, P., Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern, 1968, 3.Auflage, Braun Verlag
- /BeBoMoeZa1986/ Beyer, M., Boeck, W., Möller, K., Zaengl, W., Hochspannungstechnik, 1.Auflage, 1986, Springer Verlag
- /Higa1997/ Hilgarth, G., Hochspannungstechnik, 3.Auflage, 1997, B.G. Teubner Stuttgart
- /Küc2005/ Küchler, A., Hochspannungstechnik, 2.Auflage, 2005, Springer Verlag

5 Fragen

1. Welche Ionisierungsmechanismen gibt es und wie laufen sie ab?
2. Worin unterscheiden sich selbstständige und unselbstständige Entladung?
3. Wie verläuft die Ladungsträgergeneration einer Townsendentladung? Welche Bedeutung haben die Ionisierungskoeffizienten?
4. Wie entsteht ein Entladungskanal aus einer Elektronenlawine?
5. Beschreiben Sie die Koronaentladung bei einer Spitze-Platte-Anordnung. Wo entstehen Startelektronen und Raumladungsbereiche?
6. Welche Unterschiede bestehen zwischen positiver und negativer Spitze („Polaritätseffekt“)?
7. Beschreiben Sie den Mechanismus des elektrischen Durchschlages in festen Isolierstoffen.
8. Die Streuung der Durchschlagfestigkeit fester Isolierstoffe ist größer als bei gasförmigen. Worin liegt die Tatsache begründet?
9. Geben Sie die wichtigsten Isolierstoffe an!
10. Erläutern Sie die Mineralölalterung in einem Transformator sowie Maßnahmen zu deren Begrenzung und Verzögerung!
11. Überlegen Sie, welche Vor- und Nachteile gasförmige, flüssige und feste Isolationsmedien aufgrund des Aggregatzustands haben.

Protokoll zum Praktikum Elektroenergiesysteme

Versuch: Isolierstoffe

Dielektrische Festigkeit von Isolierstoffen

<input type="text"/>	Gruppe:	Namen:	<input type="text"/>
<input type="text"/>	Datum:		<input type="text"/>
			<input type="text"/>

Hinweise:

Diskutieren Sie alle Versuchsergebnisse in Stichworten!

1 Versuchsaufbau

Die 50-Hz-Wechselspannung (230 V) wird über einen Stelltransformator und über die Sicherheitseinrichtung auf den 100 kV-Hochspannungstransformator gegeben (Bild V1). Die Hochspannung wird durch einen Einweggleichrichter gleichgerichtet, durch eine Kapazität geglättet und der Funkenstrecke zugeführt. Die Wasserwiderstände dienen zur Begrenzung des Stromes beim Durchschlag. Die Hochspannung wird mittels eines ohmschen Spannungsteilers gemessen.

Es stehen zwei Funkenstrecken (Spitze – Platte) zur Verfügung. Eine davon befindet sich in einem evakuierbaren Prüfgefäß. An die Niederspannungselektrode (Platte) dieser Funkenstrecke kann wahlweise ein Pikoampèremeter oder ein 50 Ω Widerstand eingeschaltet werden. Ersteres dient zur direkten Erfassung des Stromes durch die Funkenstrecke, an dem Widerstand lässt sich eine dem Strom proportionale Spannung abgreifen, die mit einem Oszilloskop betrachtet werden kann. Der parallele Edelgasableiter schützt das jeweilige Messgerät bei einem

etwaigen Überschlag oder einer Unterbrechung des Strompfades vor Überspannungen.

Mit der zweiten Funkenstrecke wird die Höhe der Durchschlagspannung bei verschiedenem Abstand zwischen Spitze und Platte bei Atmosphärendruck bestimmt.

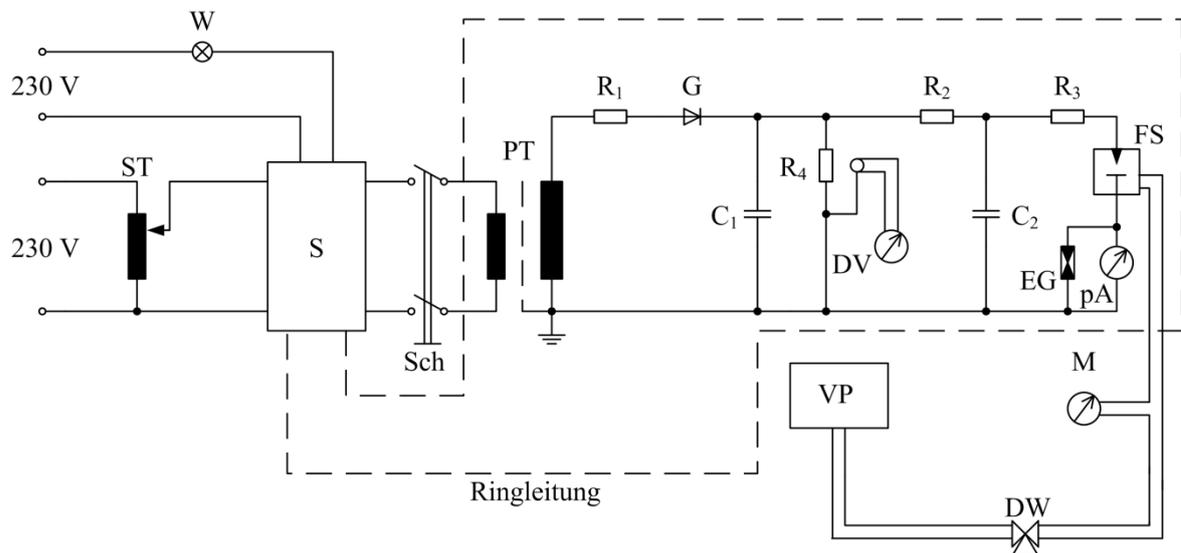


Bild V1: Aufbau der Gasentladungsversuche

S	Sicherheitseinrichtung
ST	Stelltrafo
Sch	Trennschalter
PT	Prüftrafo
G	Gleichrichter
R_1	Wasserwiderstand
R_2	Glättungswiderstand 10 M Ω
R_3	Wasserwiderstand
R_4	Messwiderstand 140 M Ω (mit Messabgriff)
C_1 und C_2	Glättungskondensatoren ($C_1 = 1,2$ nF; $C_2 = 6$ nF)
FS	Funkenstrecke
EG	Edelgasableiter
pA	Pikoamperemeter
DV	Digitalvoltmeter
VP	Vakuumpumpe
DW	Dreiweghahn
M	Manometer
W	Warnlampe

2 Strom-Spannungs-Charakteristik einer evakuierbaren Spitze-Platte-Funkenstrecke

Aufgabe:

Ermitteln sie bei der Schlagweite $d = 15 \text{ mm}$ (fest eingestellt) die Spannung U_m über der Funkenstrecke für den vorgegebenen Strom I_f durch die Funkenstrecke.

Messwerte:

U_m [kV]				
I_f [A]	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

2.1 Positive Polarität der Spitze, $p = 250 \text{ mbar}$

U_m [kV]				
I_f [A]	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

2.2 Positive Polarität der Spitze, $p = 400 \text{ mbar}$

U_m [kV]				
I_f [A]	$-4 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-5}$

2.3 Negative Polarität der Spitze, $p = 250 \text{ mbar}$

U_m [kV]				
I_f [A]	$-4 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-5}$

2.4 Negative Polarität der Spitze, $p = 400 \text{ mbar}$

Auswertung / Fragen:

Erläutern Sie, warum bei unterschiedlichem Druck p bei gegebenem Strom die Spannungen U_m sich unterscheiden. Welche Auswirkung hat die Polarität der Spitze?

3 Trichel-Impulse

Aufgabe:

Ermitteln Sie die Folgefrequenz der Trichel-Impulse bei negativer Polarität der Spitze in Abhängigkeit von der Spannung U_m an der Funkenstrecke. Verwenden Sie den „FastAq“-Modus des Oszilloskopes und triggern Sie auf die negative Flanke. Nutzen Sie die Messmöglichkeiten des Oszilloskops!

- T : Zeit zwischen zwei Trichel-Impulsen
- f : Folgefrequenz der Trichel-Impulse

Messwerte:

U_m [kV]				
T [μ s]	5	3	2	1
f [MHz]				

3.1 Negative Polarität der Spitze (50 Ω Abschlusswiderstand): $p = 400$ mbar

U_m [kV]				
T [μ s]	5	3	2	1
f [MHz]				

3.2 Negative Polarität der Spitze (50 Ω Abschlusswiderstand): $p = 300$ mbar

Auswertung / Fragen:

Skizzieren Sie die genaue Messschaltung zur Ermittlung der Folgefrequenz der Trichel-Impulse.

Wozu dient der Abschlusswiderstand?

4 Durchschlag in Luft

Aufgabe:

Ermittlung der Durchschlagspannung U_D bei positiver und negativer Polarität der Spitze in Abhängigkeit von der Schlagweite d .

Bitte beachten Sie: Nicht auf den Lichtwellenleiter treten oder diesen knicken.

Die Schlagweite der Funkenstrecke wird über einen Stellmotor und eine außerhalb des Feldes befindliche Steuerung variiert.

Messwerte:

d [mm]	10	20	30	40	50
U_D [kV]					

4.1 Positive Polarität der Spitze

d [mm]	10	20	30	40	50
U_D [kV]					

4.2 Negative Polarität der Spitze

Auswertung / Fragen:

Welches Phänomen konnten Sie beobachten? Erklären Sie kurz und diskutieren anschließend!

5 Durchschläge in Öl und Feststoff

Aufgabe:

Ermittlung der Durchschlagsspannung U_D bei dem Transformatoröl Shell Diala D bei einem Elektrodenabstand a und dem Feststoff Transformerboard in Abhängigkeit der Dicke d . Hierzu wurde das Transformerboard nach IEC 60243-1; VDE 0303-21 (Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen) behandelt: Als Feuchtigkeit absorbierender Werkstoff muss es getrocknet und mit Öl imprägniert werden, bevor es für die Prüfung verwendet werden kann. Als Elektroden werden die jeweils durch die Norm vorgegebenen Elektroden verwendet. Die Pressboardplatte wird dabei zwischen die Elektroden geklemmt, sodass der Elektroden-Abstand der Dicke des Isolierstoffes entspricht. Achten Sie darauf, dass die Platten bzw. das Öl nicht mit den Händen in Berührung kommt, da es zu Absorptionen (durch Fett auf der Haut, Verunreinigungen, etc.) und Verfälschungen der Messergebnisse kommen kann. Verwenden Sie eine Pinzette, um die Pressboardprüflinge in das Ölbad zu geben.

Geprüft wird mit dem Ölprüfgerät Dieltest der Firma Baur mit einer automatischen Spannungssteigerung von 2 kV/s.

Messwerte:

Geben Sie die ermittelten Durchschlagsspannungen U_D aus 3 Messungen pro Probe an.

Werte	Isolieröl Shell Diala D		Transformerboard	
	$a = 2,5mm$	$a = 0,5mm$	$d = a = 0,5mm$ nicht imprägniert	$d = 0,25 mm$ imprägniert
$U_{D,1}$ [kV]				
$U_{D,2}$ [kV]				
$U_{D,3}$ [kV]				

5.1 Messwerte Durchschläge

Auswertung:

Diskutieren Sie die Messergebnisse des Versuchs.