

3 Spannungsfestigkeit der Luftstrecken

Luftstrecken müssen so bemessen sein, dass bei den im Betrieb auftretenden Spannungen kein Durchschlag auftritt. Hierbei sind sowohl die langfristig anliegenden Arbeitsspannungen als auch die kurzzeitig anliegenden transienten Überspannungen zu berücksichtigen. In vielen Fällen müssen auch Teilentladungen in der Luft vermieden werden. Im Folgenden werden zunächst nur freie Luftstrecken betrachtet. Das Verhalten von Luftstrecken, die in der Oberflächengrenzschicht einer festen Isolierung verlaufen, wird mit den Kriechstrecken in Kapitel 4 beschrieben.

Bei der Bemessung der Luftstrecken ist zu beachten, dass sehr kleine Abstände durch angelagerte Staubteilchen wesentlich verringert werden können. Es sind deshalb gegebenenfalls Zuschläge vorzunehmen. Als Richtwerte hierfür können in Anlehnung an IEC 60721-2-5 [8]

- in der Mikro-Umgebungskategorie 2: 75 μm ,
- in der Mikro-Umgebungskategorie 3: 150 μm

empfohlen werden. Bei der Mikro-Umgebungskategorie 4 müssen gegebenenfalls auch Niederschläge, wie Regen, berücksichtigt werden.

Hauptsächlich durch kosmische und radioaktive Strahlung werden in Luft im Normalzustand rund 50 Gasmoleküle je cm^3 und Sekunde ionisiert. Ihre Lebensdauer bis zur Rekombination beträgt im Mittel 17,5 s [10], sodass sich ein Gleichgewicht bei etwa 500 bis 1000 Ionen je cm^3 einstellt [12]. Auch aus der metallenen Oberfläche der Elektroden können Elektronen ausgelöst und als Anfangsladungsträger bereitgestellt werden. Für die Feldemission, die durch mikroskopisch kleine Unebenheiten der Elektrodenoberfläche unterstützt wird, ist an üblichen Elektrodenwerkstoffen eine Mindestfeldstärke von 10^7 V/cm bis 10^8 V/cm notwendig [18].

Bei Stoßspannungsprüfungen kann es vorteilhaft sein, zuverlässig die erforderlichen Anfangsladungsträger bereitzustellen. Hierfür eignet sich die Bestrahlung der Katode mit einer Quarzlampe oder mit Funkenlicht. Bei hinreichender Bestrahlungsintensität durch eine Quarzlampe können etwa 10^5 Elektronen/ns, mit Funkenlicht etwa 10^4 Elektronen/ns bereitgestellt werden [19]. Eine wirksame Freisetzung von Ladungsträgern findet allerdings nur bei sehr kleinen Wellenlängen bis etwa 275 nm statt [24].

Die Anfangselektronen bewegen sich im elektrischen Feld der Feldstärke E zur Anode hin und nehmen dabei längs der Strecke x die Energie auf:

$$\Delta W = e E x.$$

Ist die Energie eines Elektrons ausreichend, so kann es bei einem Zusammenstoß mit einem Gasmolekül ein weiteres Elektron durch Stoßionisation freisetzen. In Luft muss hierzu wenigstens die Ionisationsenergie $W_1 \approx 15 \text{ eV}$ aufgebracht werden [17]. Die Aufeinanderfolge vieler derartiger Ionisationen kann zu einer lawinenartigen Vermehrung der Elektronen führen, die schließlich einen leitenden Plasmakanal zwischen den Elektroden ausbildet und den Durchschlag einleitet. Bei sehr großer Lawinenverstärkung verursacht die hohe Zahl der Ladungsträger im Lawinenkopf eine Überhöhung des katoden- und anodenseitigen Felds bei gleichzeitiger Feldschwächung zwischen Lawinenkopf und -schwanz. Aus dem Lawinenkopf werden Photonen ausgesandt, die zunächst im Raum zur Anode hin weitere Lawinen auslösen und dann einen anodengerichteten Entladungskanal formieren. Nachfolgende Lawinen führen schließlich zur Bildung des hochleitfähigen Plasmakanals und leiten den endgültigen Durchschlag ein.

Die elektrische Festigkeit hängt insbesondere im homogenen Feld auch vom Zustand der Elektrodenoberfläche, von der Temperatur und von der Luftfeuchtigkeit ab. Stark verschmutzte Oberflächen stören durch lokale Feldüberhöhungen die Homogenität. Dünne Oxid- und Quecksilberschichten verändern die Austrittsarbeit [68]. In der Luft enthaltene Wassermoleküle vermindern die Beweglichkeit der Gasionen und die Gasverstärkung, indem der Lawine Elektronen durch Anlagerung an Wasserdipole entzogen werden. Auch die Erzeugung von Sekundärelektronen durch Fotoionisation wird bei zunehmendem Wasserdampfpartialdruck vermindert.

3.1 Festigkeit bei langzeitiger Spannungsbeanspruchung

Luftstrecken müssen so bemessen sein, dass die betriebsmäßig langfristig anliegenden Spannungen keine Durchschläge verursachen. Dabei ist zu unterscheiden, ob zwischen den Elektroden ein homogenes oder ein inhomogenes Feld herrscht. Auch die Frequenz der anliegenden Spannung ist von Bedeutung. In den meisten Fällen muss neben dem Durchschlag auch Dauerglimmen vermieden werden, das bei inhomogener Feldverteilung bei Abständen über etwa 1 mm auftreten kann. Die hierbei erzeugten Gase (z. B. Ozon und Stickoxide) können benachbarte Isolierstoffe und Elektroden angreifen und damit zu einer Minderung der Spannungsfestigkeit beitragen.

3.1.1 Durchschlag im homogenen Feld

Die Spannungsfestigkeit von Luftstrecken mit homogener Feldverteilung unter langzeitiger Beanspruchung wird beschrieben durch die Paschen-Abhängigkeit [17]:

$$U_D = A \frac{ps}{\ln(ps) + \ln \left[\frac{B}{\ln C} \right]}. \quad (3.1)$$

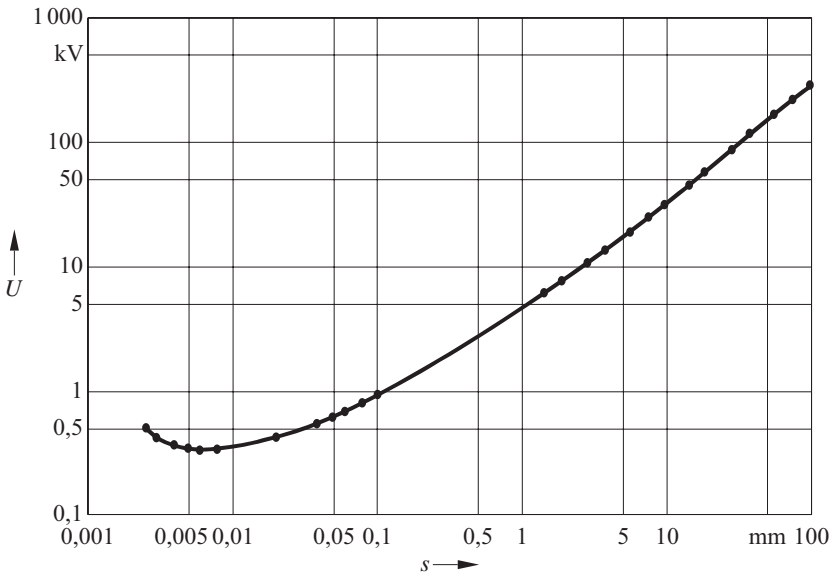


Bild 3.1 Paschen-Kurve für Luft bei 1013 hPa [56]

Sie besagt, dass die Durchschlagsspannung bei einer bestimmten Gasart und bei gegebenem Elektrodenmaterial nur noch vom Produkt aus Schlagweite s und Druck p abhängt. **Bild 3.1** zeigt die in zahlreichen Messungen bestätigte Paschen-Kurve in Luft bei Normaldruck, die der Bemessung zugrunde gelegt werden kann. Einen guten Überblick über die verschiedentlich gemessenen und genormten Paschen-Kurven in Luft gibt Dakin in [56].

Bildet man die Ableitung von Gl. (3.1) nach dem Produkt $p \cdot s$, so erkennt man, dass U_D ein Minimum bei kleinem $p \cdot s$ hat. In Luft mit Normaldruck liegt dieses sogenannte Paschen-Minimum mit rund $U_D = 350$ V bei einem Elektrodenabstand von etwa $7 \mu\text{m}$ [17]. Die Verminderung der Schlagweite ist demnach nur bis zu einer gewissen Grenze mit einer reduzierten Durchschlagsspannung verbunden. Darunter steigt die Festigkeit wieder an, da auf der kurzen Strecke immer weniger Elektronen mit einer zur Ionisation ausreichenden Energie auf Gasmoleküle treffen.

Teilentladungen und Sprühen treten im homogenen Feld nicht auf, da die Zündbedingungen für Entladungen infolge der gleichmäßigen Feldverteilung überall gleichermaßen gegeben oder nicht gegeben sind.

Veränderungen der Temperatur T und des Luftdrucks p verursachen eine Änderung der Luftdichte. Ihr Einfluss auf die Durchschlagsspannung im Vergleich zu den Normalbedingungen $T_0 = 293$ K und $p_0 = 1013$ hPa kann mit

$$U_{D0} = U_D k_D = U_D \frac{p_0 T}{p T_0} \quad (3.2)$$

im Bereich $k_D \leq \pm 7 \%$ recht genau abgeschätzt werden [4], außerhalb dieses Bereichs ist die Abschätzung mit einem zunehmenden Fehler verbunden, der aber bis $k_D \leq \pm 15 \%$ noch unter rund 2 % bleibt. Bei Abständen unter etwa 10 mm ist bei der Umrechnung auch noch der Einfluss der Schlagweite zu berücksichtigen. Es kann dann die aus der Paschen-Abhängigkeit (3.1.1) abgeleitete zugeschnittene Größengleichung verwendet werden [23]:

$$\frac{U_{D0}}{\text{kV}} = \frac{U_D}{\text{kV}} + 2,6 \left[1 - \frac{p T_0}{p_0 T} \right] \frac{s}{\text{mm}} + 1,58 \left[1 - \frac{p T_0}{p_0 T} \right] \left[\frac{s}{\text{mm}} \right]^{1/2}. \quad (3.3)$$

Mit den Gln. (3.2) und (3.3) verfügt man über die Grundlage, im homogenen Feld Durchschlagsspannungen, die bei beliebiger Temperatur und beliebigem Luftdruck gemessen wurden, auf Normalbedingungen umzurechnen.

3.1.2 Durchschlag und Teilladungen im inhomogenen Feld

Eine Berechnung der Durchschlagsspannung im inhomogenen Feld ist nur unter idealisierenden Bedingungen mithilfe der Townsend'schen Zündbedingung möglich. Sie scheitert, wenn das Feld durch Raumladungen deutlich verändert wird oder wenn der Übergang in den Kanalmechanismus eintritt. Dies führt z. B. bei Spitze-Platte-Anordnungen in atmosphärischer Luft zu dem sogenannten Polaritätseffekt [18], der sich bei einem bestimmten Elektrodenabstand umkehren kann: Bei kleineren Abständen erhält man die geringste Durchschlagfestigkeit bei negativer Polarität der Spitze, während bei größeren Abständen die positive Spitze entscheidend ist. Für Spitzenverrundungsradien von 7 μm bis 30 μm wurde diese Umkehrung bei einer Schlagweite von etwa 1,5 mm beobachtet [23, 24]. Messungen zur Ermittlung der elektrischen Festigkeit im inhomogenen Feld müssen deshalb entweder mit bipolaren Prüfspannungen, vorzugsweise mit Wechselspannung, oder mit zwei aufeinanderfolgenden Prüfungen mit unipolaren Spannungen gegensätzlicher Polarität vorgenommen werden, wenn die Polarität der Spannung an den Elektroden nicht vorgegeben ist.

Die Bemessungsregeln der DIN EN 60664-1 (**VDE 0110-1**) für Luftstrecken mit inhomogenem Feld unter langzeitiger Spannungsbeanspruchung stützen sich auf Messungen von Hermstein [55], der eine Spitze-Platte-Anordnung mit sehr geringem Spitzenverrundungsradius von vermutlich etwa 7 μm [24] verwendete (angegeben sind 25 μm). Entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 2.5 ist es dagegen ausreichend, als kleinsten Verrundungsradius 25 μm bis 30 μm anzusetzen. Der Bemessung könnten deshalb die entsprechend **Bild 3.2** gemessenen Festigkeiten zugrunde gelegt werden, die geringfügig höher als die in DIN EN 60664-1 (**VDE 0110-1**) angegebenen Werte sind. Eine Kante-Platte-Anordnung mit gleichem Kantenverrundungsradius hat eine höhere Spannungsfestigkeit.

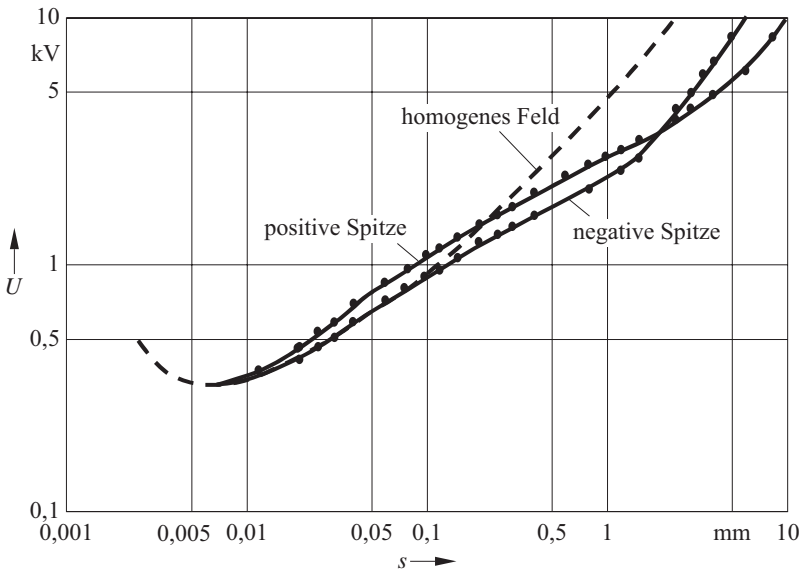


Bild 3.2 Durchschlagspannung von Luftstrecken einer Spitze-Platte-Anordnung bei Gleichspannungsbeanspruchung unterschiedlicher Polarität [24]

Spitzenelektrode: Verrundungsradius 25 μm bis 30 μm

Plattenelektrode: quadratische Chromstahlplatte Kantenlänge 1 m

Zum Vergleich ist die Paschen-Kurve entsprechend Bild 3.1 gestrichelt eingezeichnet.

Bei negativer Spitze und einer Schlagweite bis zu 0,1 mm entsprechen die in Bild 3.2 angegebenen Festigkeiten denen der Paschen-Kurve. Erst bei größeren Abständen gewinnt die Feldinhomogenität zunehmend an Einfluss, sodass die Durchschlagspannungen gegenüber dem homogenen Feld vermindert sind. Dabei ist die negative Spitze zunächst weniger spannungsfest als die positive. Die Anfangselektronen durchlaufen hier zu Beginn das Gebiet hoher Feldstärke mit raschem Lawinaufbau. Deshalb ist im Gegensatz zur positiven Spitze kaum zu erwarten, dass die Entladung dadurch zum Erliegen kommt, dass die Anfangsladungsträger durch Wiederanlagerung verloren gehen [58]. Mit zunehmendem Elektrodenabstand bestimmt dann die positive Raumladung vor der Spitze das Durchschlagverhalten. Ist die Anordnung bei größeren Schlagweiten sehr inhomogen, so wird die Wirkung dieser positiven Raumladung durch eine bei Anlagerungsprozessen gebildete negative Raumladung teilweise kompensiert [24]. Dies äußert sich in der erhöhten Steigung der gemessenen Kennlinie ab etwa 1,3 mm, die dann etwa parallel zur Paschen-Kurve verläuft.

Bei positiver Spitze liegen die Durchschlagspannungen des Bilds 3.2 bei kleinen Abständen zwischen 0,01 mm und 0,2 mm um bis zu 20 % höher als die Paschen-