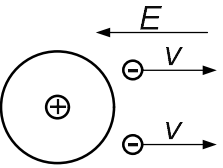
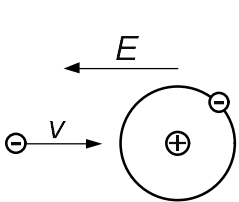
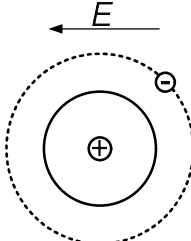
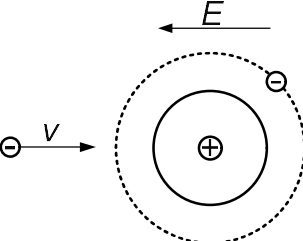
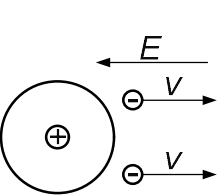
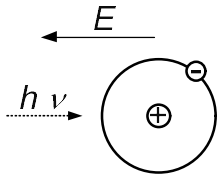
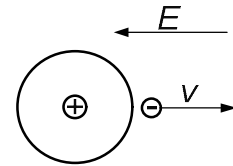
	\Rightarrow $\frac{m_e}{2} v^2 \geq W_i$	
<p>Stoßionisation $(W_i - \text{Ionisierungsenergie, } m_e/2 v^2 = W_{kin} - \text{kinetische Energie eines Elektrons})$</p>		
	\Rightarrow $W_a < \frac{m_e}{2} v^2 < W_i$	
	\Rightarrow $W_a < \frac{m_e}{2} v^2 < W_i$	
<p>Stoßionisation in Stufen $(W_a - \text{Anregungsenergie})$</p>		

Ionisationsarten - Ladungsträgervermehrung im Gas I

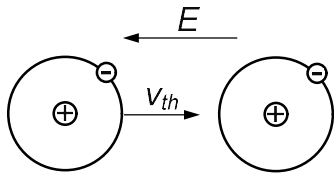


$$\Rightarrow h \cdot \nu > W_i$$

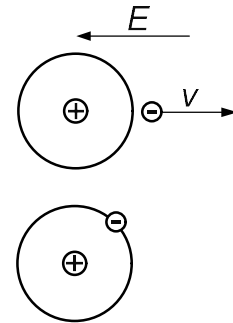


Fotoionisation

($h \nu = W_{\text{Photon}}$ - Strahlungsenergie eines Photons)



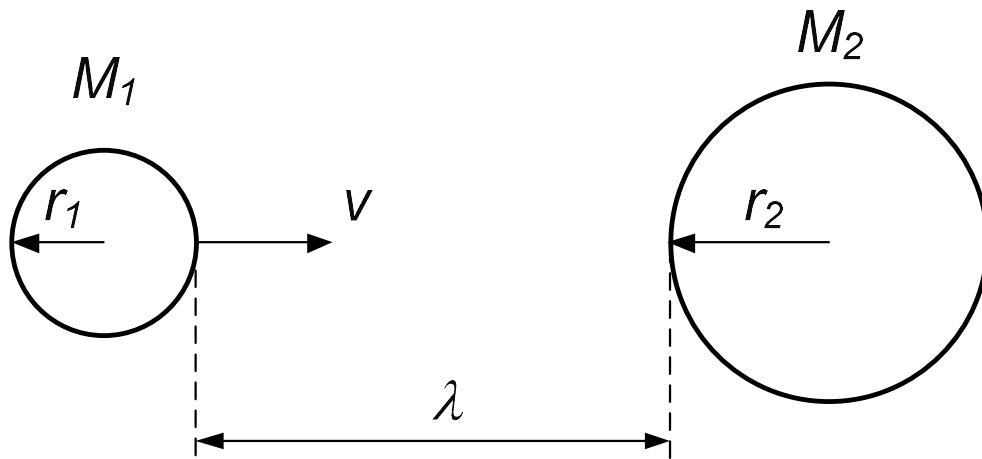
$$\Rightarrow \frac{2}{3} kT > W_i$$



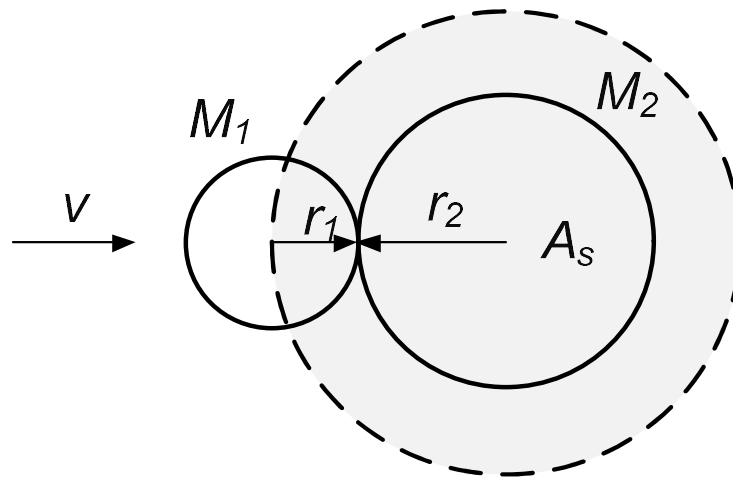
Thermoionisation

($\frac{2}{3} kT = W_{\text{th}}$ - thermische Energie eines Moleküls)

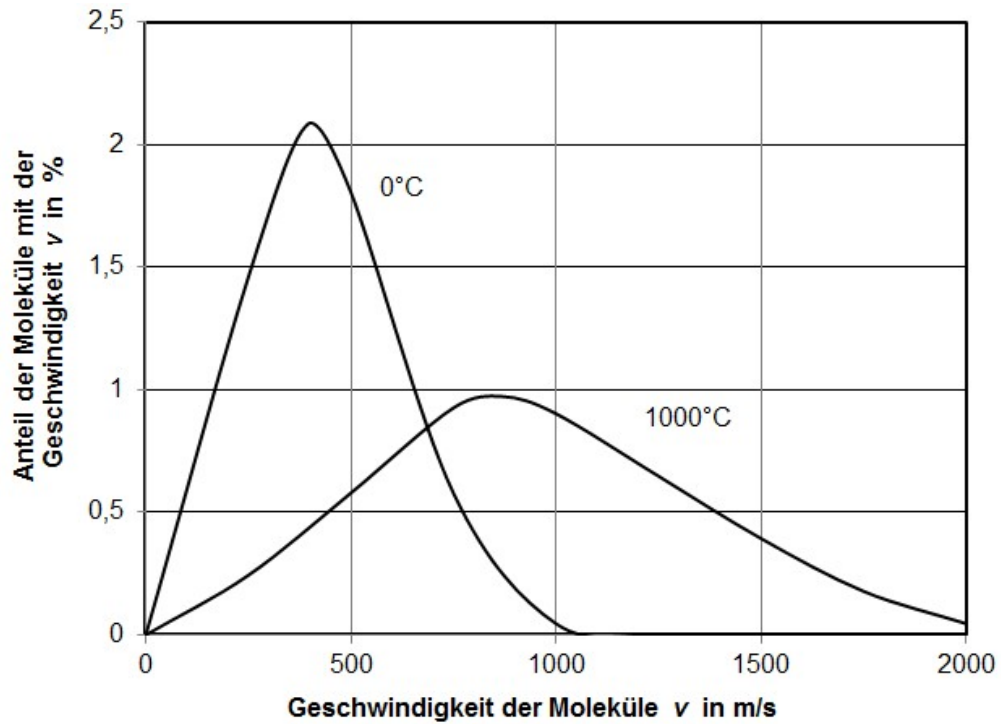
Ionisationsarten - Ladungsträgervermehrung im Gas II



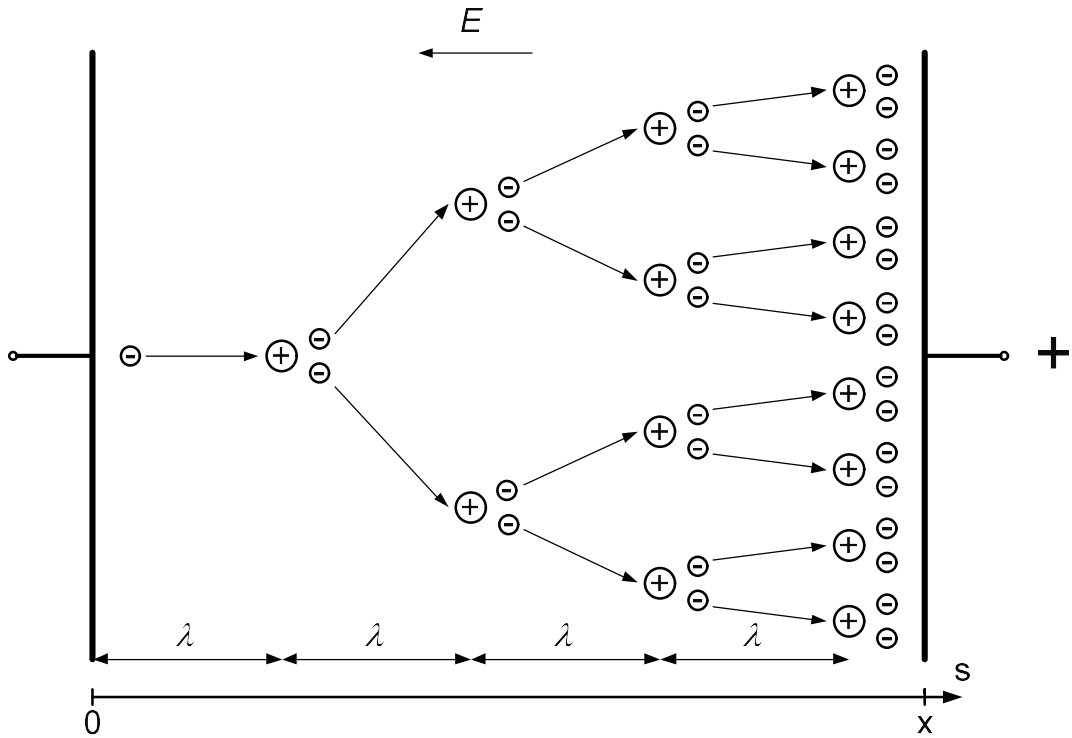
Mittlere freie Weglänge λ



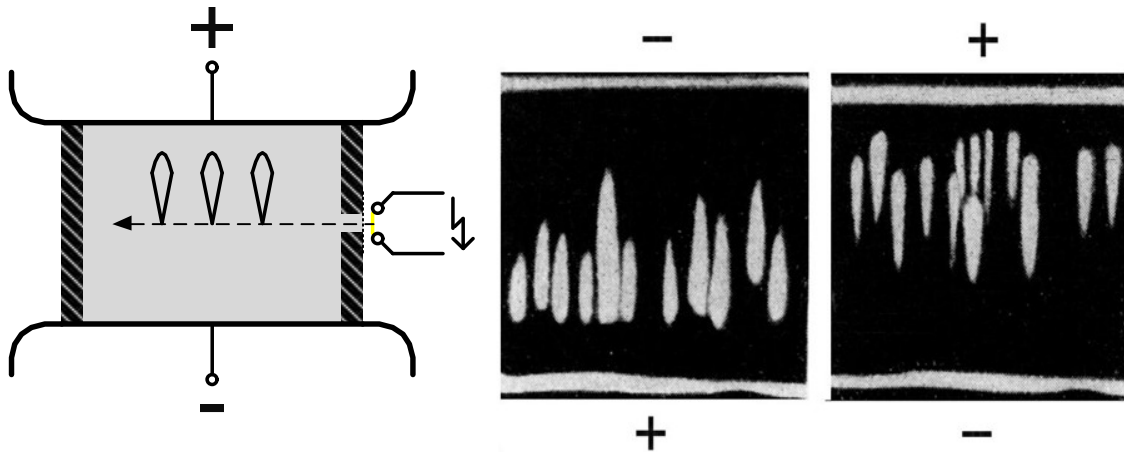
Wirkungsquerschnitt A_s



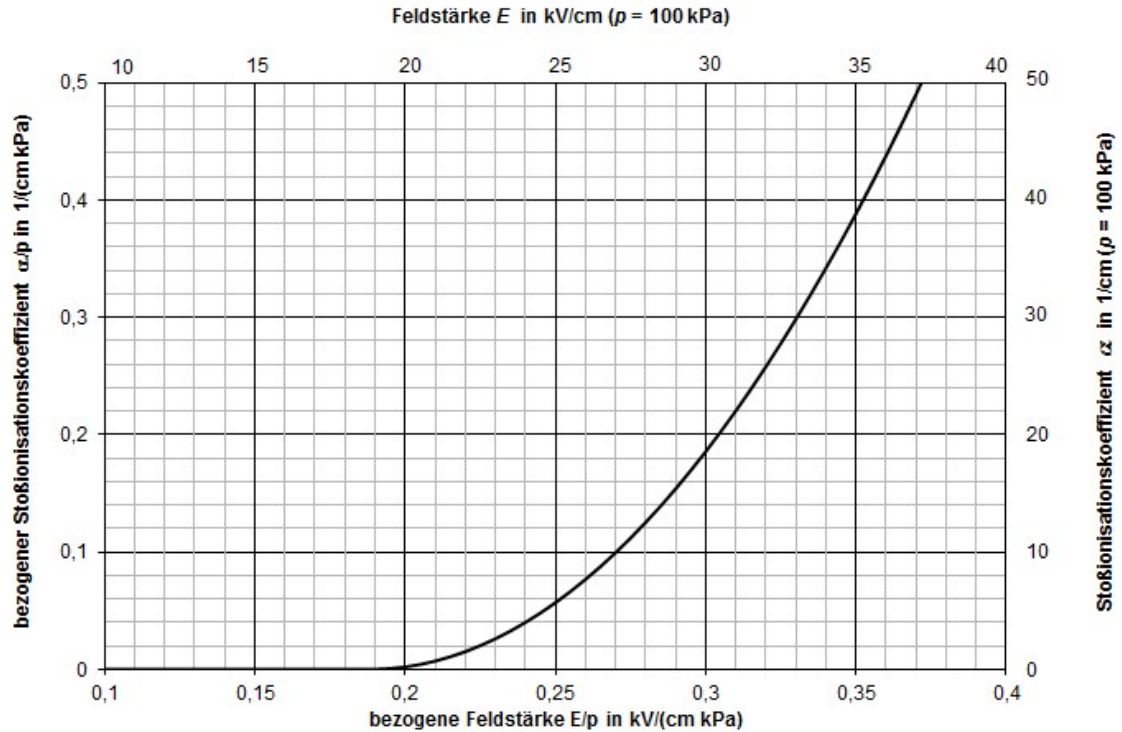
Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung für N_2



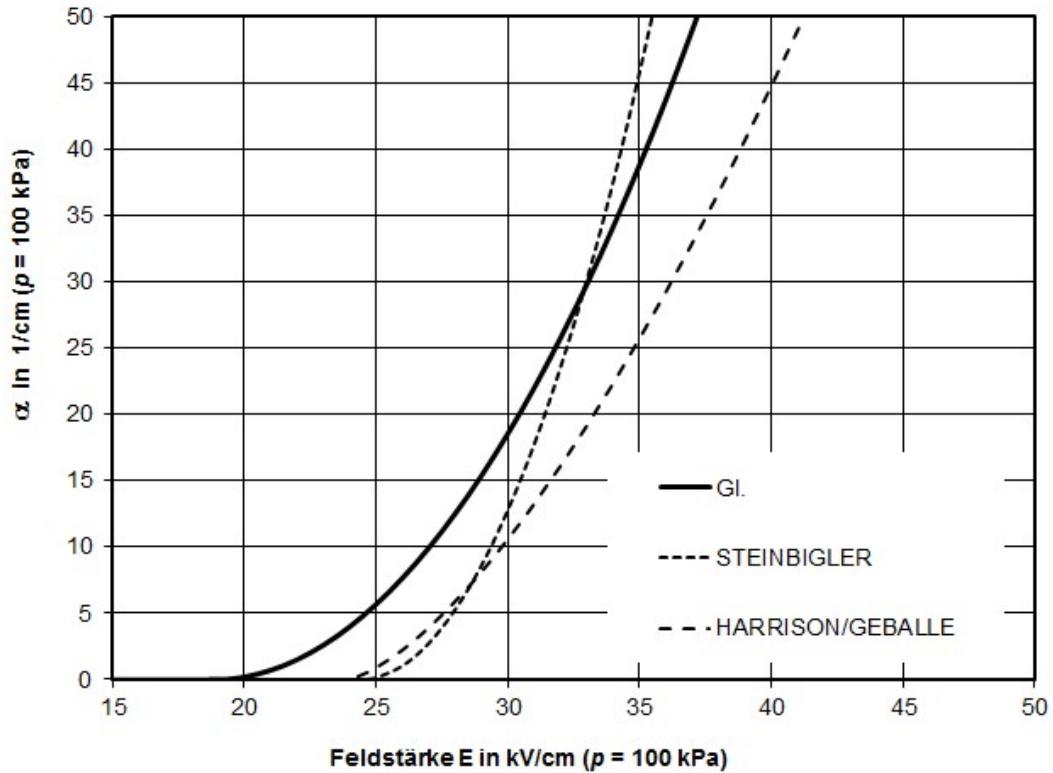
Exponentielle Vermehrung der Elektronenzahl - Elektronenlawine



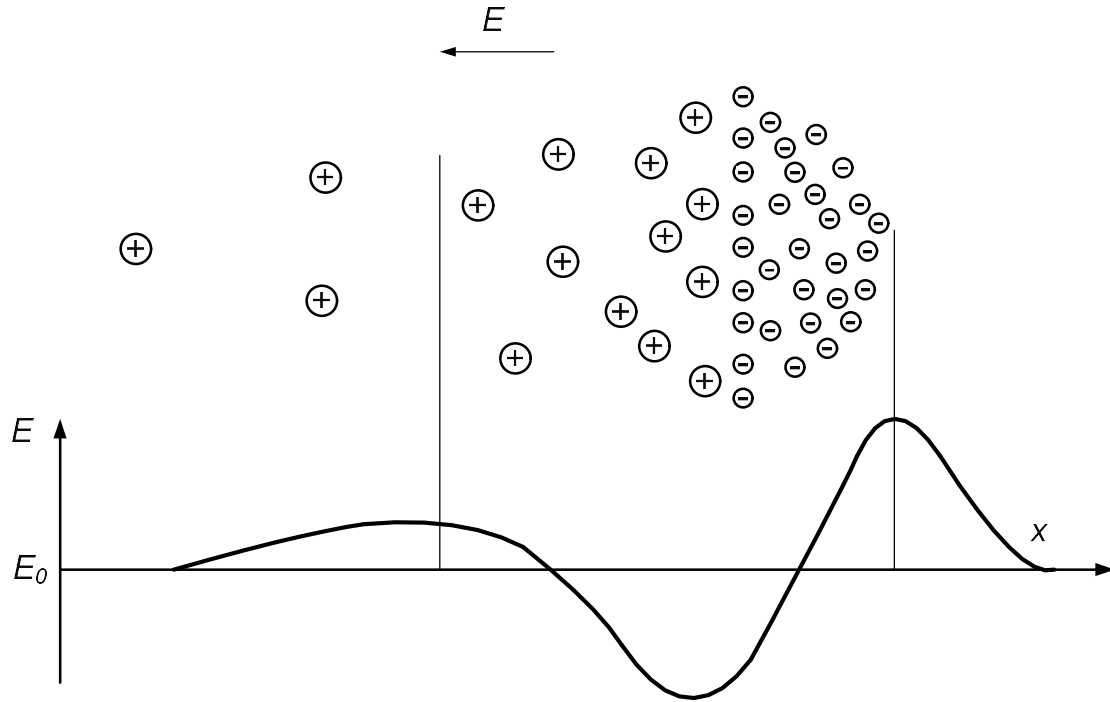
Elektronenlawinen in einer Nebelkammer




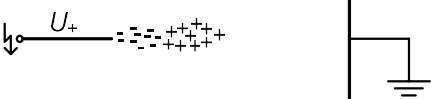
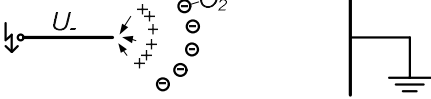
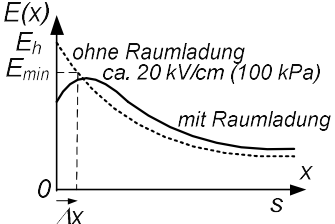
Bezogener Stoßionisationskoeffizient α/p , für Luft, abhängig von der bezogenen Feldstärke E/p , α und E für Normaldruck $p = 100$ kPa



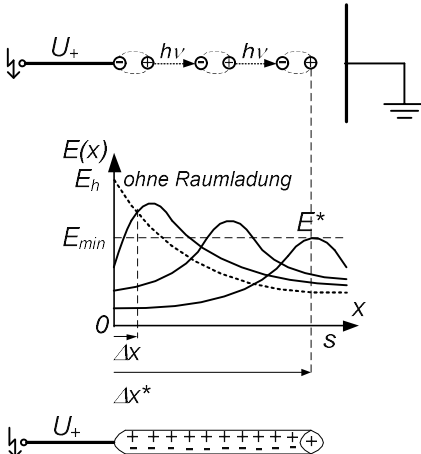
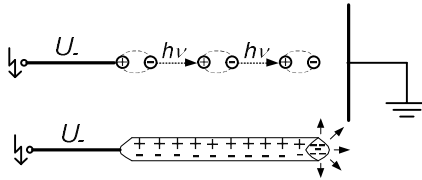
Stossionisationskoeffizien $\alpha = f(p)$ für Normaldruck $p = 100 \text{ kPa}$



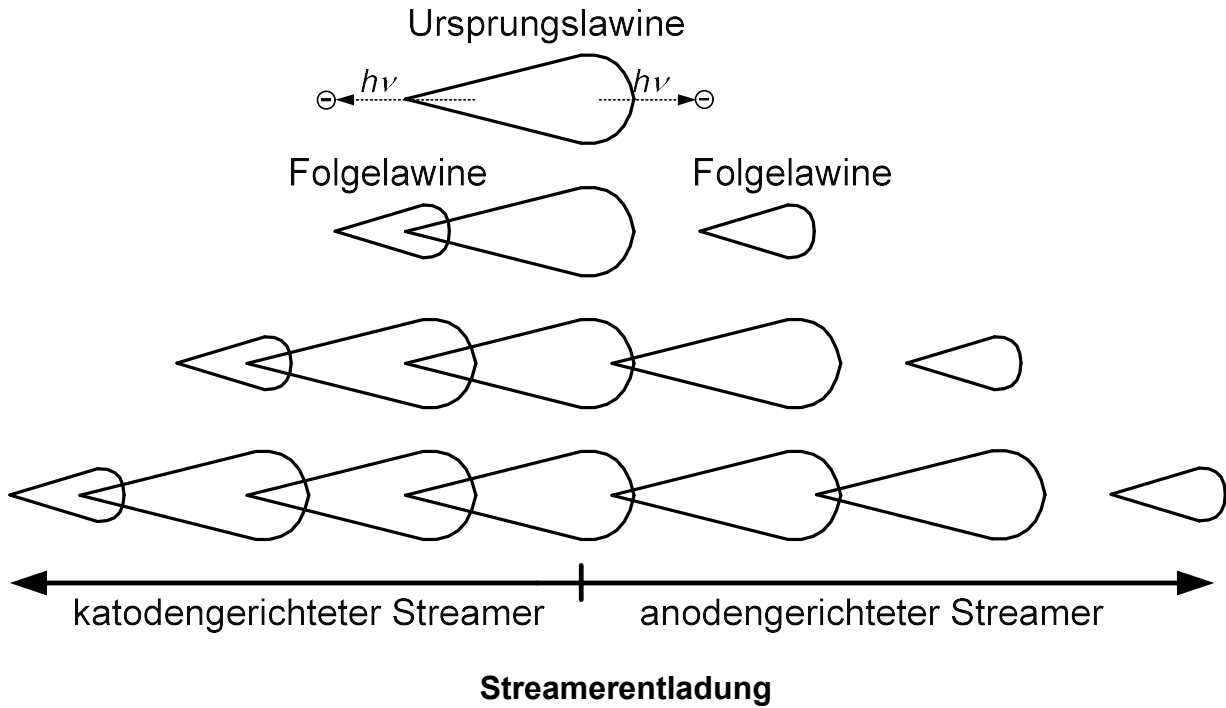
Eigenfeld einer Elektronenlawine

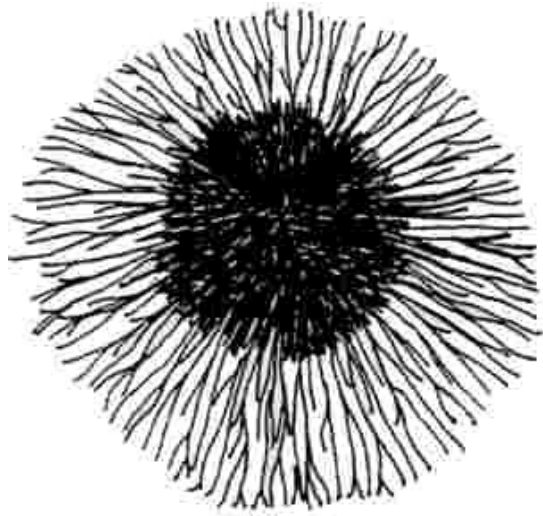
$U_e < U_+ \ll U_d$	$U_e \ll U_+ < U_d$	$U_e < U_- < U_d$
		
	<ul style="list-style-type: none"> - Häufigkeit der Lawinen nimmt mit der Spannung zu - hohe Elektronendichte vor der Spitze, dahinter hohe Dichte positiver Ionen - unregelmäßiger Gleichstrom <p>⇒ positive Dauerkorona</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Lawine über Δx in Richtung Platte - Abwandern der positiven Ionen zur Spitze - Anlagerung der Elektronen an O_2-Moleküle, Entstehung einer negativen Raumladung - negative Raumladung verändert $E(x)$ - Lawinenprozess setzt aus <p>⇒ negative Impulskorona</p> <ul style="list-style-type: none"> - Häufigkeit der Lawinen nimmt mit der Spannung zu - unregelmäßiger Gleichstrom <p>⇒ negative Dauerkorona</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Lawine über Δx in Richtung Spitze - schnelles Abwandern der Elektronen zur Spitze - positive Raumladung verändert $E(x)$ - Lawinenprozess setzt aus <p>⇒ positive Impulskorona</p>		

Lawinenentladung

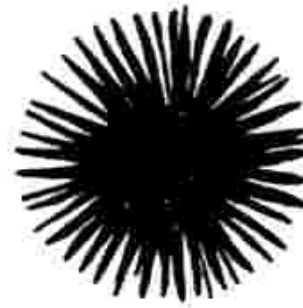
$U_e < U_+ < U_d$		$U_e < U_- < U_d$
	<ul style="list-style-type: none"> - Feldstärkeerhöhung hinter der ersten Lawine, wenn $n_+ = 10^8$ - Folgelawine durch Fotoionisation - Feldstärkeerhöhung hinter der Folgelawine, wenn $n_+ = 10^8$ - ... usw. - quasineutraler Ladungsträgerschlauch mit positiver Raumladungskugel am Kopf wächst in Richtung Platte - Entladung stoppt, wenn $E^* < E_{min} \Rightarrow \Delta x = \Delta x^*$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $e_{S+} = 5 \text{ kV / cm}$ </div>	 <ul style="list-style-type: none"> - Feldstärkeerhöhung hinter der ersten Lawine, wenn $n_- = 10^8$ - Folgelawine durch Fotoionisation - Feldstärkeerhöhung hinter der Folgelawine, wenn $n_- = 10^8$ - ... usw. - quasineutraler Ladungsträgerschlauch mit negativer Raumladungskugel am Kopf wächst vor - negative Raumladungskugel divergiert stark wegen der hohen Elektronenbeweglichkeit <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $e_{S-} = 10 - 15 \text{ kV / cm}$ </div>

Streamerentladung



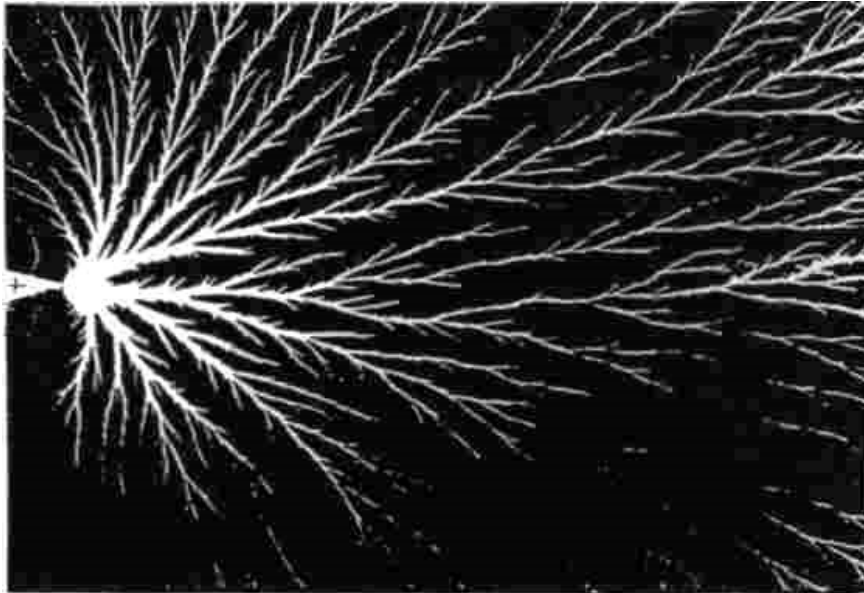


+

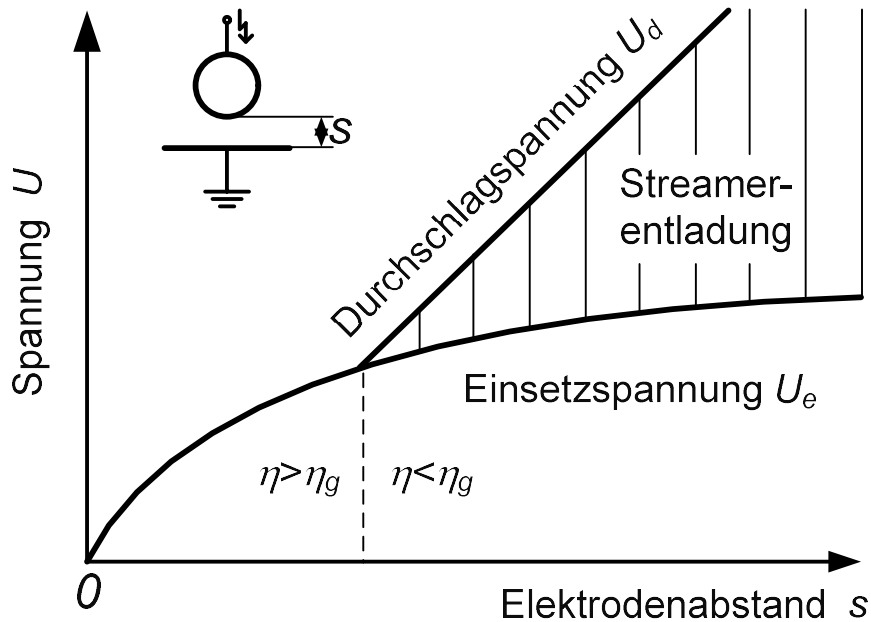


-

Fotogramme positiver und negativer Streamerentladungen



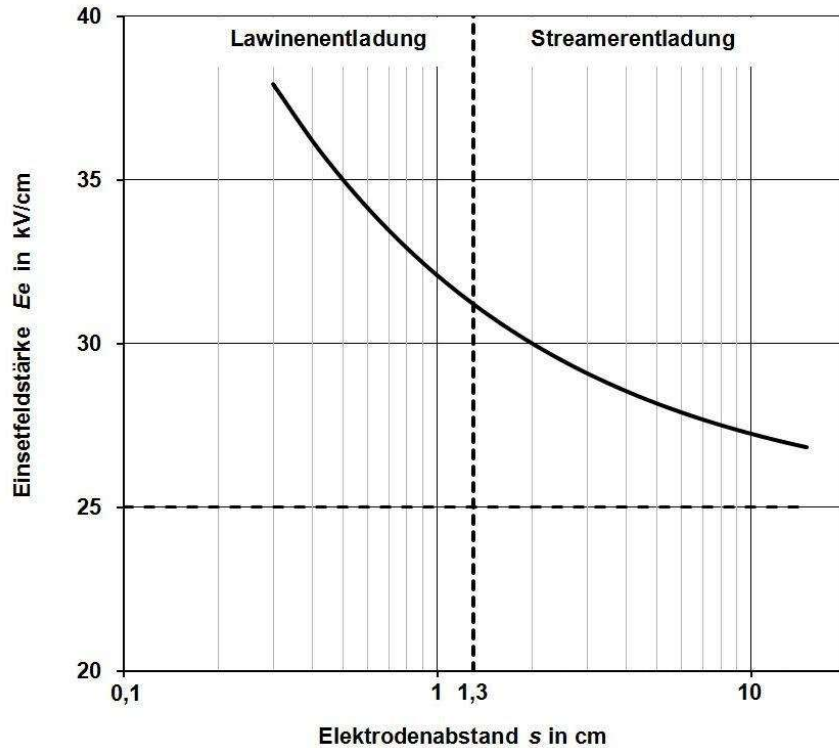
Fotogramm einer positiven Streamerentladung



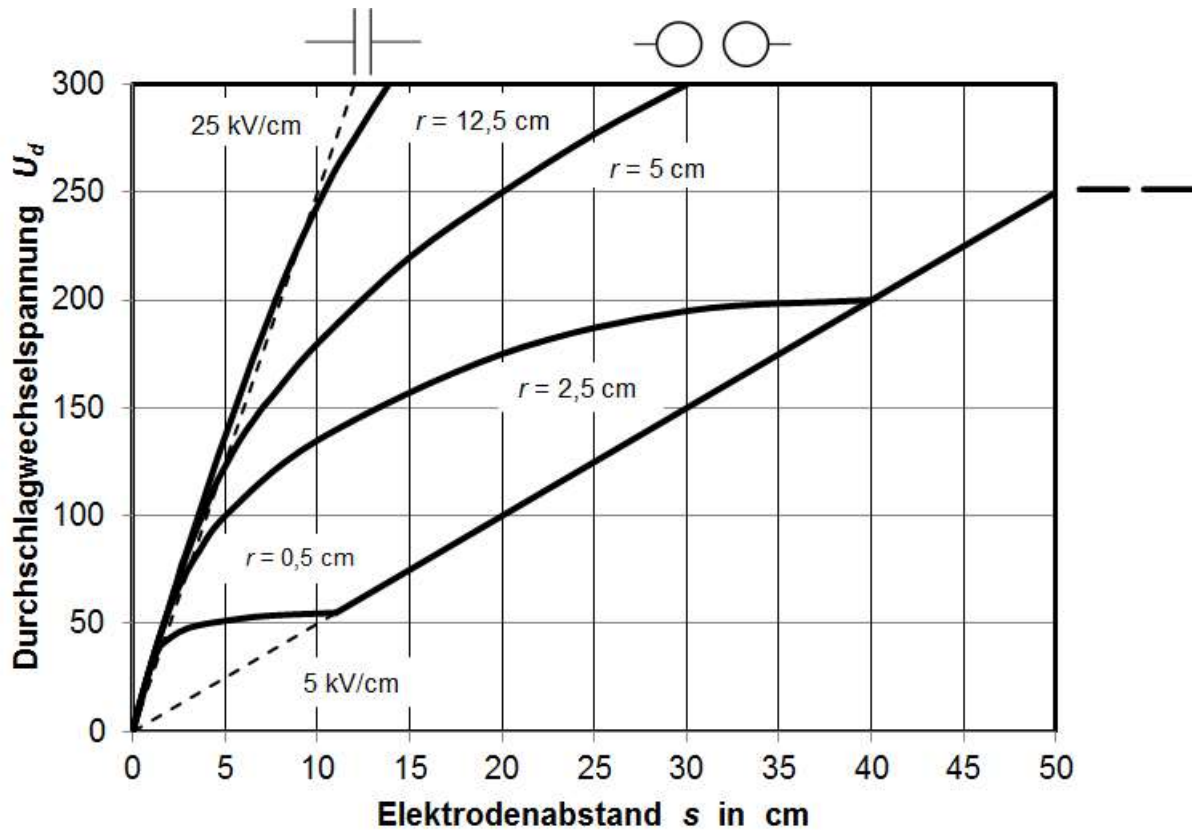
Bereich kleiner Elektrodenabstände $\eta > \eta_g$: $U_d = U_e \approx E_e \cdot \eta \cdot s$

Bereich großer Elektrodenabstände $\eta < \eta_g$: $U_d > U_e \approx E_e \cdot \eta \cdot s$; $U_d \neq f(\eta)$

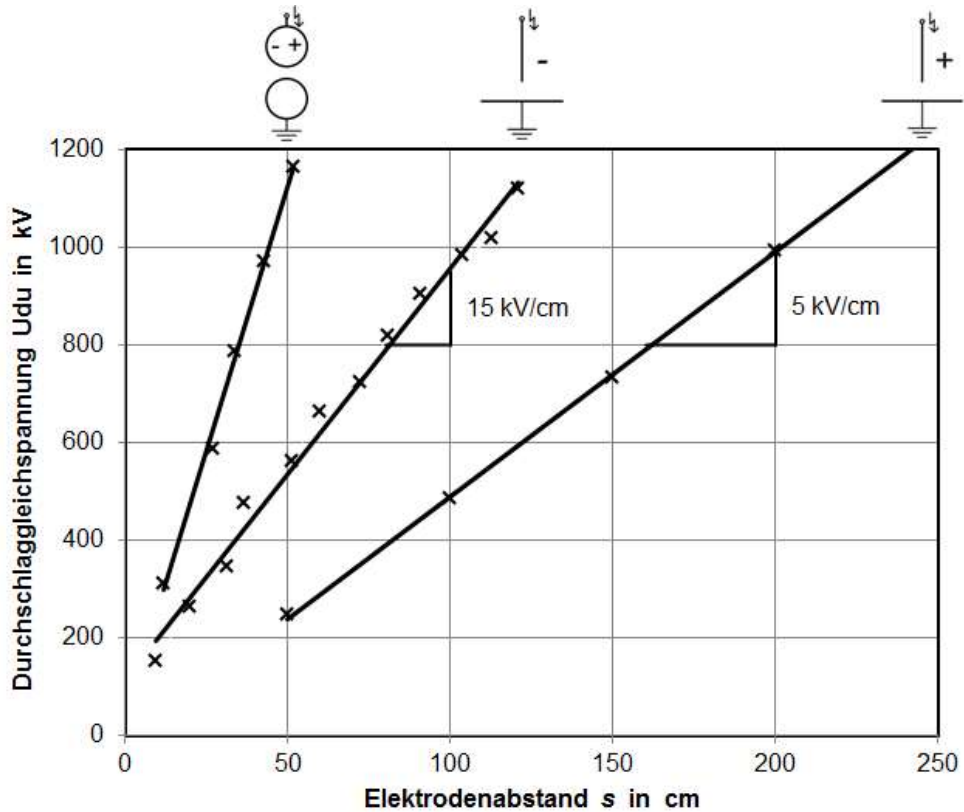
Übergang vom schwach inhomogenen zum stark inhomogenen Feld



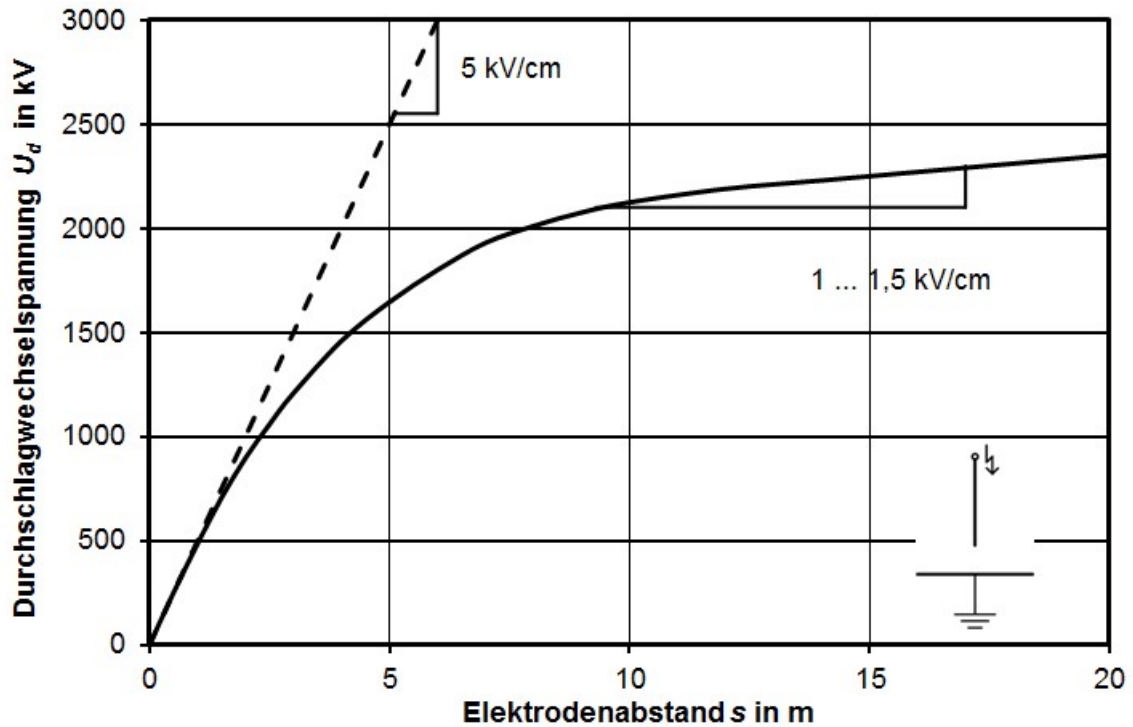
Einsetzfeldstärke E_e für das homogene Feld und innere elektrische Festigkeit E_i für atmosphärische Luft



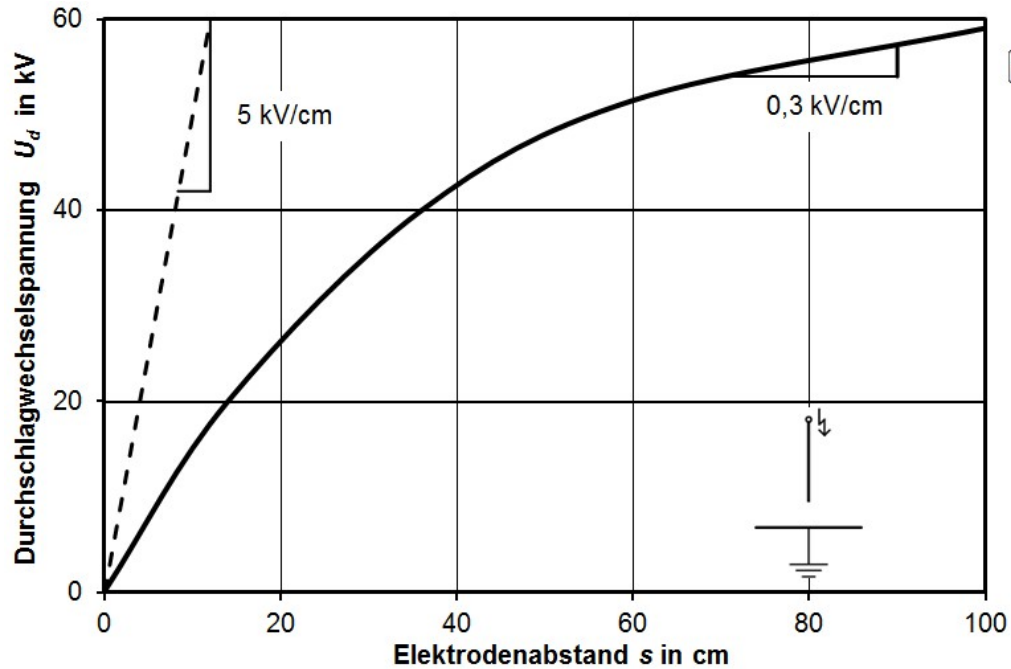
Durchschlagwechselfspannung der Kugel-Kugel-Anordnung in Luft



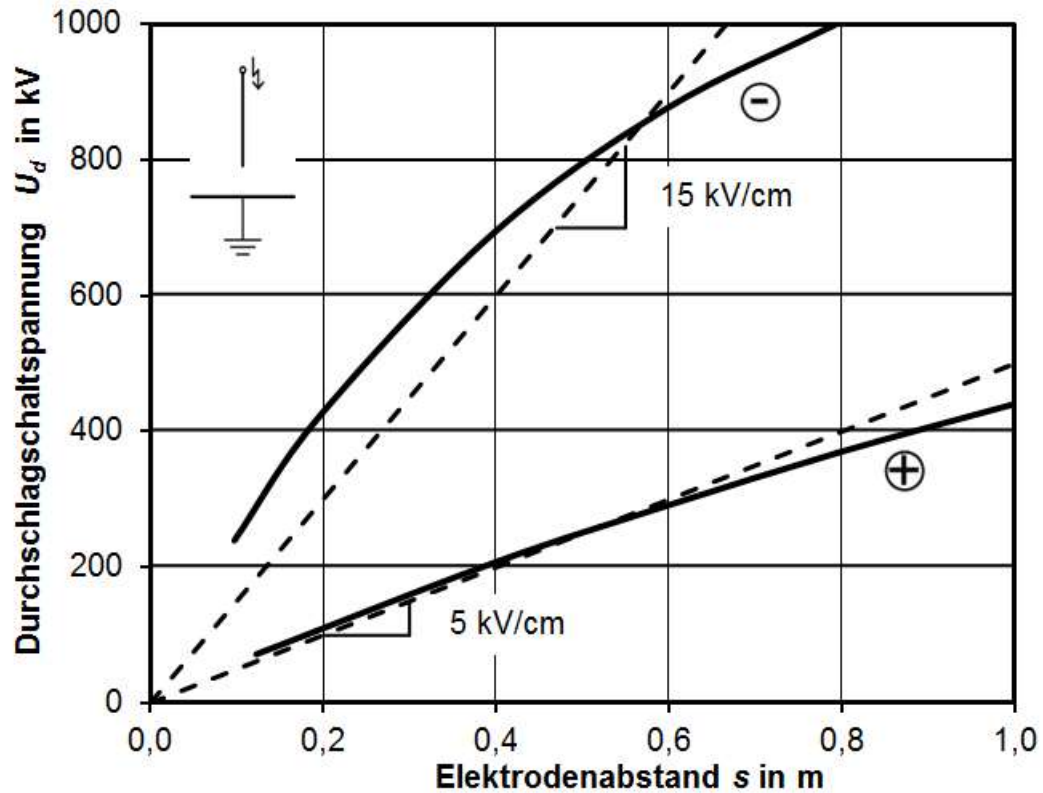
Durchschlaggleichspannung von Kugel-Kugel- und Spitze-Platte-Anordnungen in Luft



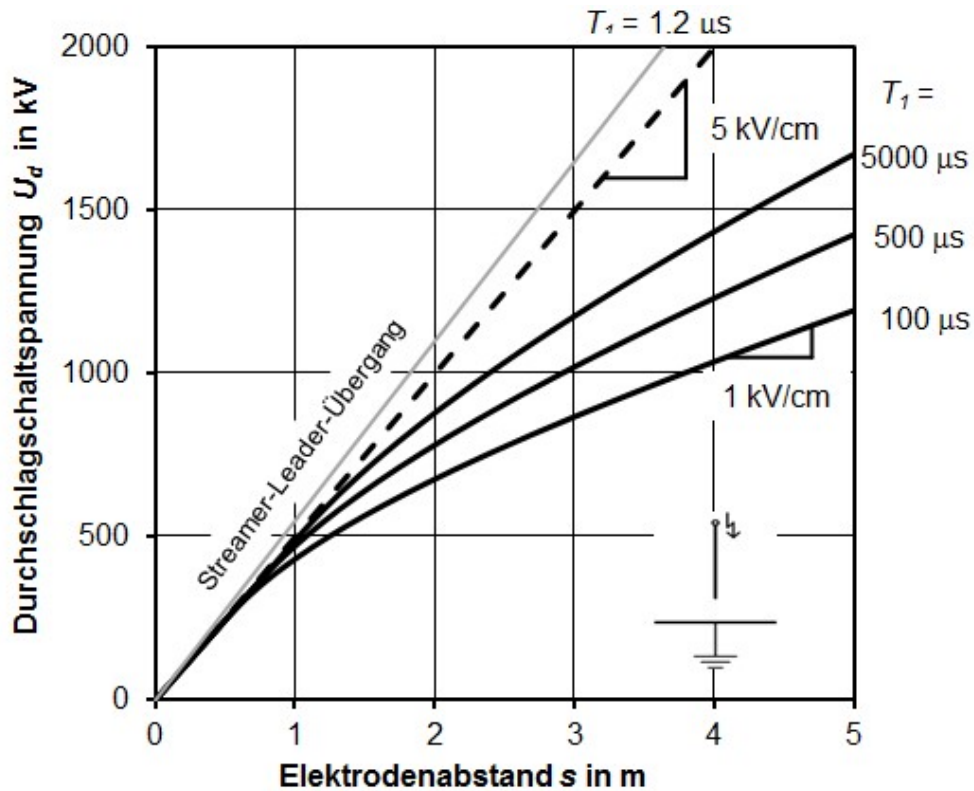
Durchschlagwechselfspannung der Spitze-Platte-Anordnung in Luft



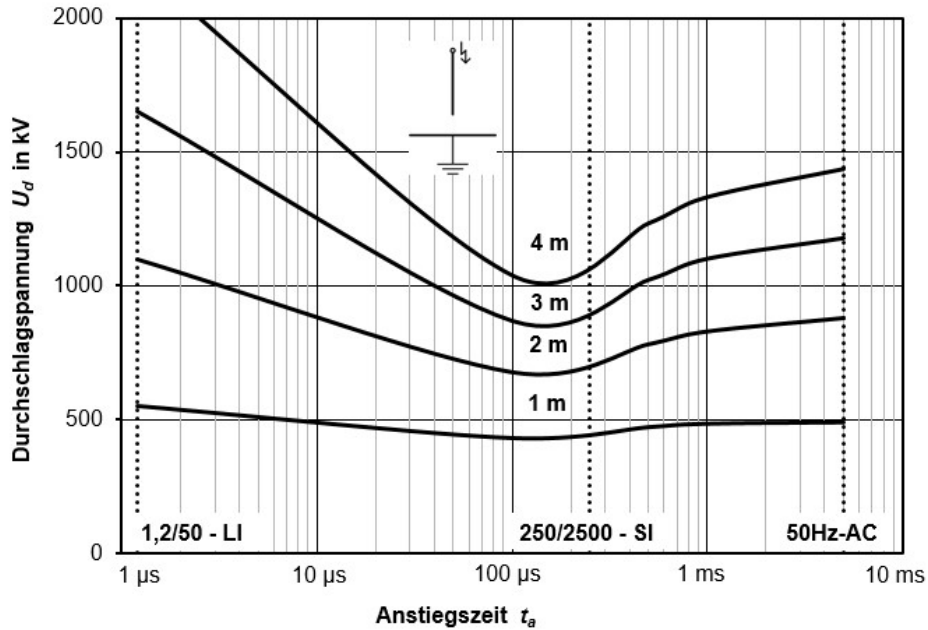
Durchschlagspannung der Spitze-Platte-Anordnungen in Luft bei hochfrequenter Wechselfspannung (360 kHz) in Luft



Durchschlagschaltspannung der Spitze-Platte-Anordnung in Luft



Durchschlagschaltspannung bei verschiedenen Scheitel- bzw. Stirnzeiten



Blitzspannung



Streamer

Schaltspannung



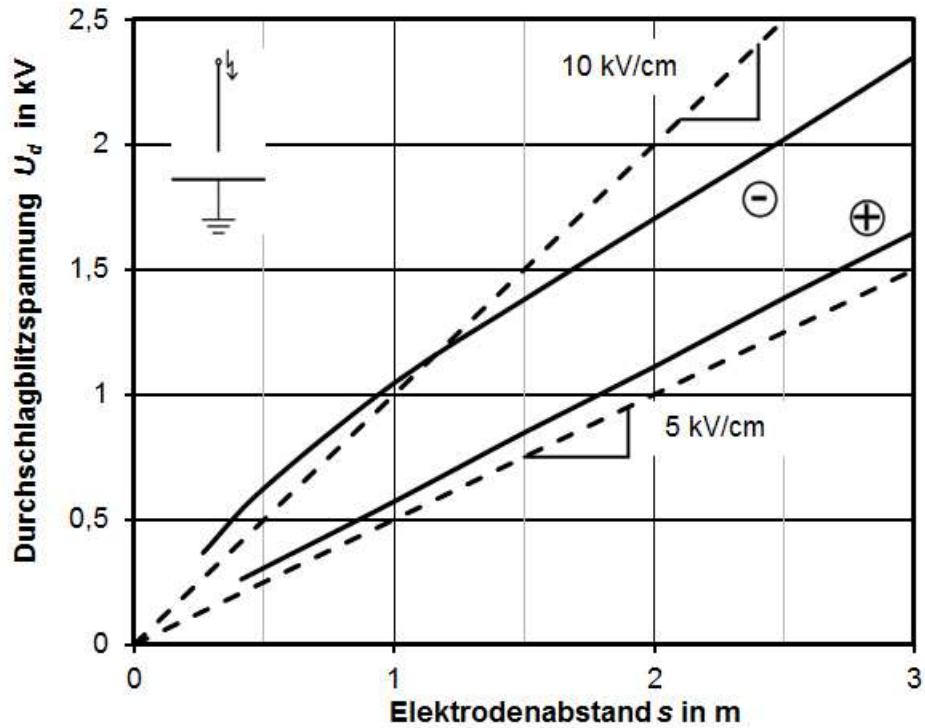
Leader (intensiv)

50-Hz-Wechselspg.



Leader

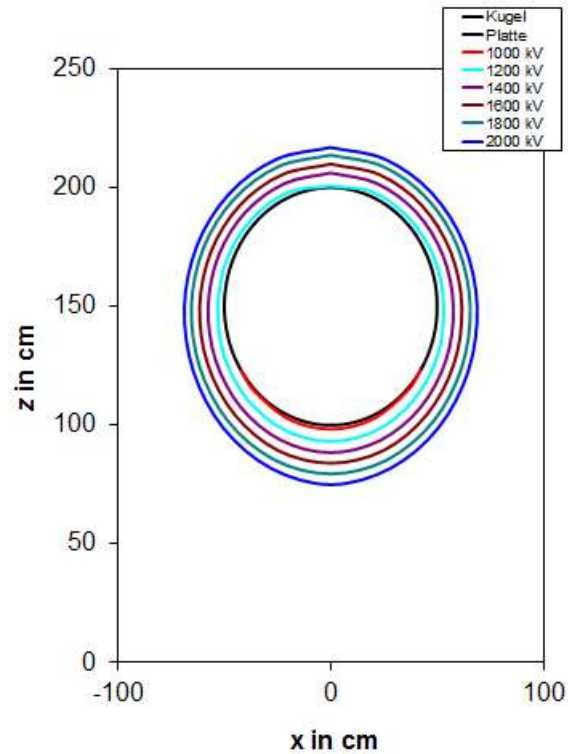
Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Scheitel- bzw. Stirnzeit



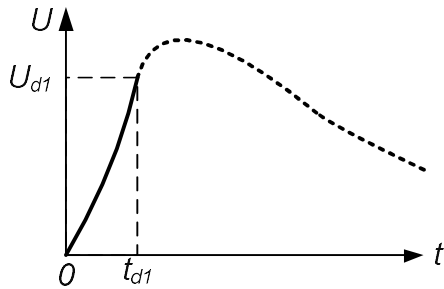
Durchschlagblitzspannung der Spitze-Platte-Anordnung in Luft

Kugel gegen Platte

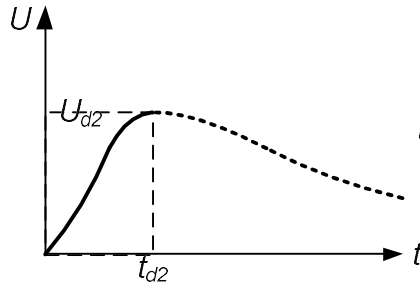
($d = 100$ cm, $s = 100$ cm, $E_B > 25$ kV/cm)



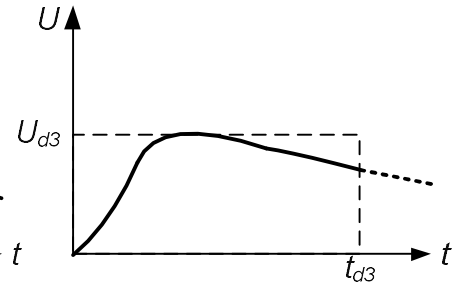
Hochbeanspruchtes Volumen einer Kugel gegen Platte Anordnung



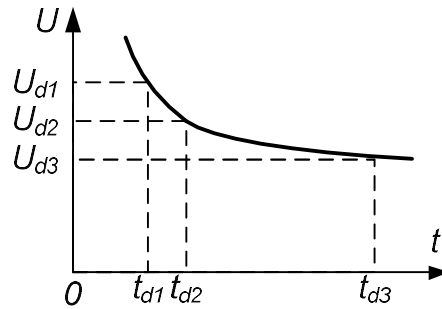
Stirndurchschlag



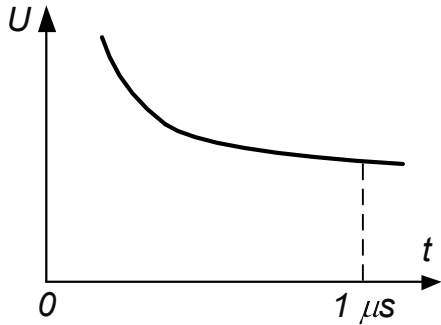
Scheiteldurchschlag



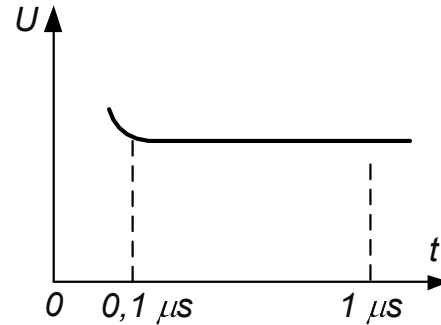
Rückendurchschlag



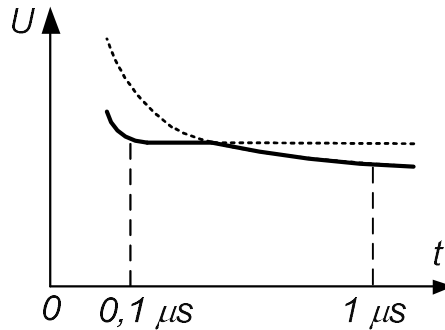
Ermittlung von Stoßkennlinien



stark inhomogene Anordnung

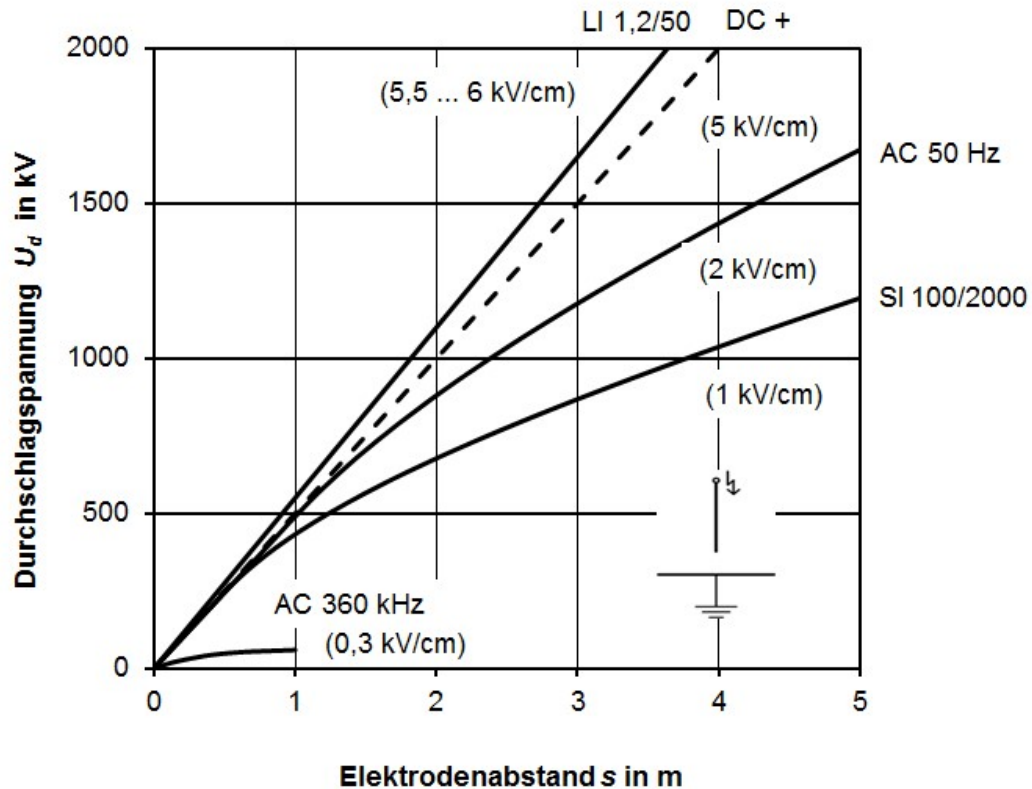


schwach inhomogene Anordnung



resultierende Stoßkennlinie

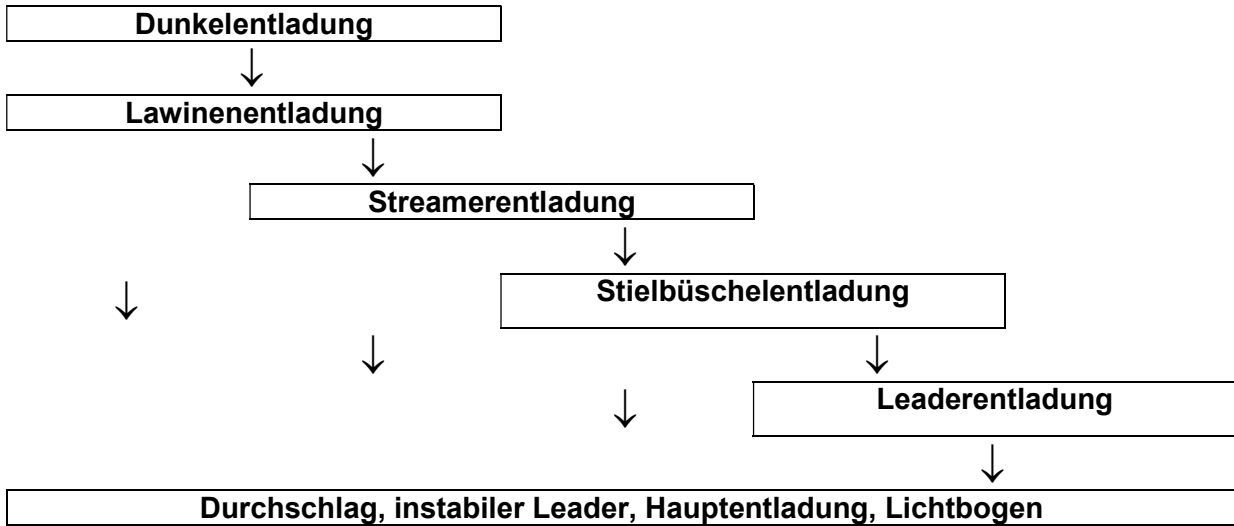
Charakteristische Stoßkennlinien und deren Scherung



**Durchschlagsspannung von Spitze-Platte-Anordnungen
bei verschiedenen Spannungsarten**

Bezeichnung	Lawinenentladung		Streamerentladung		Leaderentladung	
Polarität	+	-	+	-	+	-
typische Ionisat.-art	Stoßionisation		Stoß- und Fotoionisation		Stoß-, Foto- und Thermoionisation	
Spannungsbedarf	20 kV/cm		5 kV/cm	10 ... 15 kV/cm	1 ... 1,5 kV/cm	
Spg.-art	DC, AC		DC, AC, SI, LI		AC, SI	
weitere Bezeichnungen	Glimmentladung					
	- pos. Impulskorona - pos. Dauerkorona	- neg. Impulskorona - Trichelimpulse - neg. Dauerkorona	- Büschelentladung - Impulskorona - Stielbüschel-		- Vorfunken - Leaderkorona - Gleitfunken	
optischer Eindruck	schwaches, blaues Leuchten an der Spitze		violett, diffus Karminrot am Stielbüschel		weiß-bläuliche Kanäle	
Charakterisierung	stabile Entladungen an der Spitze-Platte-Anordnung (selbständige Entladungen)					

Systematisierung von Entladungen



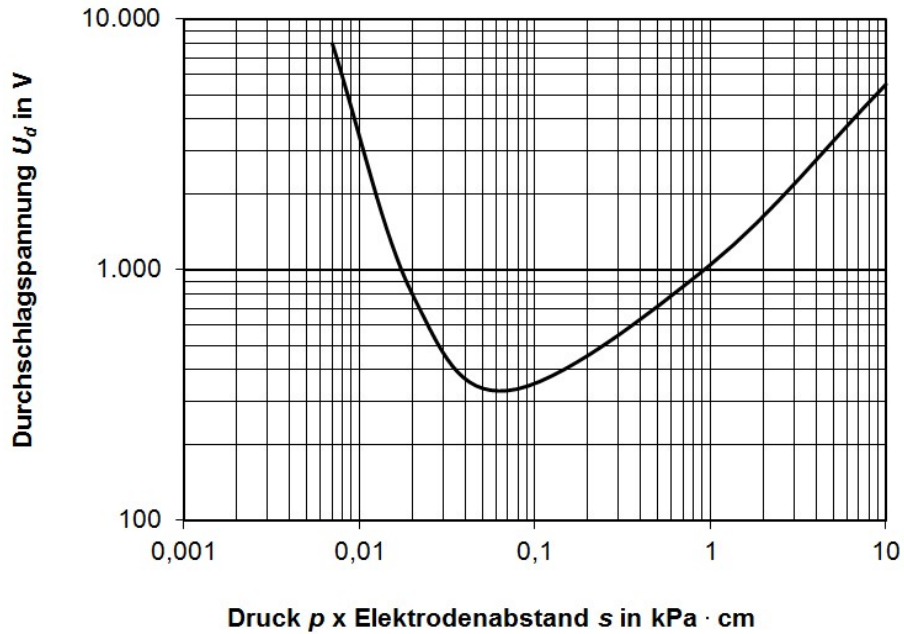
Entladungsentwicklung



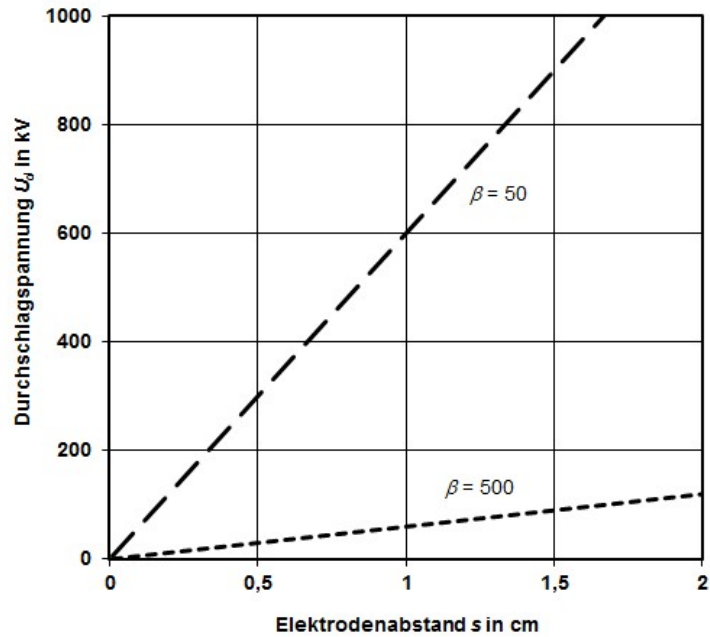
Ultraschall-Richtmikrofon



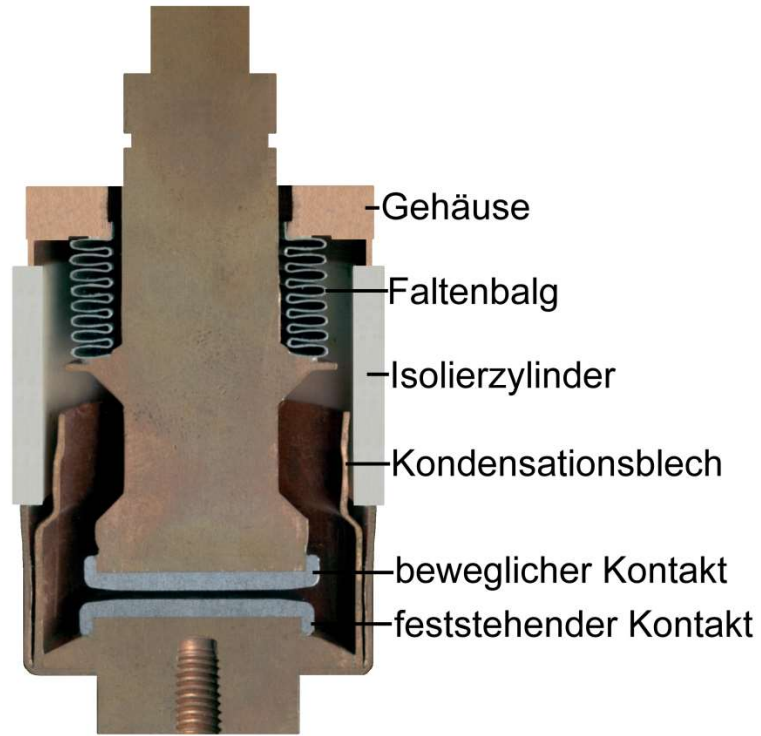
LEMKE-Sonde



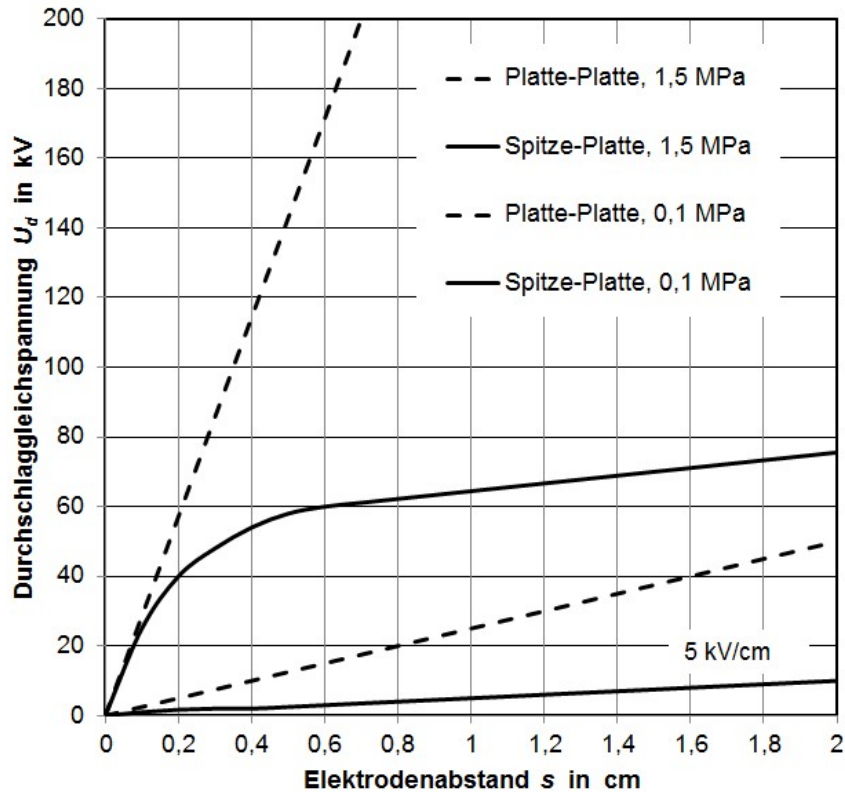
**PASCHEN-Kurve - Durchschlagsspannung im homogenen Feld
in Abhängigkeit vom Luftdruck und Elektrodenabstand**



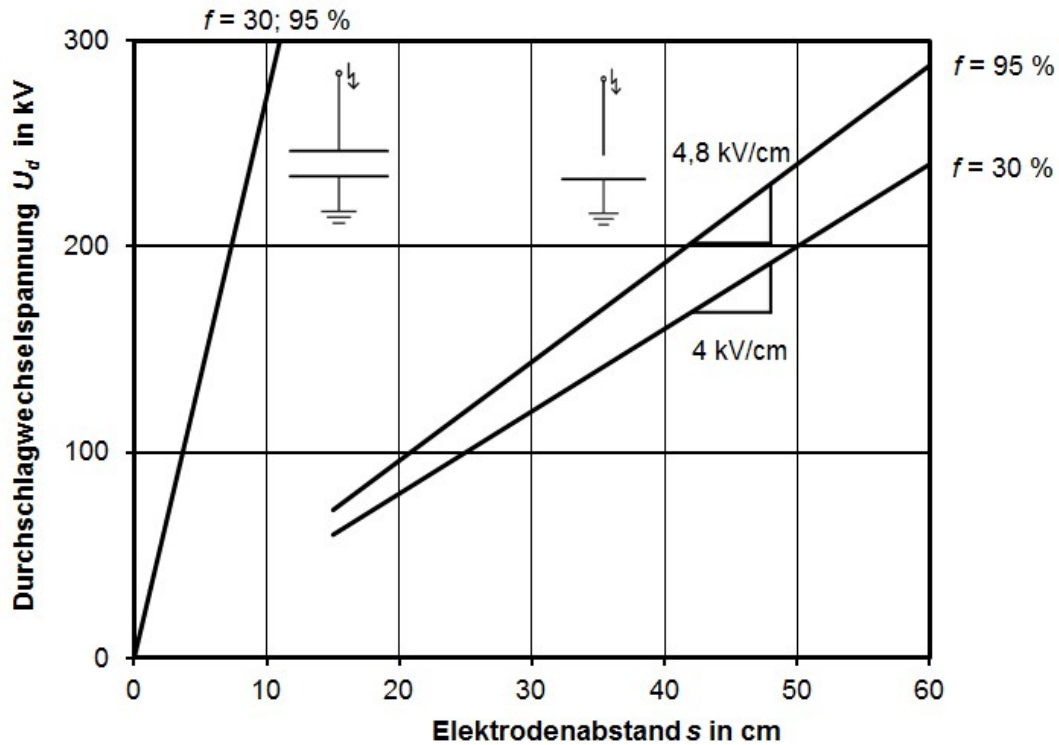
Durchschlagspannung des homogenen Feldes unter Vakuum



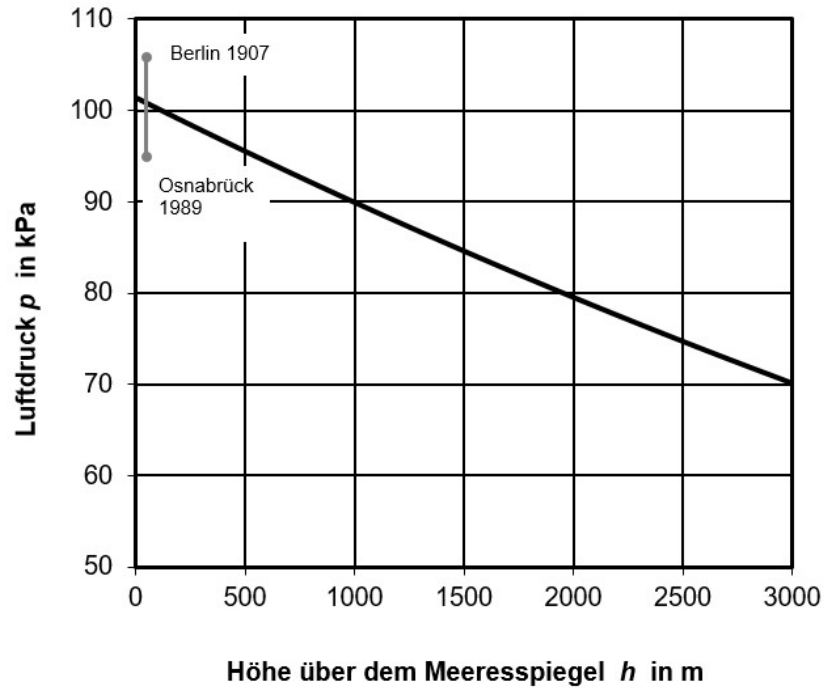
Vakuumschalter (NS)



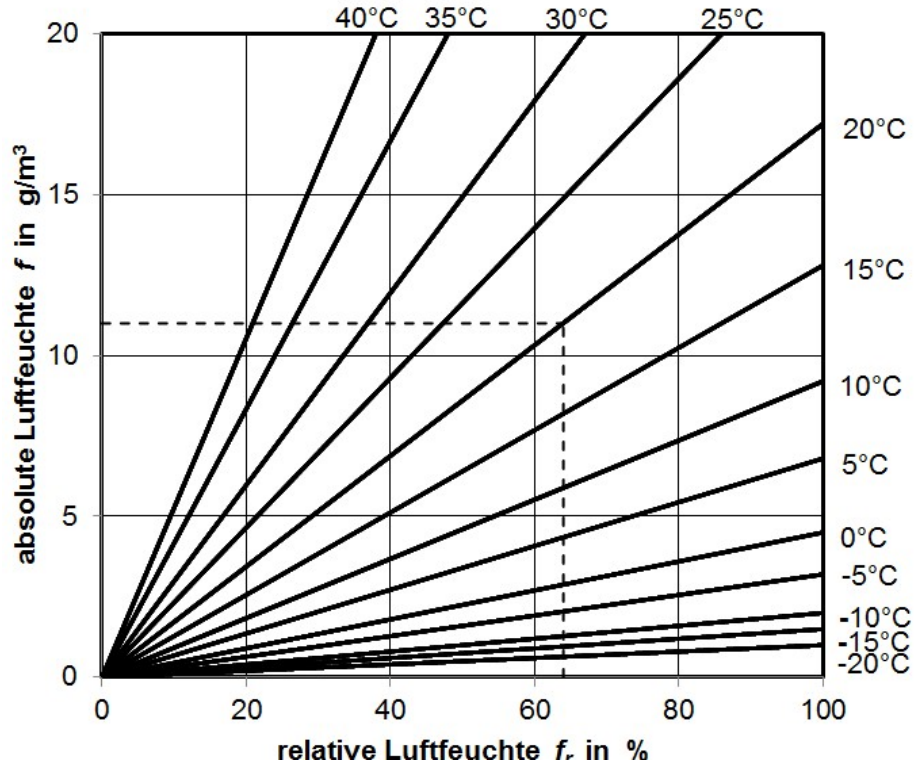
Durchschlaggleichspannung im homogenen und im inhomogenen Feld in Abhängigkeit vom Luftdruck und Elektrodenabstand



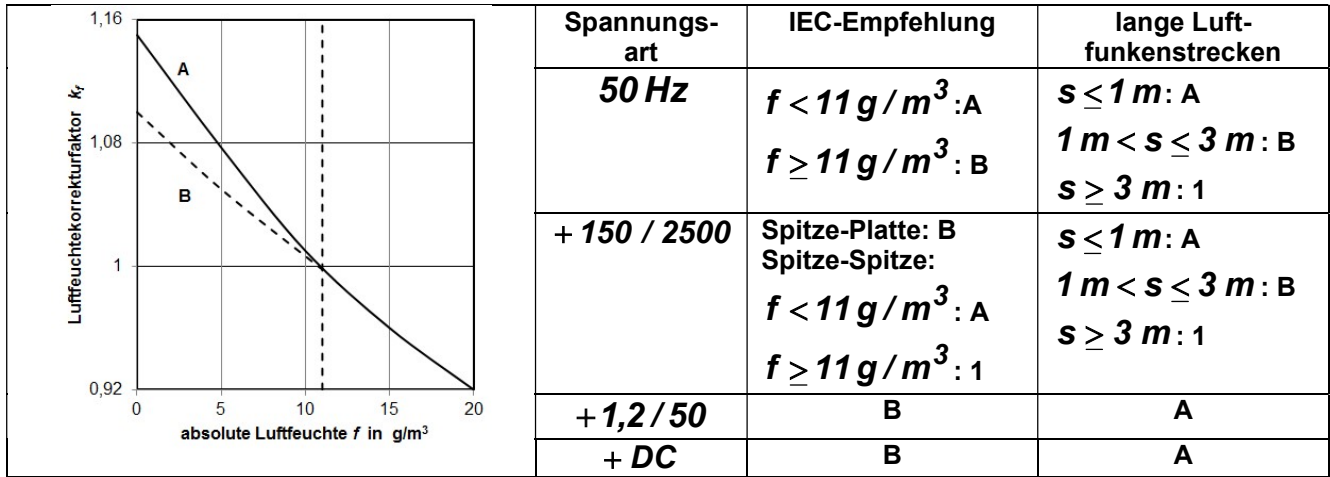
Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Durchschlagspannung im homogenen und im inhomogenen Feld



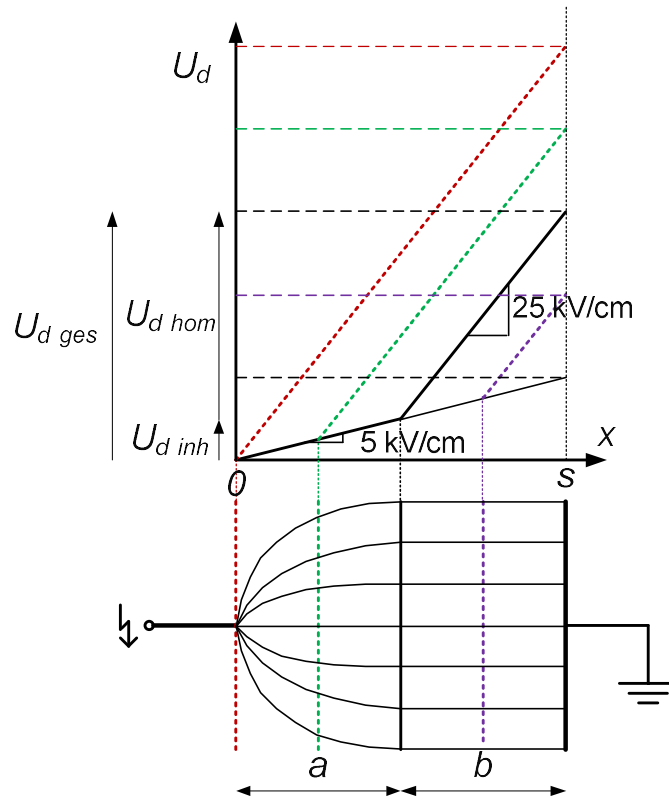
Barometrische Höhenformel



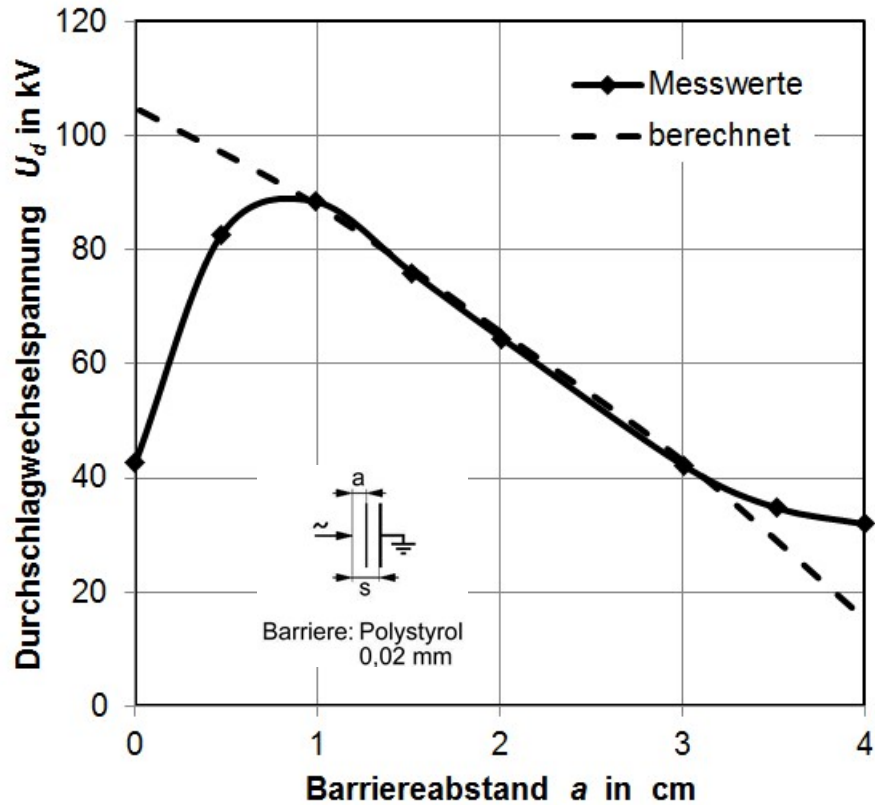
Umrechnung relativer in absolute Luftfeuchte



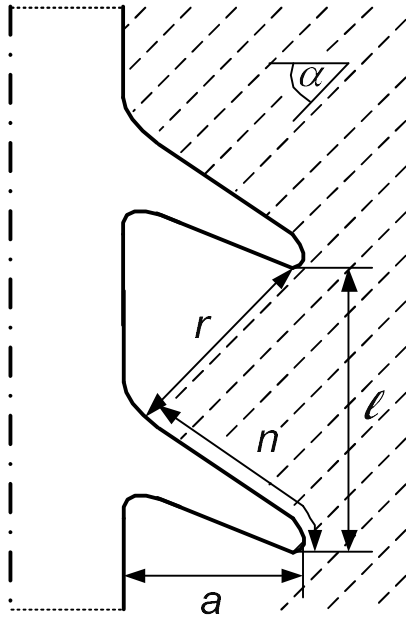
Luftfeuchtekorrekturfaktor



Potentialverteilung und Feldstärkelinien bei einer Barriereanordnung



Durchschlagspannung abhängig vom der Stellung der Barriere



α - Einfallswinkel des Regens

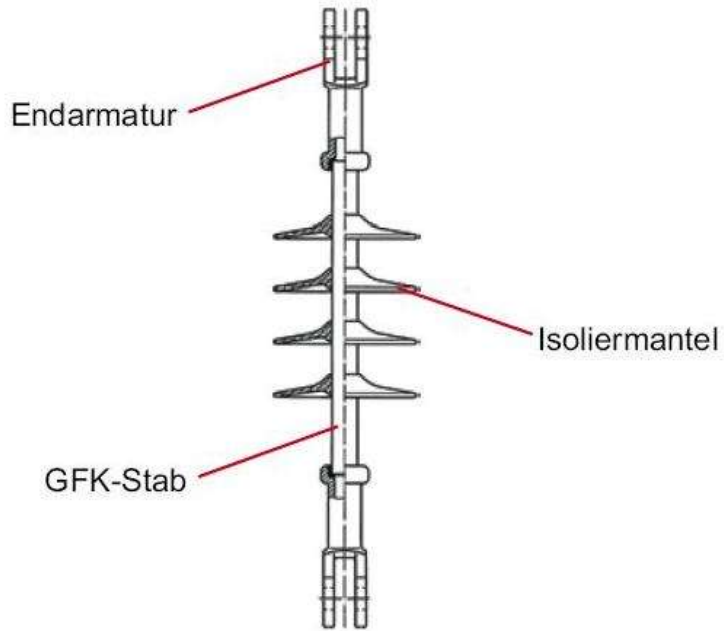
a - Schirmausladung

l - Schirmabstand

r - berechnete Luftstrecke

n - Naßstrecke

Isolator mit Schirmen bei Beregnung

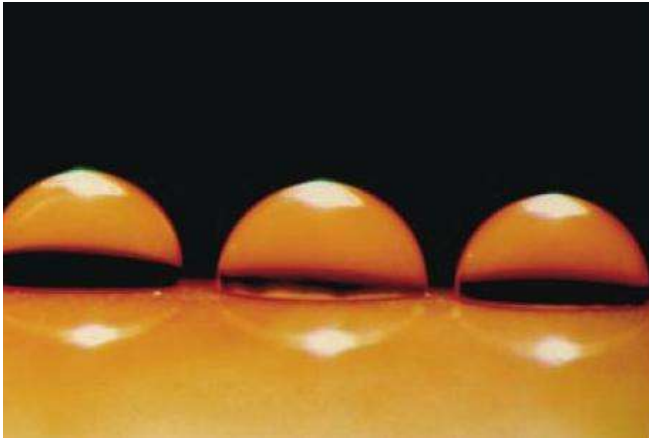


Aufbau

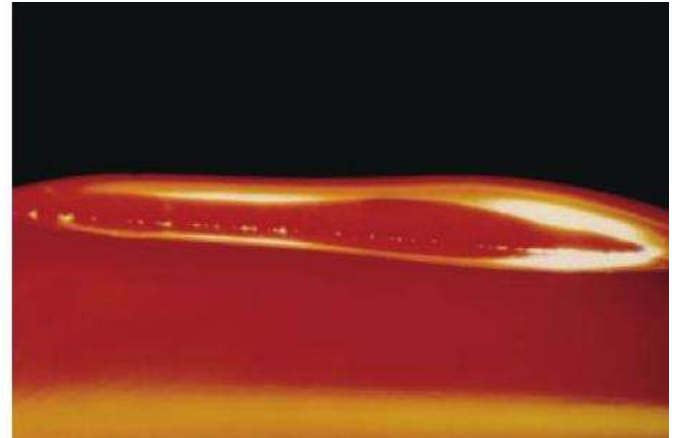


**Hydrophobie an den
Silikonschirmen**

Verbundisolator

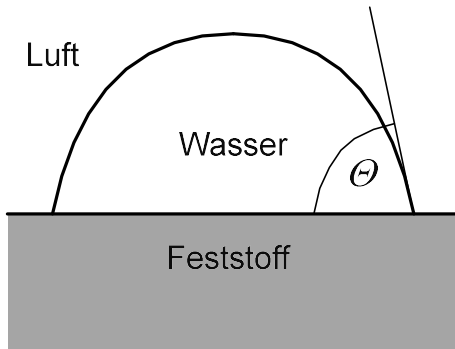


Hydrophobie

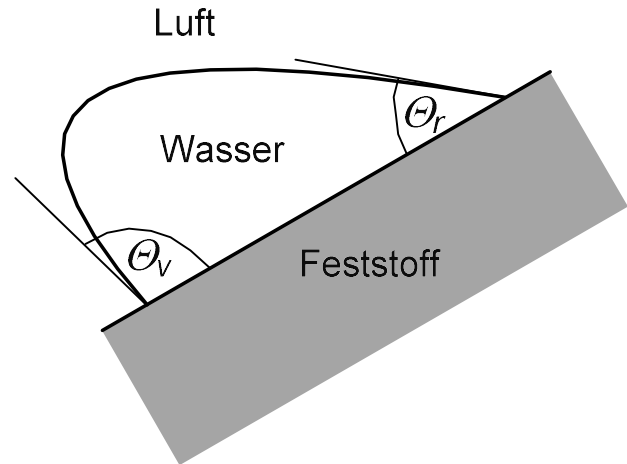


Hydrophilie

Hydrophobie und Hydrophilie an Isolierstoffoberflächen

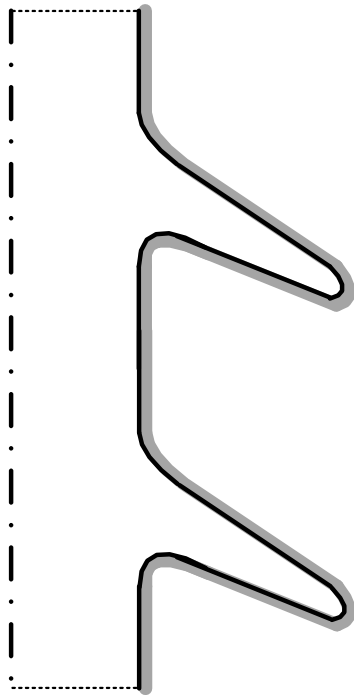


Gleichgewichts-
Tropfenrandwinkel θ



Vorrückwinkel θ_v ,
Rückzugswinkel θ_r

Tropfenrandwinkel

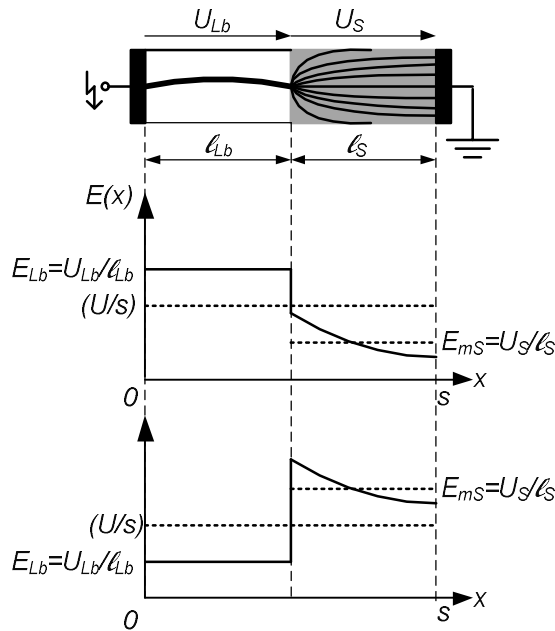


**Kriechweg,
Vollbelag,
Fremdschicht**

Isolator mit Schirmen und Fremdschicht

Isolator mit:	Vollbelag 1	Trockenzone 2	Vorlichtbogen 3	Fußpunkt- wanderung 4
Erscheinung				
Ersatzschalt- bild				
Spannungs- verteilung				
Feldstärke- verteilung				

Entwicklung eines Kriechüberschlages



1. Der Vorlichtbogen wächst nicht vor, wenn sein bezogener Spannungsbedarf E_{Lb} (Spannungsabfall über dem Vorlichtbogen U_{Lb} bezogen auf seine Länge l_{Lb}) größer ist als die mittlere Feldstärke im Restbelag $E_{ms} = U_s / l_s$ (Spannungsabfall U_s bezogen auf die Länge des Restbelages l_s), d.h.

$$E_{Lb} > E_{ms}$$

Durch den fließenden Strom trocknet die Schicht bei weiterer Erhöhung des Widerstandes ab, und der Vorlichtbogen verlöscht.

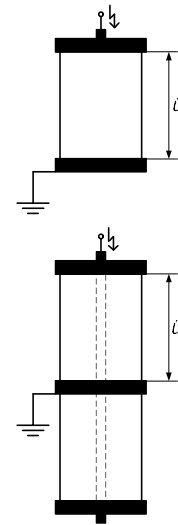
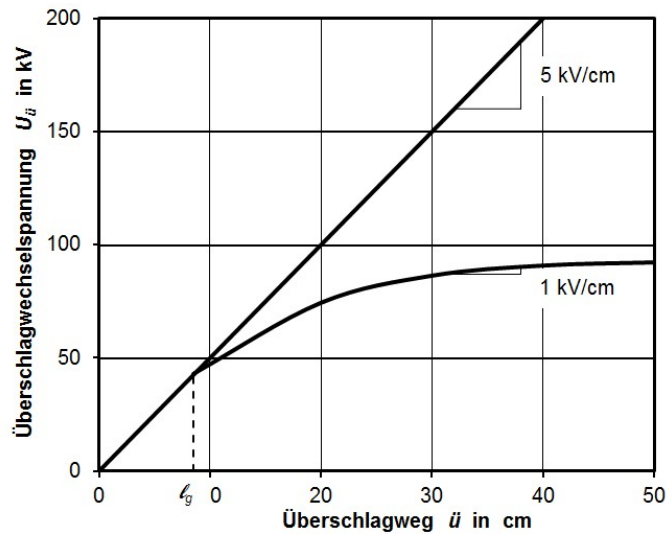
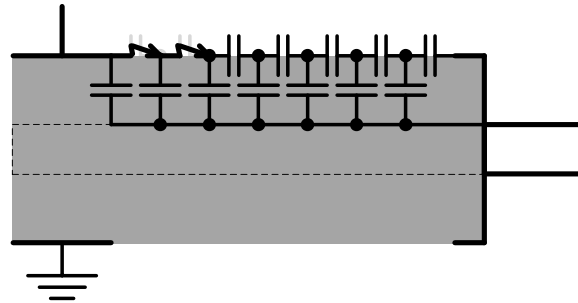
2. Der Vorlichtbogen wächst weiter vor, wenn sein bezogener Spannungsbedarf $E_{Lb} = U_{Lb} / l_{Lb}$ kleiner ist als die mittlere Feldstärke im Restbelag E_{ms} , d.h.

$$E_{Lb} < E_{ms}$$

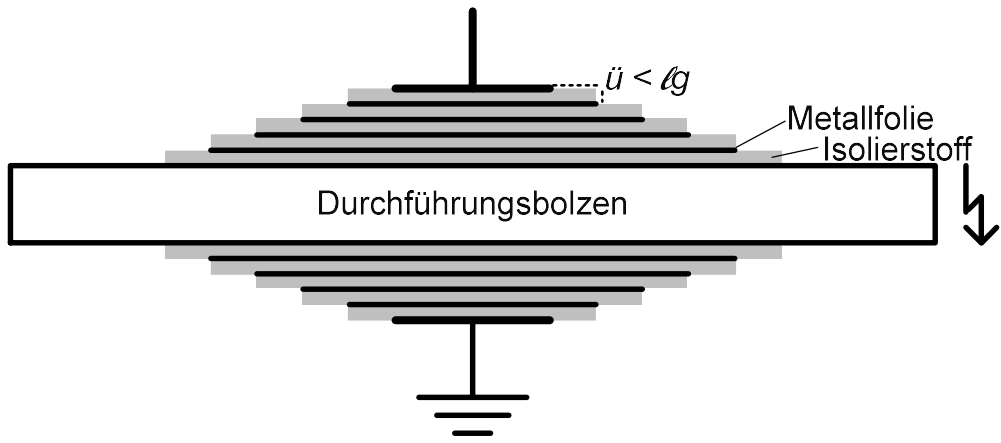
Ändert sich diese Bedingung während der Fußpunktwanderung nicht, so kommt es schließlich zum Kriechüberschlag.

3. Der Vorlichtbogen kann z.B. bei einem Isolator mit Schirmen die trockenen Teilstrecken mit hohem Widerstand überbrücken und brennen, ohne weiter vorzuwachsen.

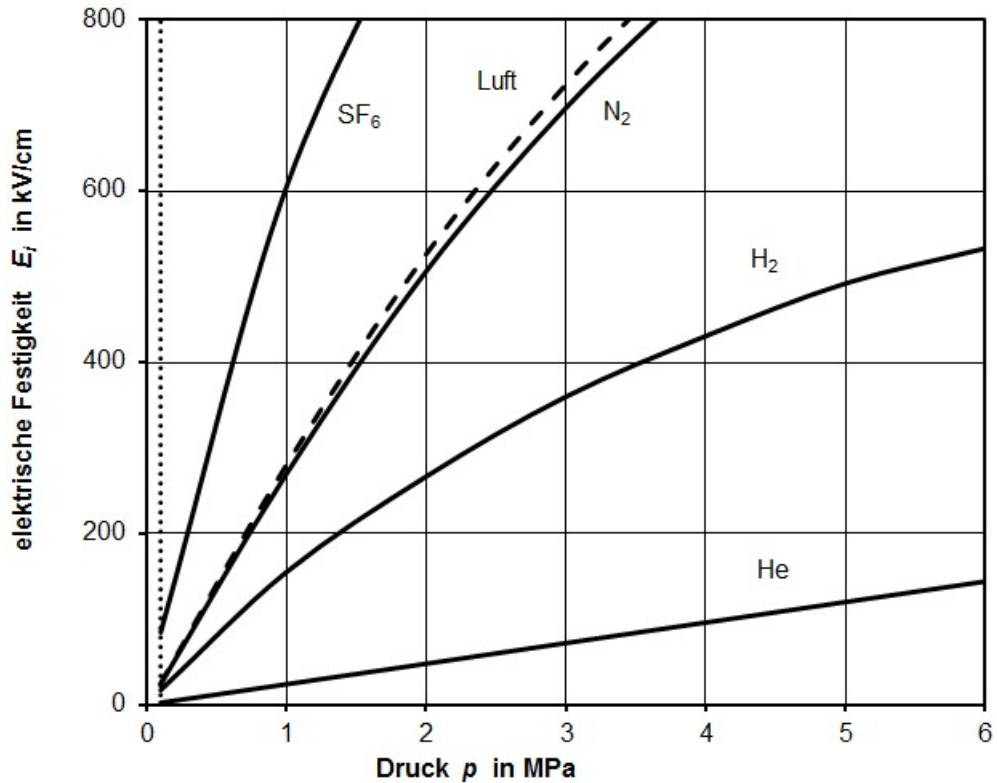
Kriterien für die Lichtbogenentwicklung



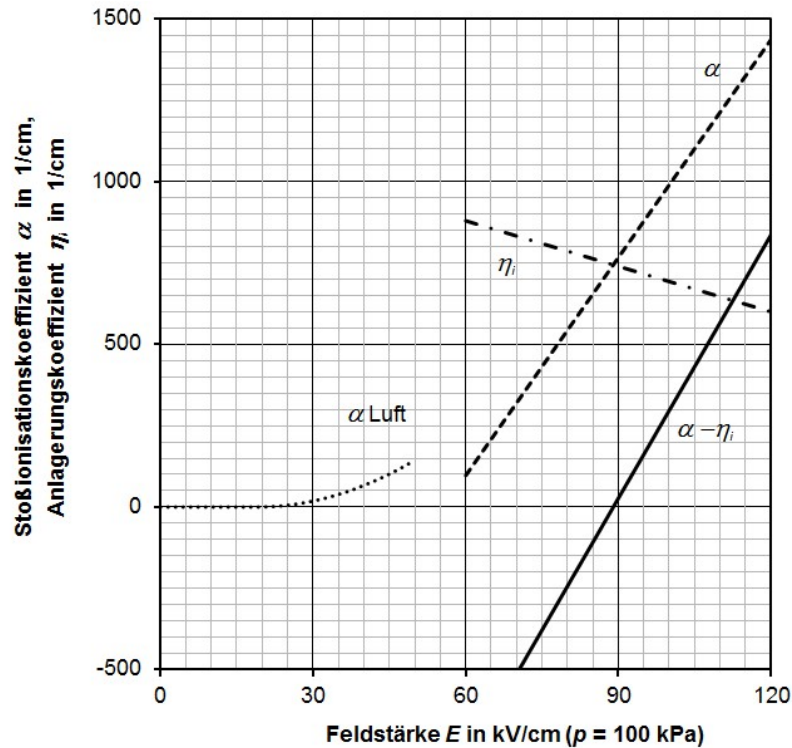
Gleitanordnung und Überschlagwechselspannung



Kondensatordurchführung zur Vermeidung von Gleitentladungen



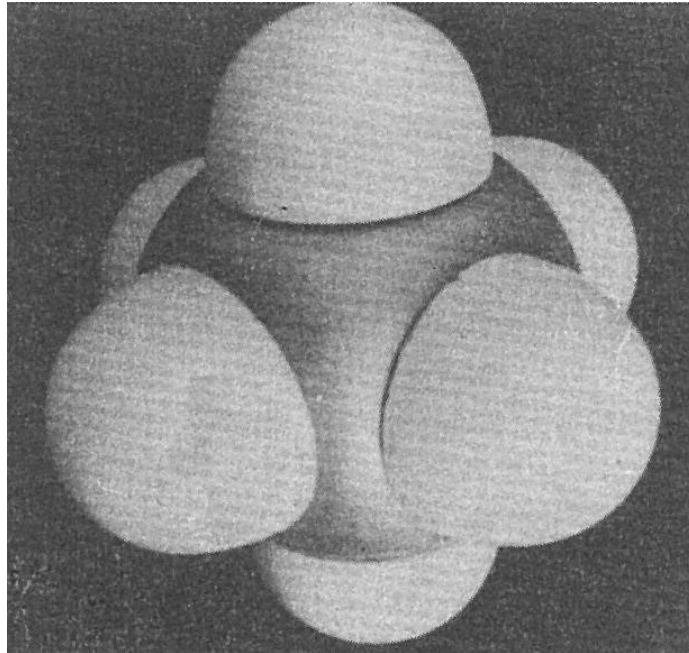
Elektrische Festigkeit E_i verschiedener Gase in Abhängigkeit vom Gasdruck p



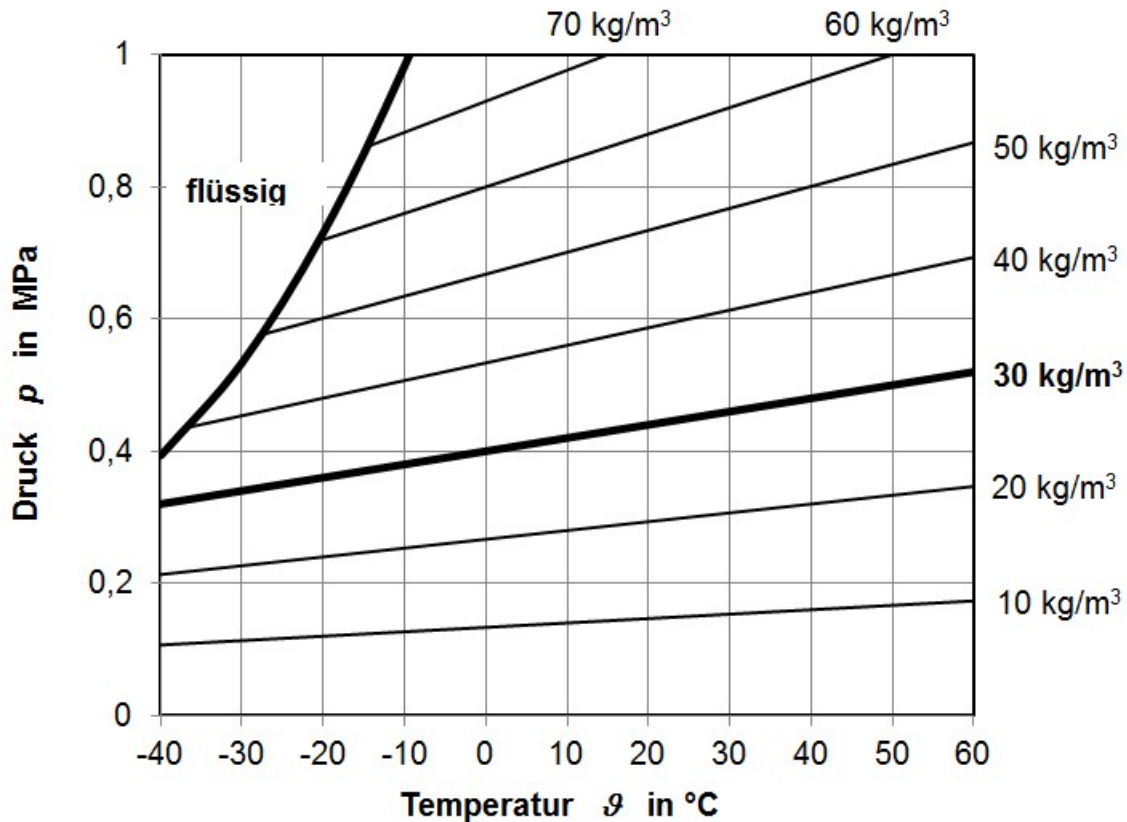
Bezogener Stoßionisationskoeffizient α/p und bezogener Anlagerungskoeffizient η_i/p für das Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) in Abhängigkeit von der bezogenen Feldstärke E/p und bei Normaldruck $p = 100$ kPa

Gas	molekulare Masse M	Ionisierungs- energie W_i	bei Normaldruck 100kPa		
			Dichte ρ	mittl. freie Wegl. λ	Durchschl.- feldst. E_d
		eV	kg / m³	μm	kV / cm
H_2	2	15,8	0,09	0,65	15
N_2	28	15,7	1,21	0,35	33
O_2	32	12,1	1,38	0,4	27
CO_2	45	14,4	1,91	0,24	25
SF_6	146	15,9 ... 19,3	6,396	0,22	89

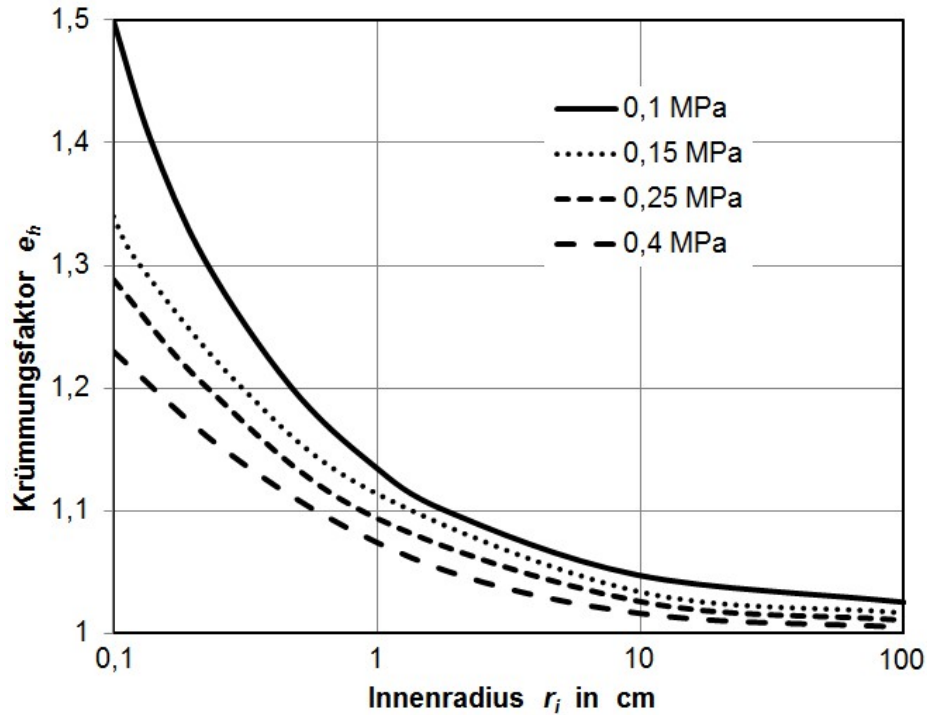
Physikalische Eigenschaften verschiedener Gase



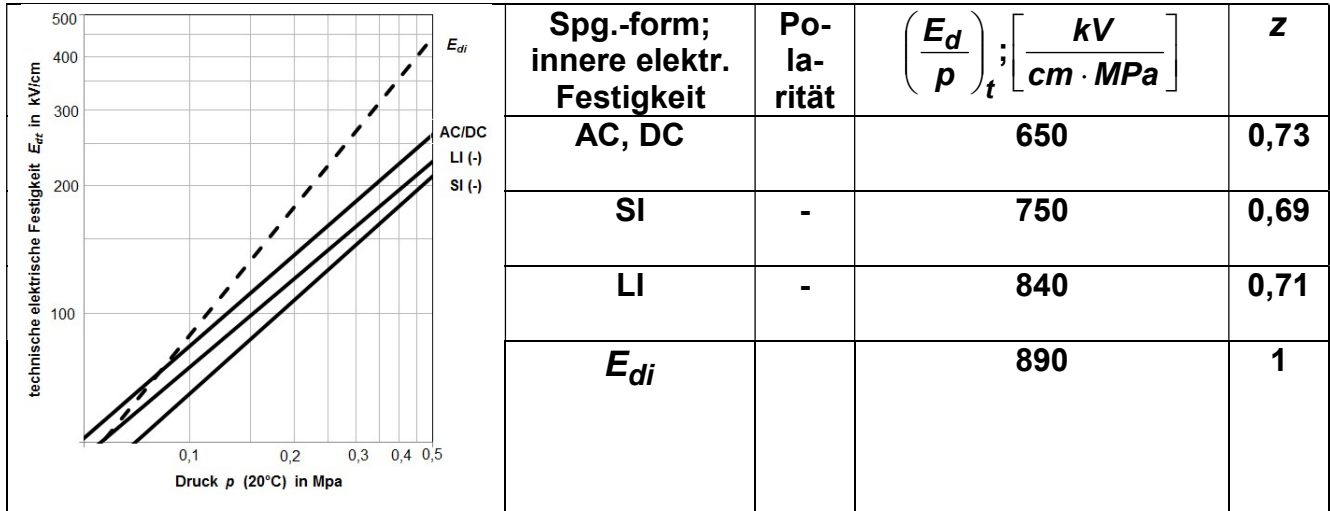
SF₆ - Struktur



Zustandsdiagramme des SF_6 ($p = f(\vartheta)$) mit Linien konstanter Dichte ρ

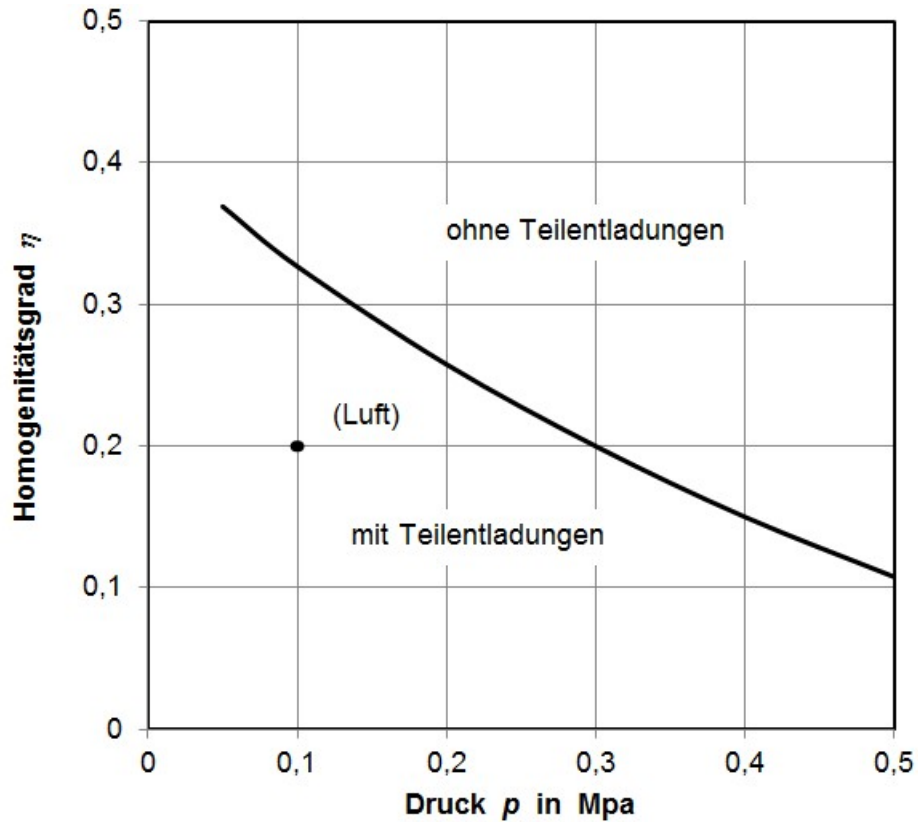


Bezogene Einsetzfeldstärke, Krümmungsfaktor e_h einer koaxialen Zylinderanordnung in Abhängigkeit vom Innenradius

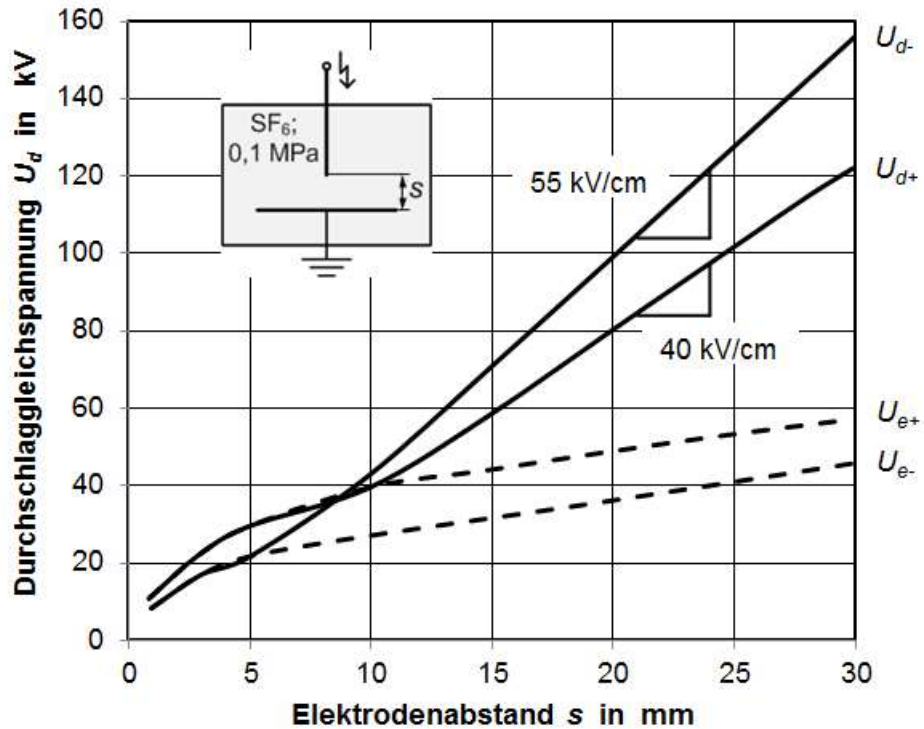


$$E_{dt} = \frac{\left(\frac{E_d}{p}\right)_t}{10} \cdot (10 p)^z; \quad E_{dt} \text{ in } \frac{kV}{cm}, p \text{ in } MPa; \quad z < 1$$

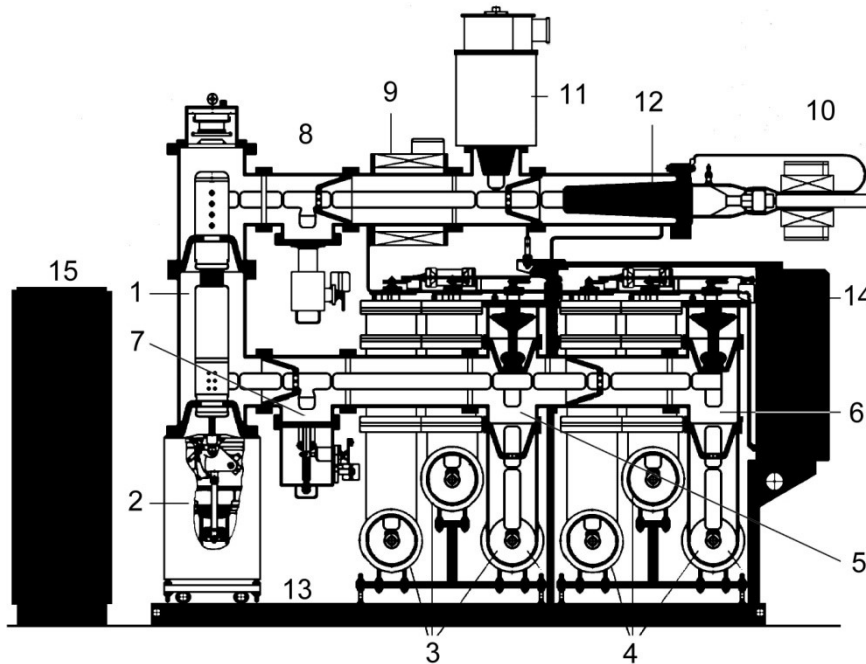
Technische elektrische Festigkeit E_{dt} (20°C) in Abhängigkeit vom Gasdruck



Grenzhomogenitätsgrad η_g für Elektrodenanordnungen im SF_6



Durchschlaggleichspannung U_d einer Spitze-Platte-Anordnung im SF₆



- 1.. Leistungsschalter
- 2 Leistungsschalterantrieb
- 3 Sammelschiene I
- 4 Sammelschiene II
- 5 Sammelschientrenner I
- 6 Sammelschientrenner II
- 7 Erdungstrenner
- 8 Kurzschließer
- 9 Anlagenwandler
- 10 Kabelwandler
- 11 Spannungswandler
- 12 Kabelendverschluß
- 13 Grundrahmen
- 14 Pneumatischer Steuerschrank
- 15 Elektrischer Steuerschrank

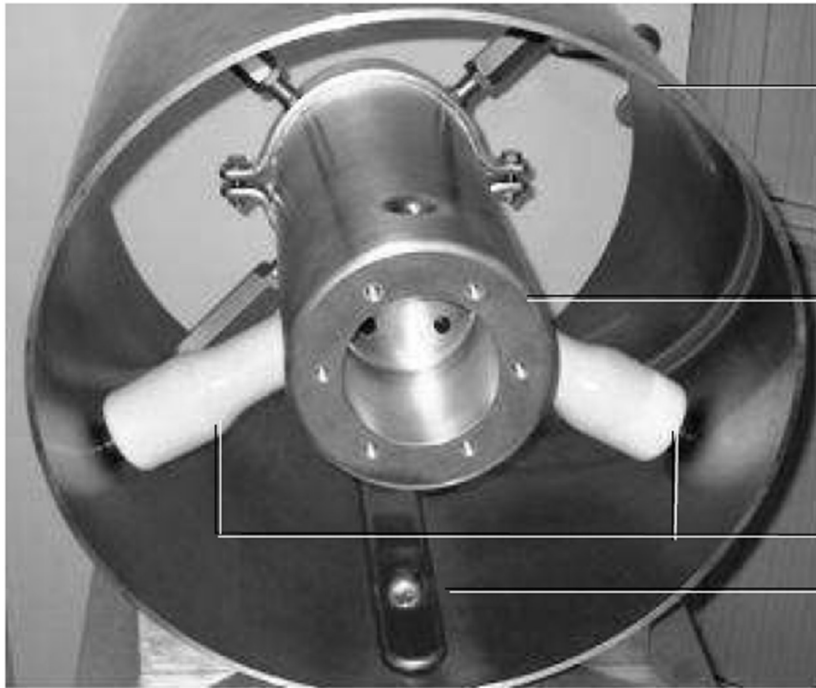
SF₆-Innenraumschaltanlage (schematisch)



SF₆-Innenraumschaltanlage



Gasisolierte Leitungen – GIL



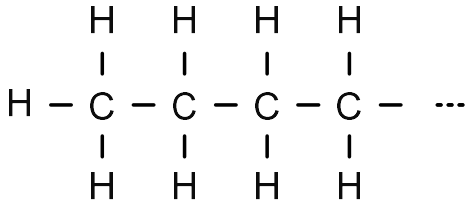
Mantelrohr

Leiterrohr

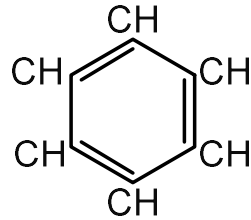
Isolator

Teilchenfalle

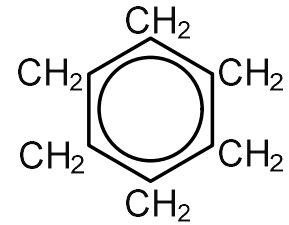
GIL-Segment - $U_n = 420$ kV; $I_n = 3000$ A; $D = 500$ mm; 20 - 30 kg/m, Al, 90 % N₂/10 % SF₆



Paraffine

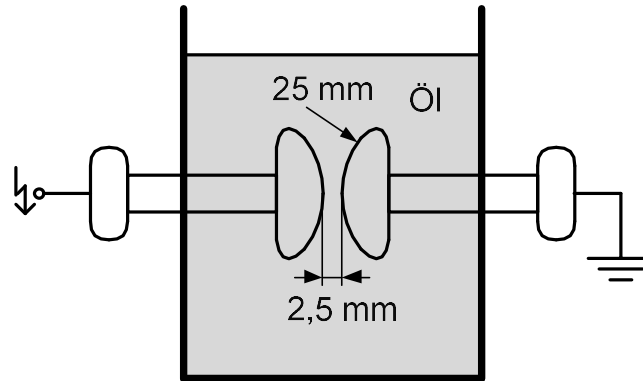


Naphtene



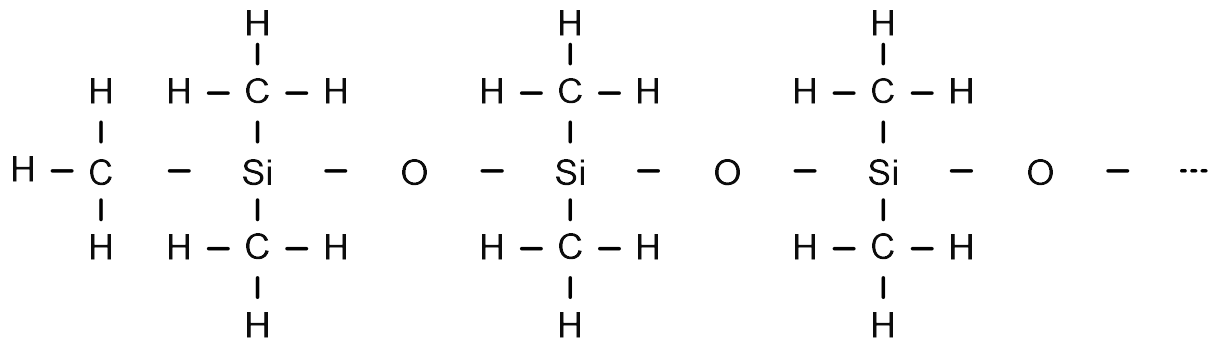
Aromaten

Chemischer Aufbau verschiedener Mineralöle

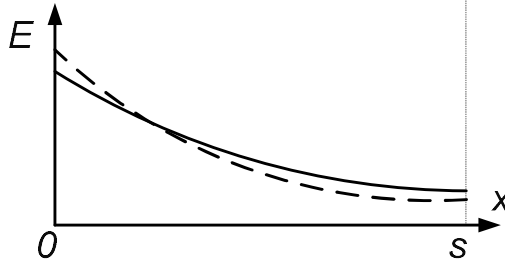
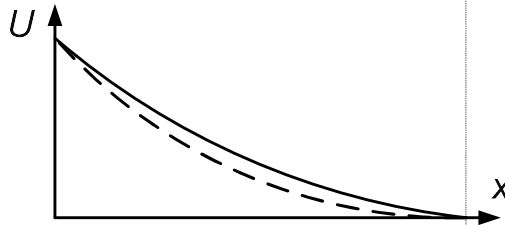
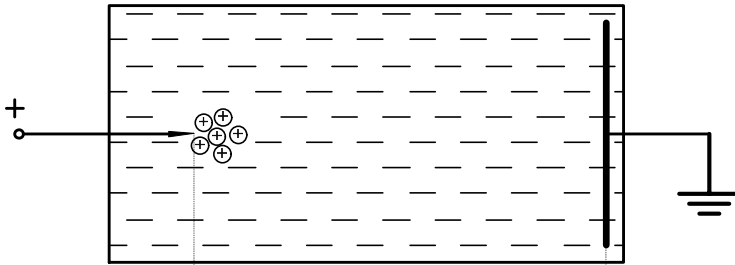


Verwendungszweck für Geräte mit Nennspannung in kV		Durchschlagsspannung in kV	
		Neuöl	Betriebsöl
Transformatoren und Wandler:	≤ 60	≥ 50 (ca. 200 kV/cm)	≥ 30
	60 ... 150		≥ 40
	> 150		≥ 50
Schaltgeräte:	≤ 30	≥ 50	≥ 10
	30 ... 60		≥ 15
	> 60		≥ 20

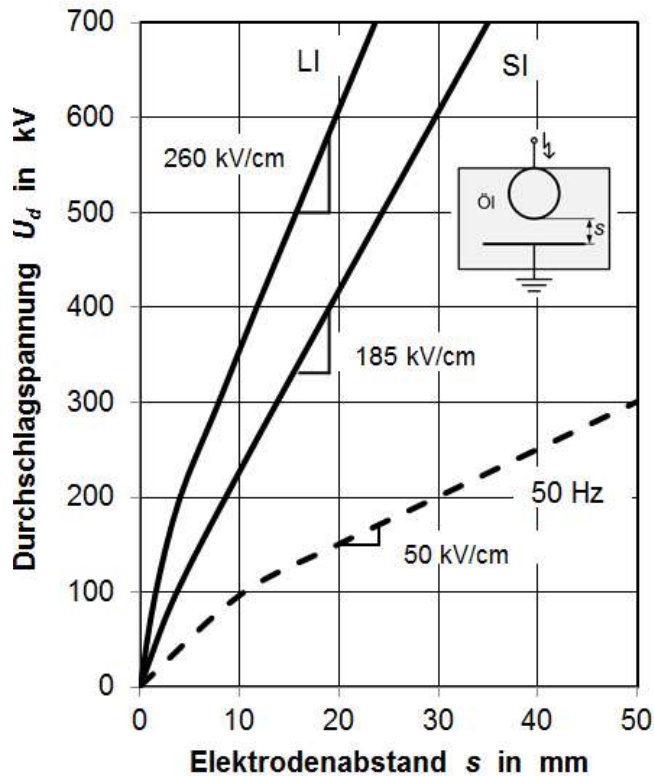
**Geforderte Durchschlagsspannung U_d für Isolieröl im Neuzustand
und nach Betriebsbeanspruchung gemäß DIN VDE 0370**



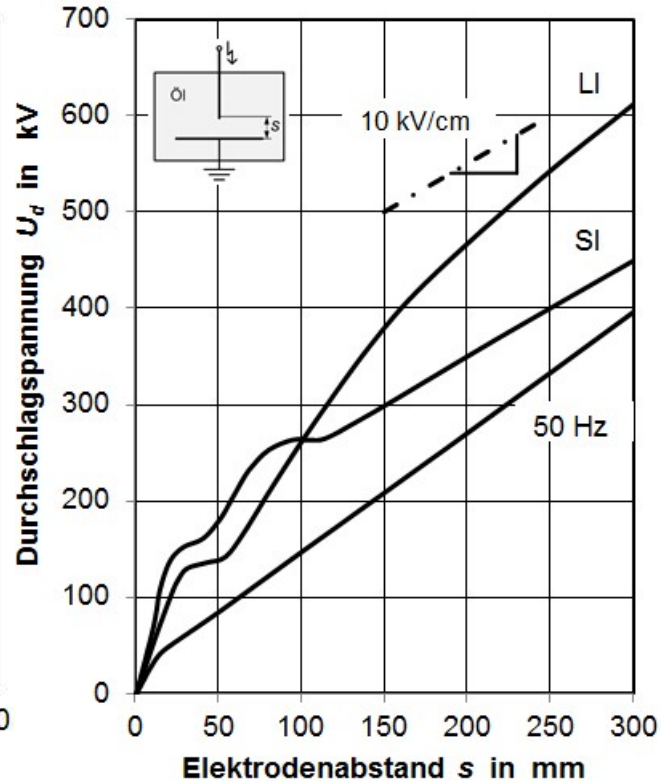
Silikonmolekül

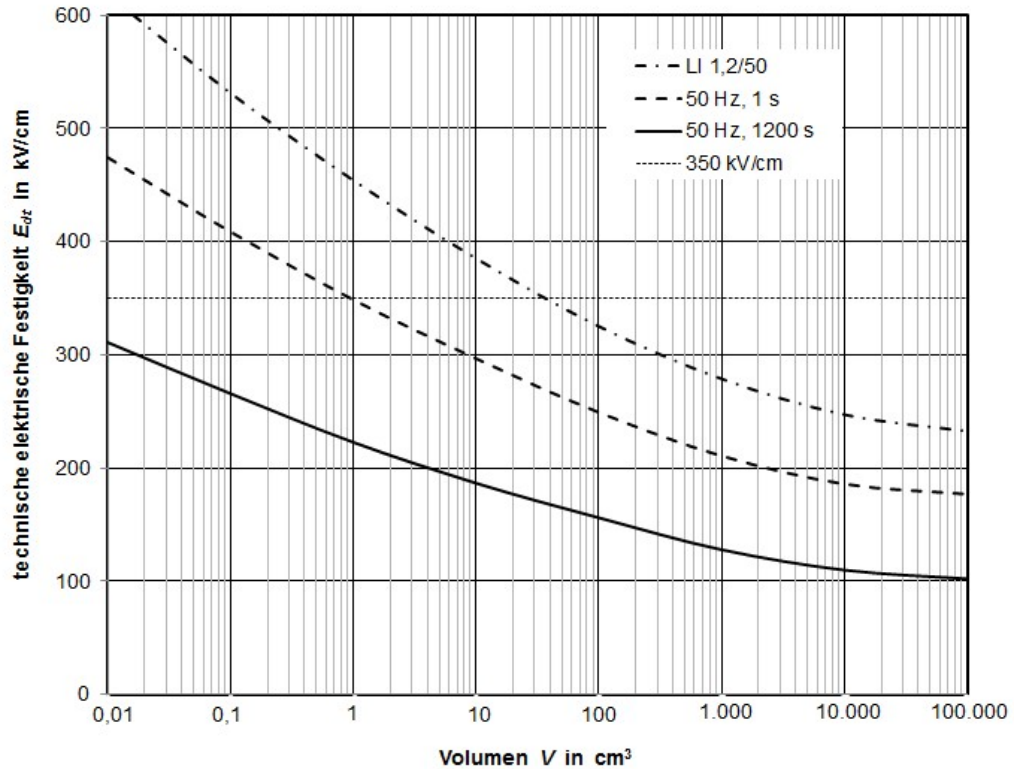


Feldstärkeverringerng an einer Spitzenelektrode durch Raumladungen

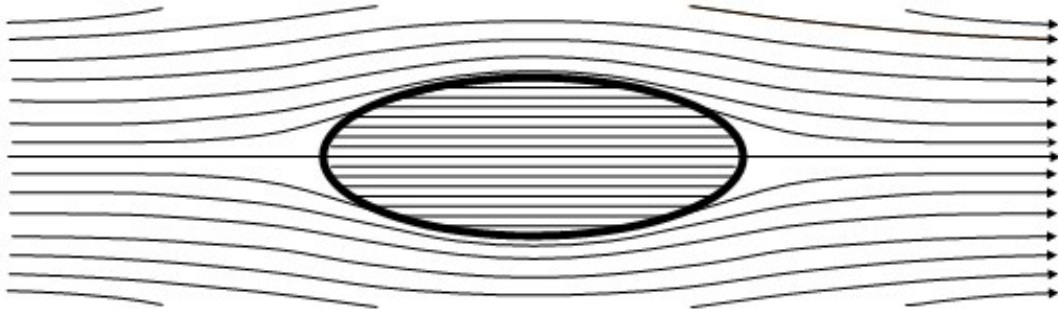


schwach inhomogenes Feld ($\eta \approx 0,87$) stark inhomogenes Feld ($\eta \approx 0,02$)
Durchschlagspannung U_d von Mineralöl in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand

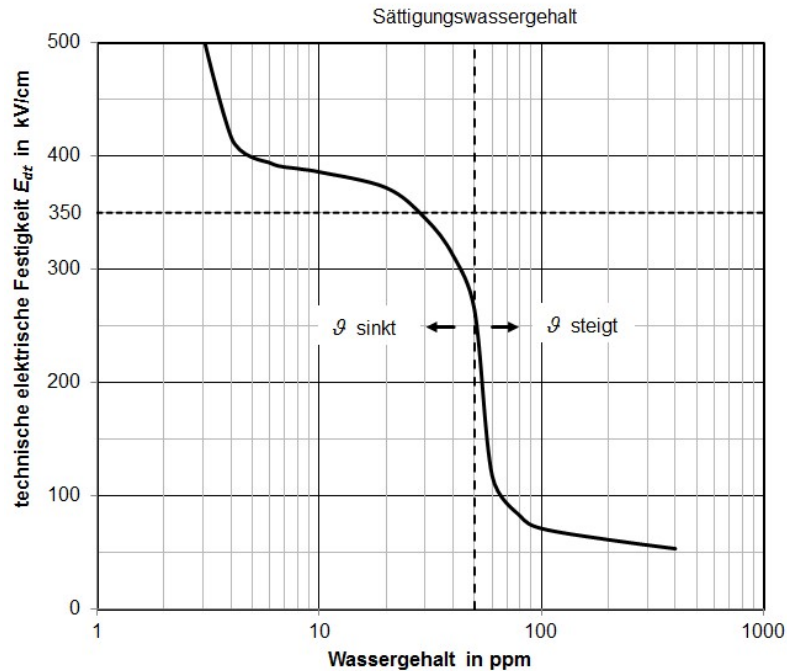




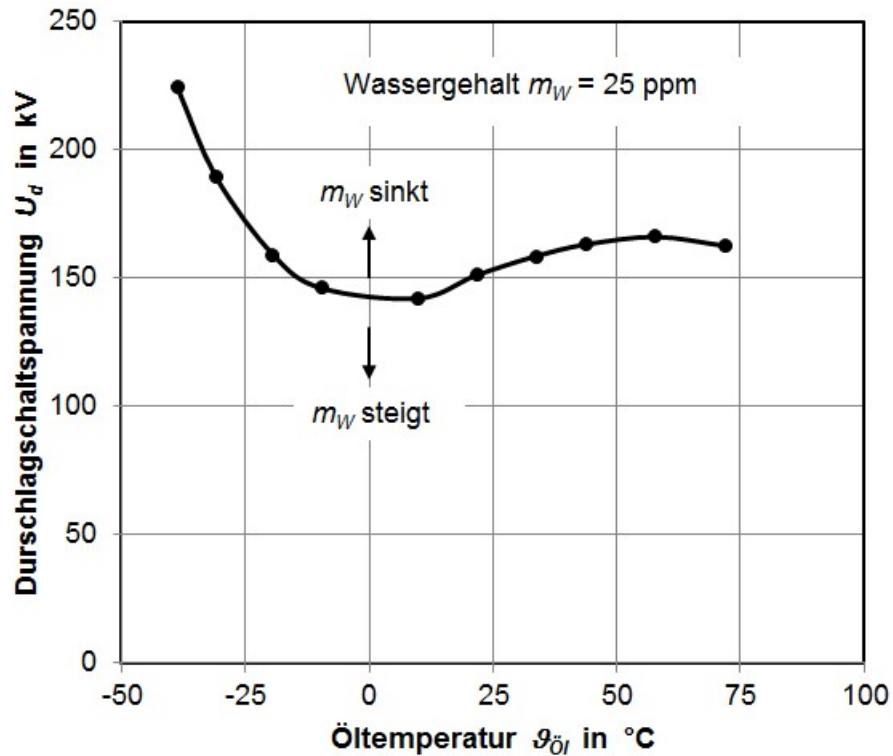
Technische elektrische Festigkeit E_{dt} von Mineralöl abhängig vom beanspruchten Volumen



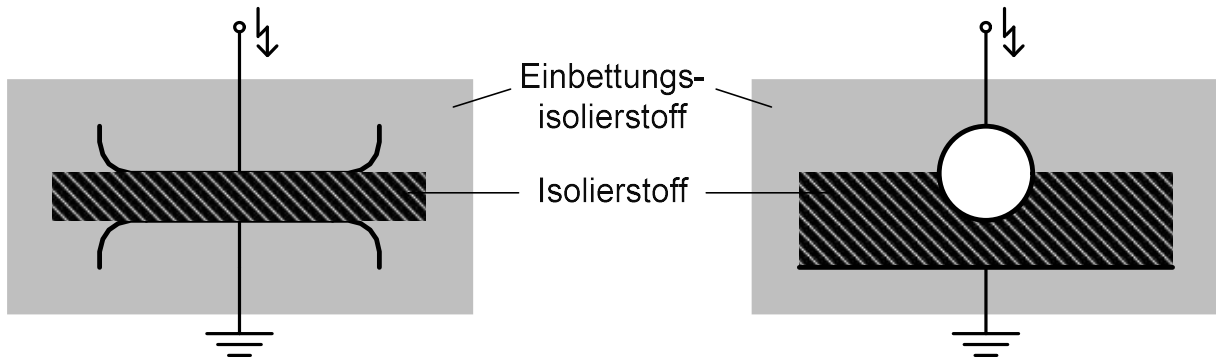
Streckung einer Gasblase im Öl durch das elektrische Feld



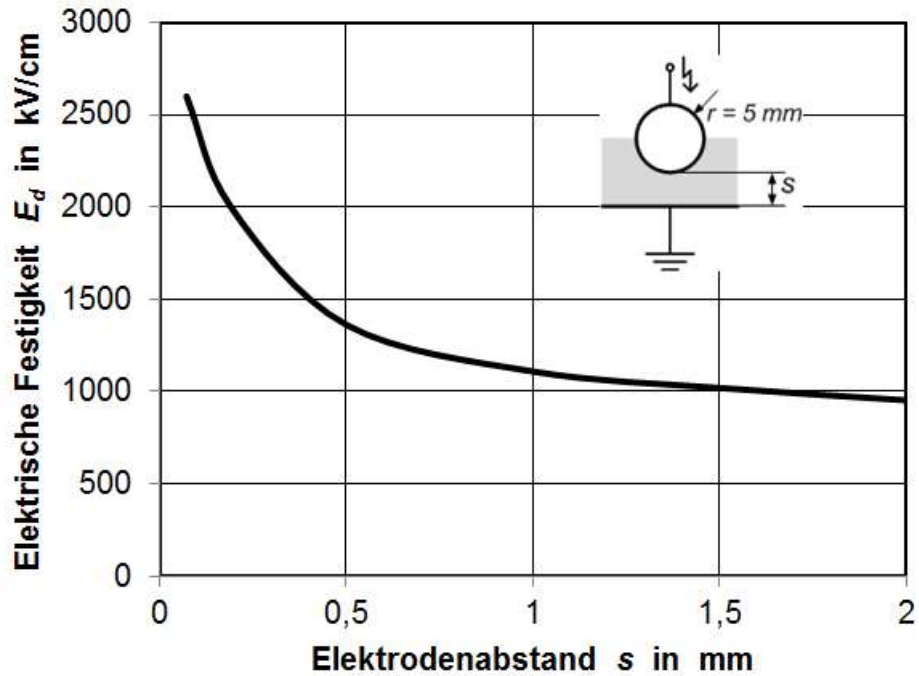
Technische elektrische Festigkeit E_{dt} von Mineralöl bei Wechselspannungsbeanspruchung abhängig vom Wassergehalt



Durchschlagschaltspannung U_d der Anordnung Kugel-Platte ($s = 5 \text{ mm}$) im Öl in Abhängigkeit von der Öltemperatur



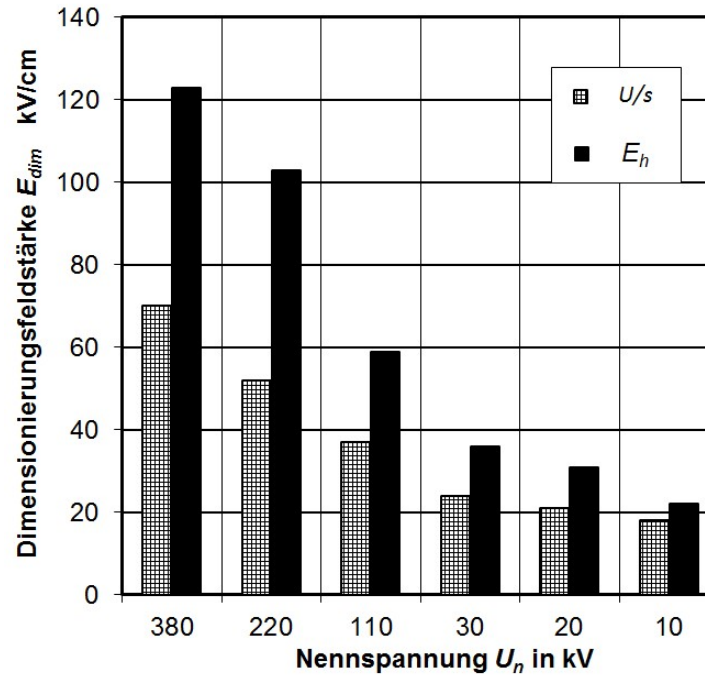
**Anordnung zur Bestimmung der elektrischen Festigkeit
von festen Isolierstoffen**



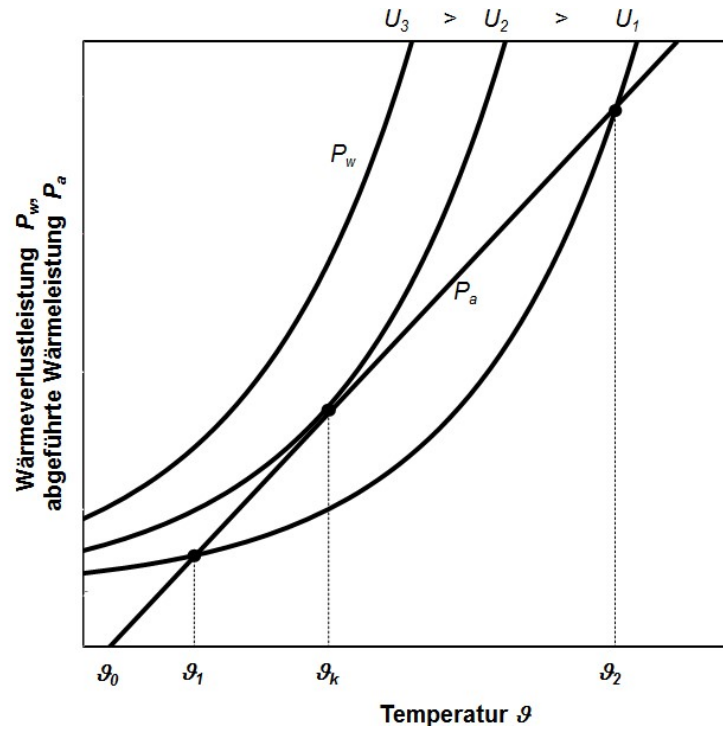
Elektrische Festigkeit E_d von Polyethylen

Isolierung mit	inneren elektr. Festigk. E_{di} in kV / cm	techn. elektr. Festigkeit E_{dt} in kV / cm	Vergleich E_{dt} / E_{di}
Epoxidharz	1000	20...30	2 ... 3 %
Polyethylen	700	40...50	4 ... 5 %
zum Vergleich: Isolieröl	1000	350	35%
SF₆(100kPa)	89	65	75%

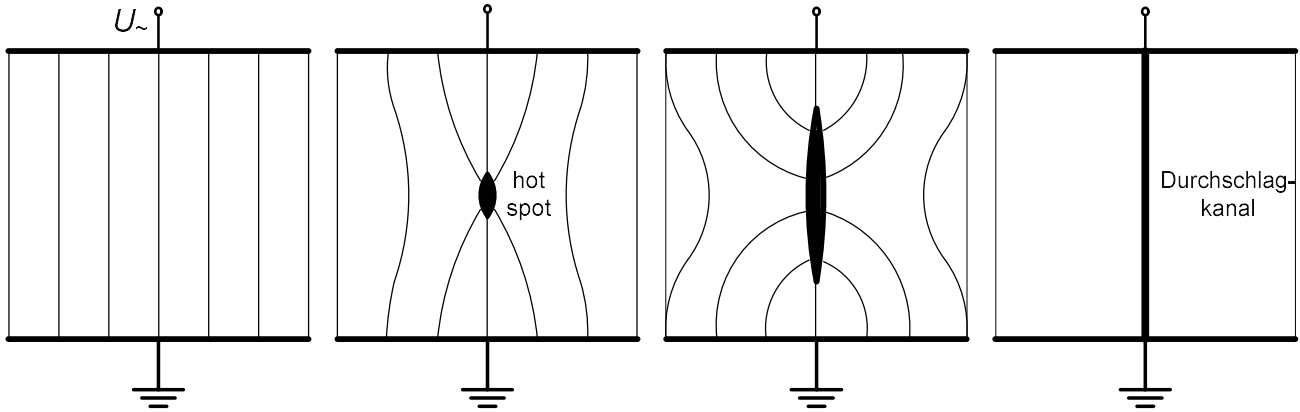
Innere elektrische Festigkeit E_{di} und technische elektrische Festigkeit E_{dt}



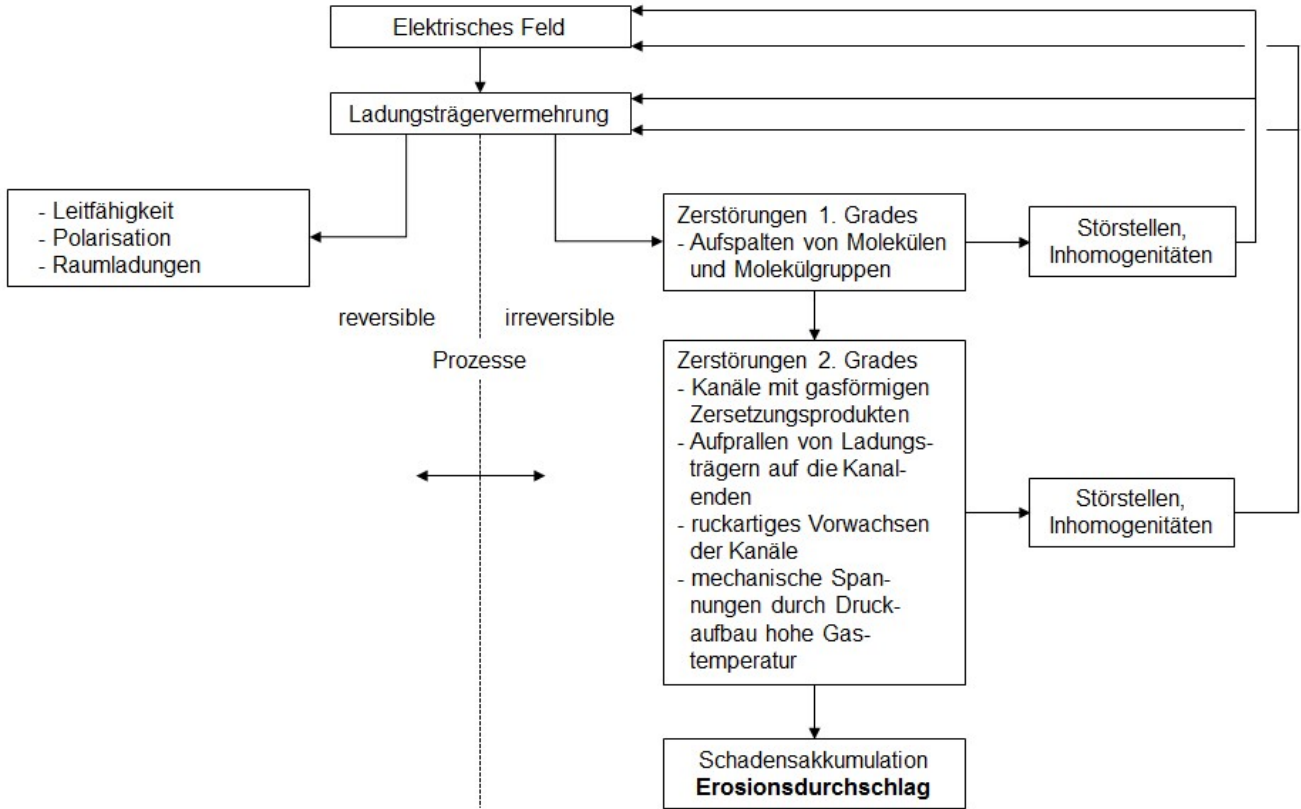
Dimensionierungsfeldstärken von Polyethylenkabeln



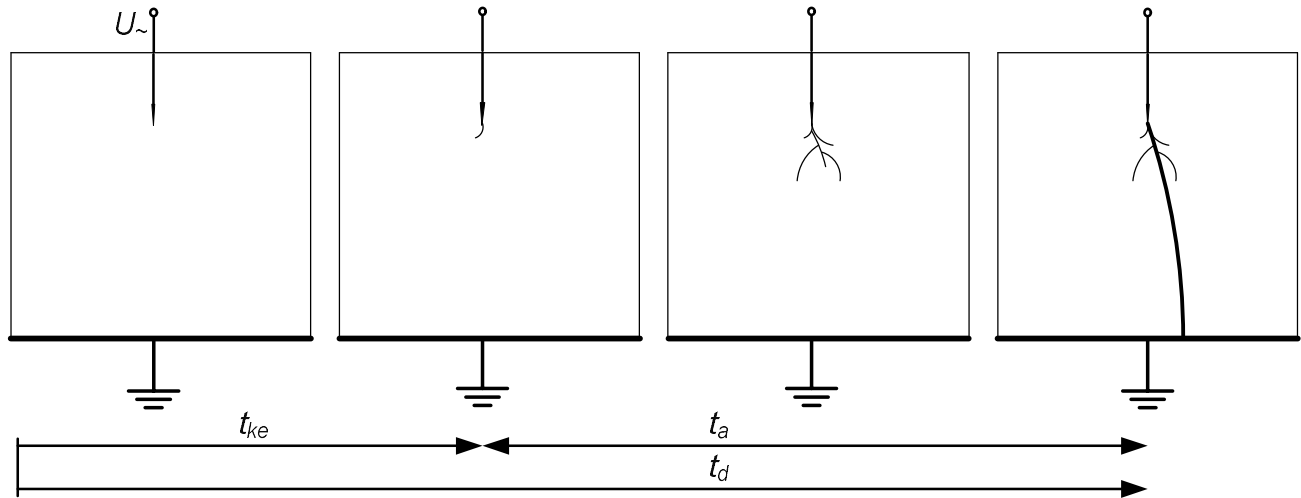
Wirkverlustleistung P_w und abgeführte Leist. P_a , abh. von der Temperatur ϑ



Entwicklung eines Wärmedurchschlages



Erosionsdurchschlag von von Feststoffen

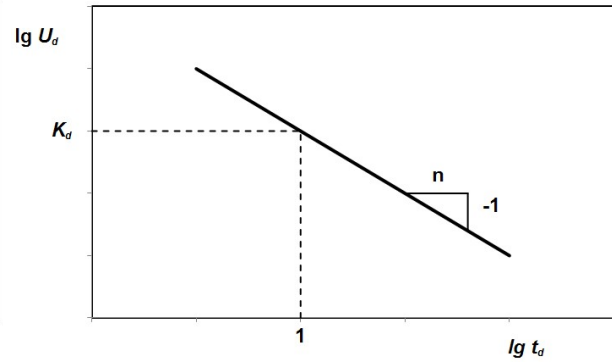
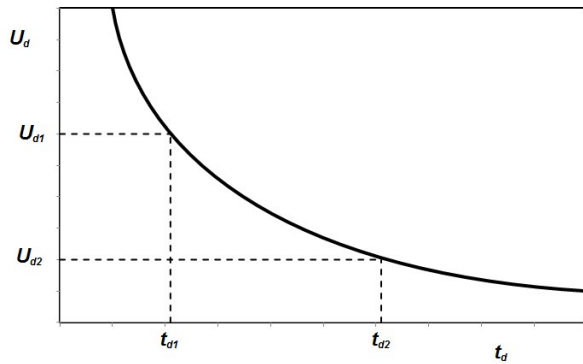


t_{ke} Kanaleinsetzzeit;

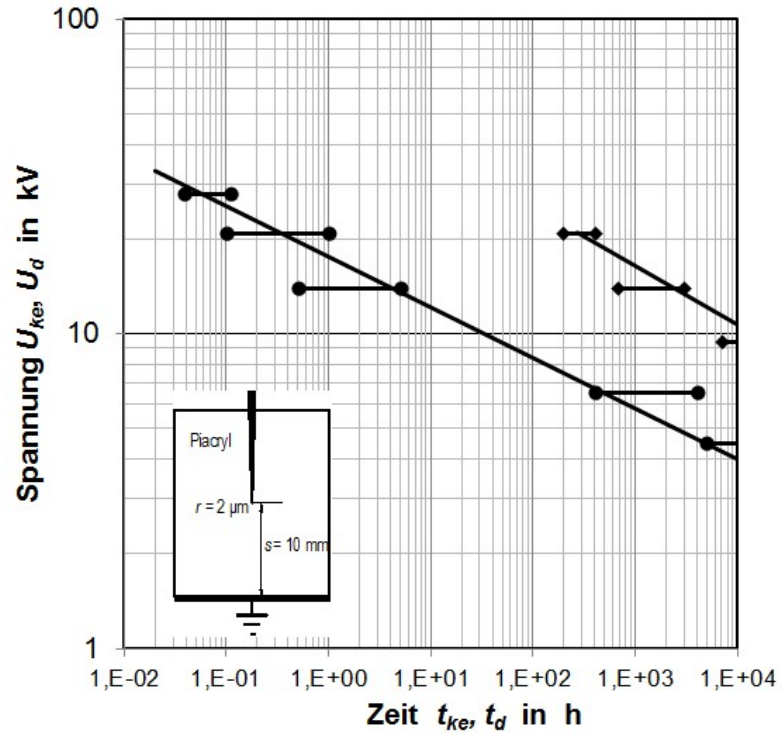
t_a Aufbauzeit;

t_d Durchschlagzeit

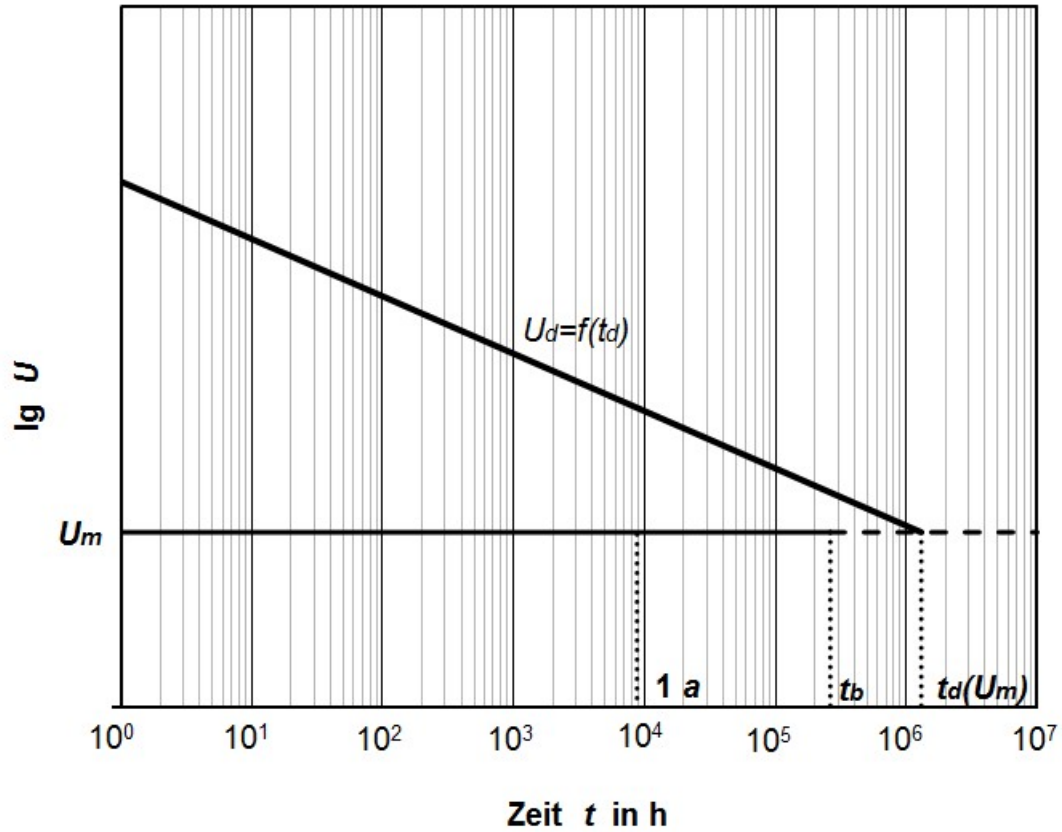
Entwicklung eines elektrischen Durchschlages



Lebensdauerkennlinie, linear und logarithmisch



Lebensdauerkennlinie - Durchschlagsspannung $U_d = f(t_d)$ und Kanaleinsatzspannung $U_{ke} = f(t_{ke})$ von Piacryl abhängig von der Zeit



Ermittlung der Lebensdauer