

Begriffe und Definitionen

Jede Isolierung stellt elektrisch eine verlustbehaftete Kapazität dar, deren Verhalten durch ihre Dielektrizitätszahl und ihren Widerstand bestimmt wird.

Dielektrizitätszahl (DZ) ϵ_r (relative permittivity)

Quotient aus der Kapazität C_x einer Kondensatoranordnung mit einem Isolierstoff als Dielektrikum und der Kapazität C_0 desselben Kondensators mit Vakuum als Dielektrikum.

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$$

Dielektrizitätskonstante des Vakuums ϵ_0 (Feldkonstante, electric constant)

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

Dielektrizitätskonstante ϵ (permittivity)

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Begriffe und Definitionen

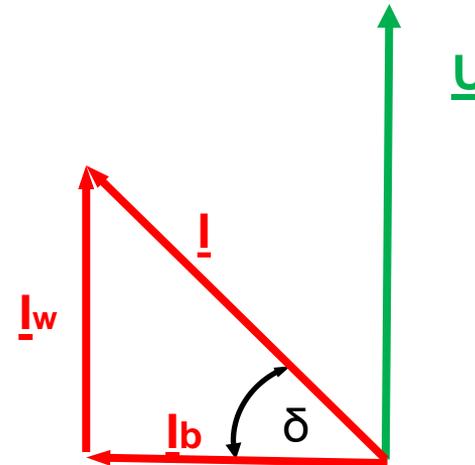
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ (dissipation factor)

Verhältnis von Wirkleistung zu Blindleistung einer an Spannung liegenden Kapazität.

$$\tan \delta = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Blindleistung}} = \frac{UI \cos \varphi}{UI \sin \varphi} = \frac{I_w}{I_b}$$

Verlustwinkel δ :

Winkel um den die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung kleiner als 90° ist.



Dielektrische Verlustzahl ϵ_r'' (loss index)

$$\epsilon_r'' = \epsilon_r \cdot \tan \delta$$

Komplexe Dielektrizitätszahl

Zeit zur Polarisierung hängt ab von

- Art der Polarisierung (Deformationspolarisation, Orientierungspolarisation)
- und
- Beweglichkeit des Dielektrikums. (→ starker Temperatureinfluss)

→ Aus nötiger Einstellzeit der Dipole (Relaxationszeit)
folgt **Frequenzeinfluss**:

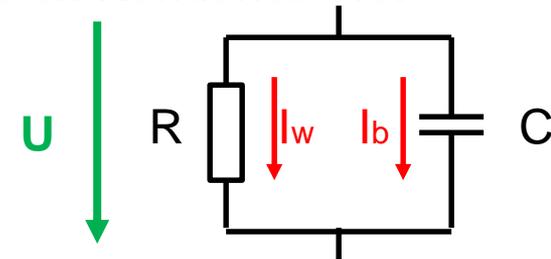
- **Tiefe Frequenzen:** Näherungsweise unverzögerte Einstellung der Dipole auf das Wechselfeld ohne Phasenverschiebung.
- **Höhere Frequenzen:** Zunehmende Verzögerung der Dipoleinstellung in Bezug auf das Wechselfeld bei gleichzeitig abnehmendem Betrag.
- **Sehr hohe Frequenzen:** Weitere Vergrößerung der Phasenverschiebung bis 90° bei abnehmender Einstellbewegung der Dipole.

Komplexe Dielektrizitätszahl

Die frequenzabhängige Polarisationswirkung der Dipole kann daher in zwei Komponenten aufgeteilt werden:

- mit der elektrischen Feldstärke in Phase liegende Komponente
→ bewirkt **Vergrößerung der Dielektrizitätszahl ϵ_r** ,
- die dem elektrischen Feld um 90° nacheilende Komponente
→ bewirkt **dielektrische Verluste**.

Einfaches **Ersatzschaltbild** (ESB) des verlustbehafteten Kondensators:



Darstellung mit komplexen Größen:

$$\underline{I} = I_w + jI_b = \frac{U}{R} + j\omega C \underline{U}$$

Komplexe Dielektrizitätszahl

$$\underline{I} = I_w + jI_b = \frac{U}{R} + j\omega C U$$

Durch Einführung einer sog. Vakuumkapazität C_0 (Kapazität des gleichen Kondensators ohne Dielektrikum) und Ausklammern von $j\omega C_0 \cdot \underline{U}$ erhält man

$$\underline{I} = j\omega C_0 \cdot \underline{U} \cdot \left(\epsilon_r' - j \frac{1}{\omega C_0 R} \right)$$

Ferner kann man den imaginären Ausdruck als ϵ_r'' bezeichnen und darstellen als

$$\epsilon_r'' = \frac{1}{\omega C_0 R} = \frac{\epsilon_r'}{\omega C R} = \epsilon_r' \cdot \tan \delta$$

Als **komplexe Dielektrizitätszahl** $\underline{\epsilon}_r$ erhält man so

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r''$$

mit:

$$\begin{aligned} \epsilon_r' &= \epsilon_r \\ \epsilon_r'' &= \epsilon_r \cdot \tan \delta \end{aligned}$$

Dielektrische Verlustleistung P_{diel}

$$P_{diel} = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \cos \varphi$$

mit : $\hat{i} \cos \varphi = \hat{i}_w = \hat{i}_b \tan \delta$ bzw. $\hat{i}_b = \hat{u} \omega C$

erhält man

$$P_{diel} = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i}_b \cdot \tan \delta = U^2 \omega C \tan \delta$$

Die dielektrische Verlustleistung P_{diel} wächst somit :

- proportional zum $\tan \delta$
- proportional mit f bzw. ω
- proportional zu ϵ_r
- quadratisch mit U

Verlustzahl

- $\tan \delta$ gibt nur das Verhältnis von Verlustleistung zu kapazitiver Blindleistung an
- ϵ_r'' berücksichtigt gegenüber dem reinen $\tan \delta$ zusätzlich die Dielektrizitätszahl ϵ_r'
→ besserer Vergleich der Verlusteigenschaften von Dielektrika.

Beispiel:

Isolierstoff	ϵ_r'	$\tan \delta$	$\epsilon_r'' = \epsilon_r' \cdot \tan$
A	5	0,005	0,025
B	2	0,01	0,02

Bei gleicher Geometrie sind die Verluste im Isolierstoff A größer als in B, obwohl der Verlustfaktor des Isolierstoffes A kleiner ist !

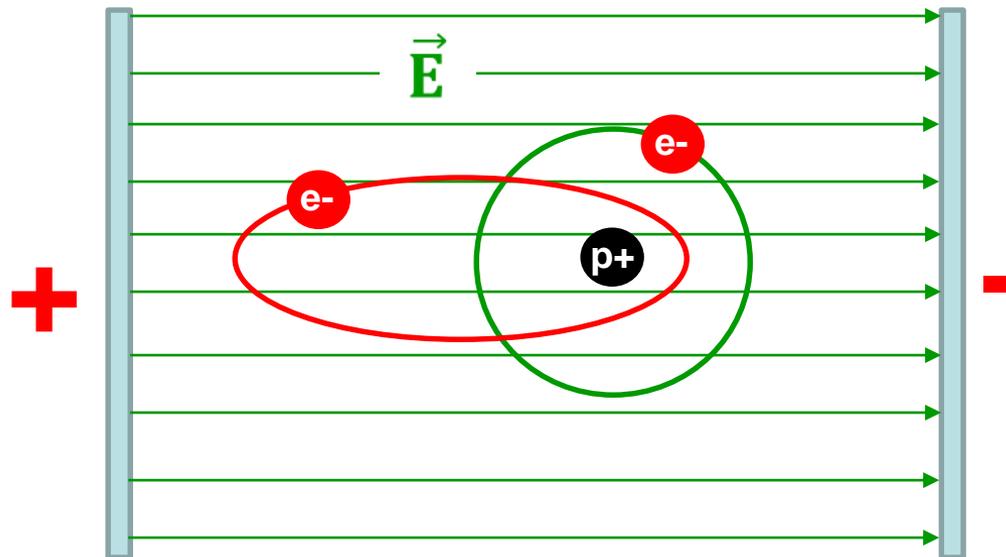
Polarisationsmechanismen

Deformationspolarisation

Einzelne Moleküle oder Atome werden im Takt des Wechselfeldes zu Schwingungen geregt.

Ähnliche Schwingungen können auch zwischen Kern und Elektronenhülle der Atome auftreten.

Beispiel: Wasserstoffatom



Polarisationsmechanismen

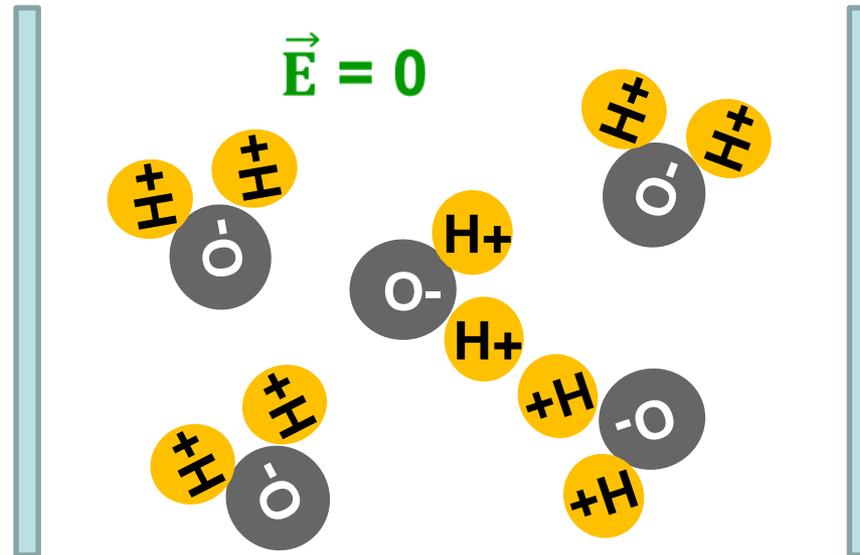
Dipol- oder Orientierungspolarisation

Manche Isolierstoffe enthalten permanente Dipole (z.B. Wasser H_2O).

$E=0$: Wärmeschwingungen

- Lage der Dipole in alle Richtungen gleichmäßig verteilt
- keine resultierende Wirkung nach außen

Ohne E-Feld:



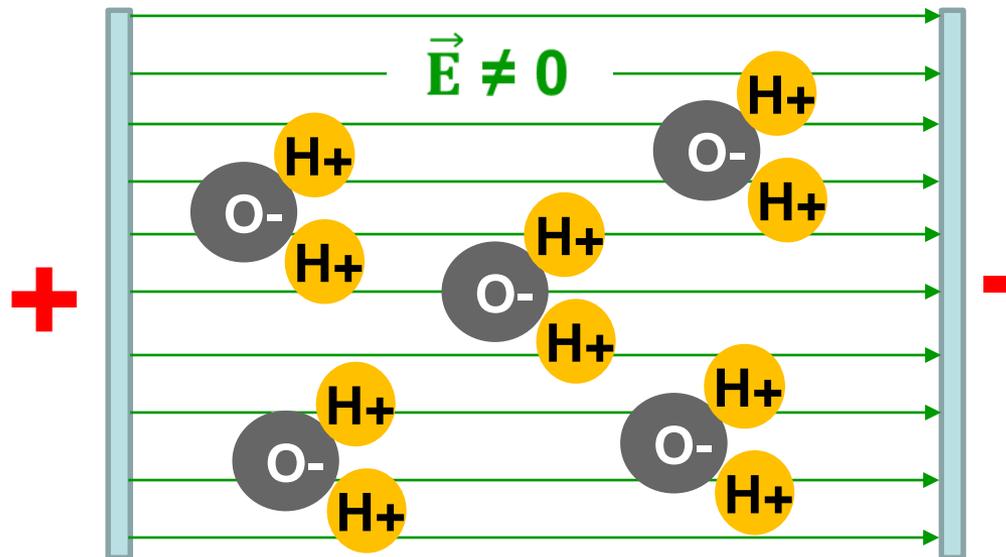
Polarisationsmechanismen

Dipol- oder Orientierungspolarisation

Manche Isolierstoffe enthalten permanente Dipole (z.B. Wasser H_2O).

$E \neq 0$: **Dipole orientieren sich** und werden durch Wechselfeld im Takt der Frequenz umgerichtet.

Mit E-Feld:



Polarisationsmechanismen

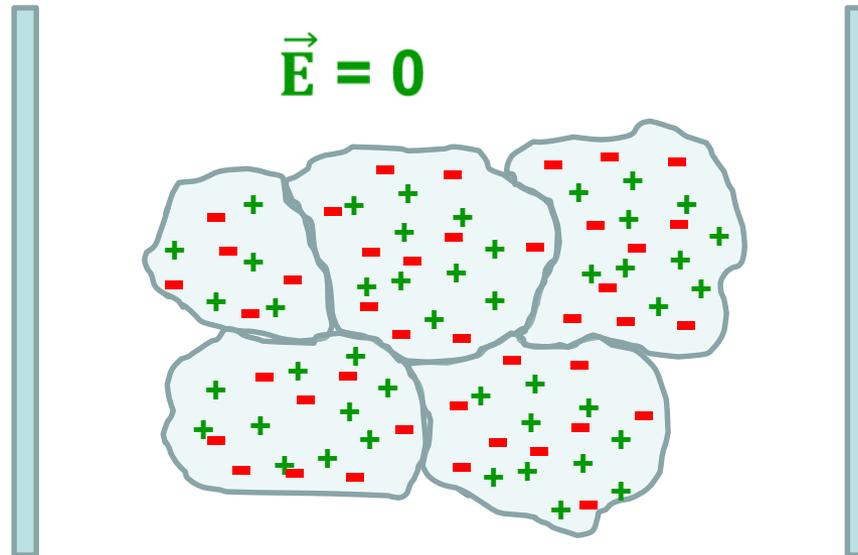
Grenzflächenpolarisation (Raumladungspolarisation)

Inhomogenitäten im Isolierstoff

- Ladungsträgeransammlungen an Grenzflächen
- Ausbildung makroskopischer Dipole, die durch das Wechselfeld fortlaufend umpolarisiert werden.

Bei Gasen und Flüssigkeiten ist eine Grenzflächenpolarisation nicht möglich.

Ohne E-Feld:



Polarisationsmechanismen

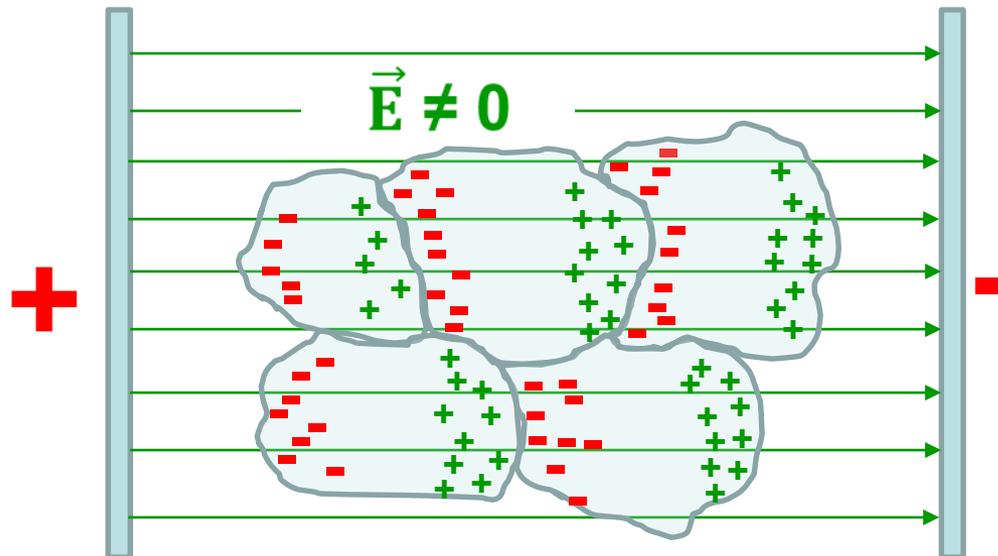
Grenzflächenpolarisation (Raumladungspolarisation)

Inhomogenitäten im Isolierstoff

- Ladungsträgeransammlungen an Grenzflächen
- Ausbildung makroskopischer Dipole, die durch das Wechselfeld fortlaufend umpolarisiert werden.

Bei Gasen und Flüssigkeiten ist eine Grenzflächenpolarisation nicht möglich.

Mit E-Feld:



Polarisationsmechanismen

Je nach Stoffart dominiert die eine oder andere Polarisationsart.

In flüssigen Isolierstoffen:

Orientierungspolarisation dominierender Polarisationsmechanismus.

Rechnerisch berücksichtigt man die Polarisation eines Stoffes durch seine Dielektrizitätszahl ϵ_r .

Gedankenexperiment:

1. Plattenkondensator aufladen und von seiner Spannungsquelle trennen ($Q = \text{konst.}$).
2. Platten-Dielektrikum mit der Dielektrizitätszahl ϵ_r zwischen die Platten schieben
 - Spannung an den Klemmen sinkt
 - entsprechend $E=U/d$ (d =Plattenabstand) auch die Feldstärke E .

Polarisationsmechanismen

Makroskopische Betrachtung:

Es gilt für die Verschiebungsflußdichte D

$$D = \frac{Q}{A} \quad (A = \text{Plattenfläche})$$

und mit $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ folgt:

vor Einschieben der Platte

$$E_0 = D / \epsilon_0$$

nach Einschieben der Platte

$$E_1 = D / \epsilon_0 \epsilon_r$$

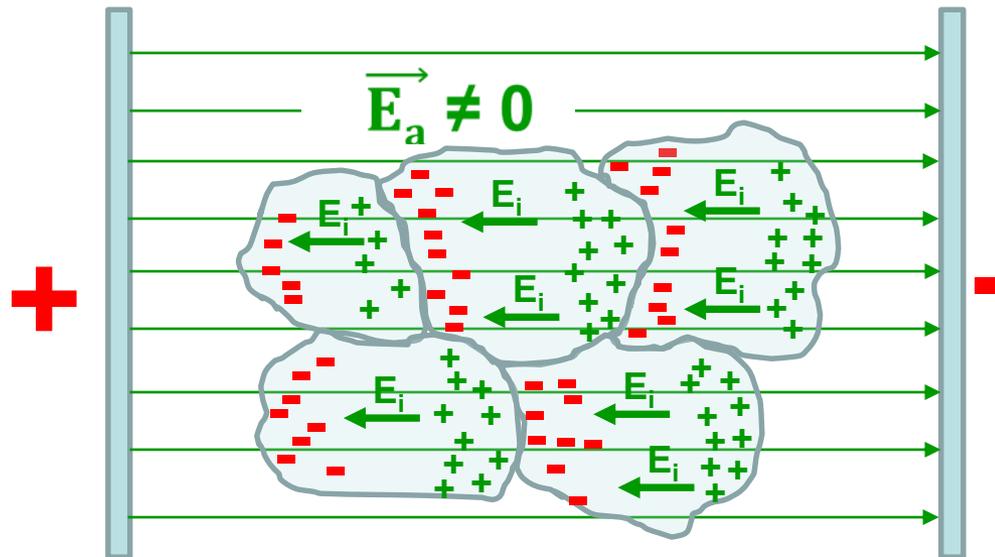
Daraus folgt

$$E_1 < E_0$$

Polarisationsmechanismen

Mikroskopische Betrachtung:

Durch Einschleiben des Dielektrikums und dessen Polarisation entsteht ein inneres Feld E_i im Dielektrikum, das sich dem äußeren Feld E_a überlagert und eine Schwächung bewirkt.



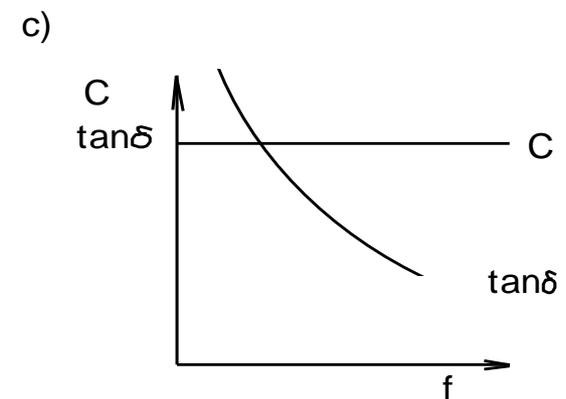
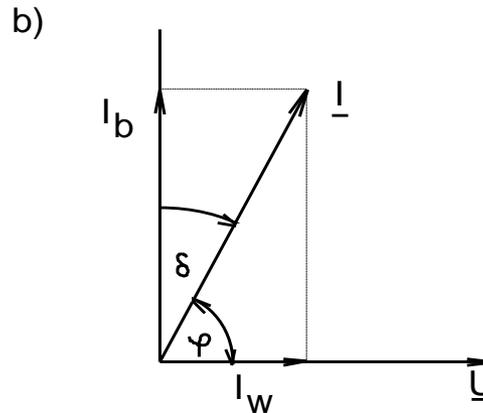
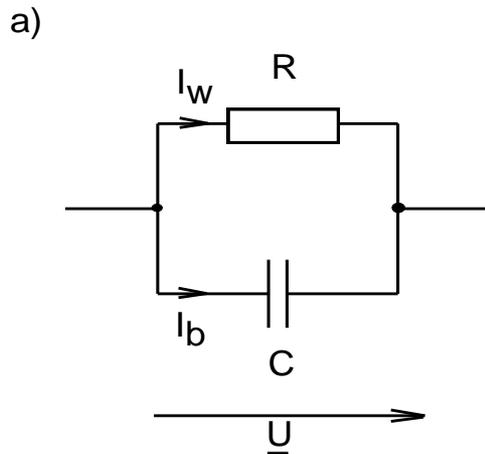
Daraus folgt $E_1 = E_a - E_i < E_0$

Ersatzschaltbild des verlustbehafteten Kondensators

- **Polarisierung der Materie benötigt eine gewisse Zeit und Energie.**
- Im **Wechselfeld** entstehen durch fortwährende Umpolarisierung **dielektrische Verluste.**
- Daher fließt neben dem **kapazitiven Strom I_b** auch ein geringer **Wirkstrom I_w** durch den Kondensator.
- Die dielektrischen Verluste des Kondensators können in einem **Ersatzschaltbild** z.B. durch einen parallelen Widerstand berücksichtigt werden.

Ferner gilt: $\delta = 90^\circ - \varphi$.

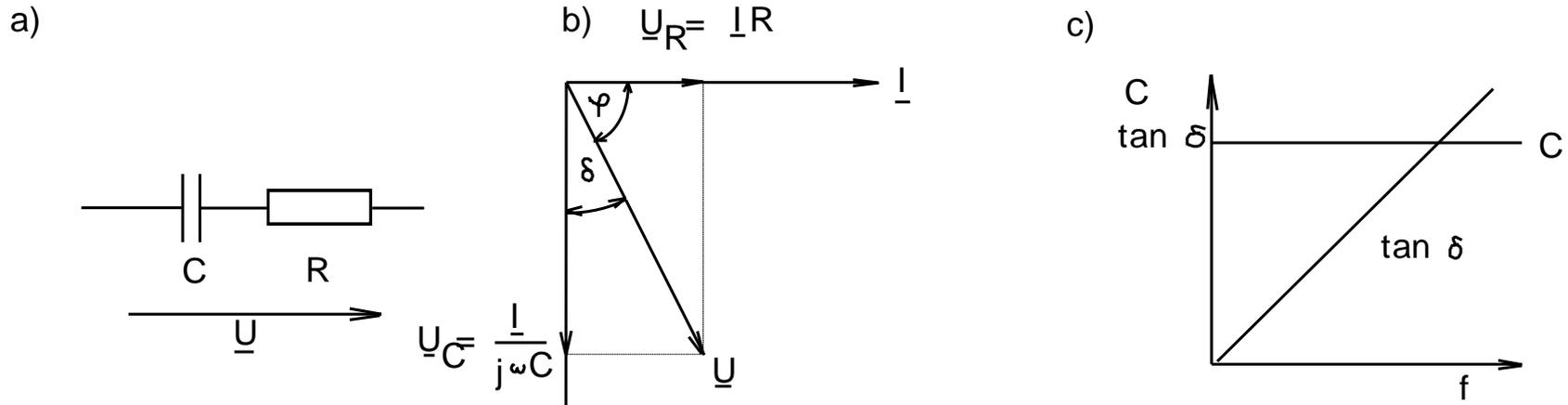
Für den Verlustfaktor $\tan \delta$ erhält man für die Parallelersatzschaltung: $\tan \delta = \frac{1}{R\omega C}$



Ersatzschaltbild des verlustbehafteten Kondensators

- Wählt man eine **Seriensersatzschaltung**, so gilt für den Verlustfaktor $\tan \delta$:

$$\tan \delta = R \omega C$$



Für eine feste Frequenz kann jedes **Parallelersatzschaltbild** in ein äquivalentes **Seriensersatzschaltbild** umgewandelt werden und umgekehrt.

Aufgaben flüssiger Isolierstoffe

Meist gleichzeitig **mehrere Aufgaben:**

- **Isoliermittel** zwischen spannungsführenden Teilen (z.B. Transformatoren)
- **Kühlmittel** (z.B. Transformatoren)
- **Imprägniermittel für geschichtete Dielektrika**
(z.B. Öl / Papier-Dielektrika in Transformatoren, Kabeln und Kondensatoren)
- **Dielektrikum besonders hoher Dielektrizitätskonstante**
(z.B. in Kondensatoren)
- **Löschmittel** für Lichtbögen (z.B. in Ölschaltern)

Wichtigster flüssiger Isolierstoff

Mineralöl: (wichtigstes flüssiges Isoliermittel)

Vorteile:

- Hohe Durchschlagsfestigkeit,
- gute Wärmeleitfähigkeit und
- gute chemische Beständigkeit;

Nachteile:

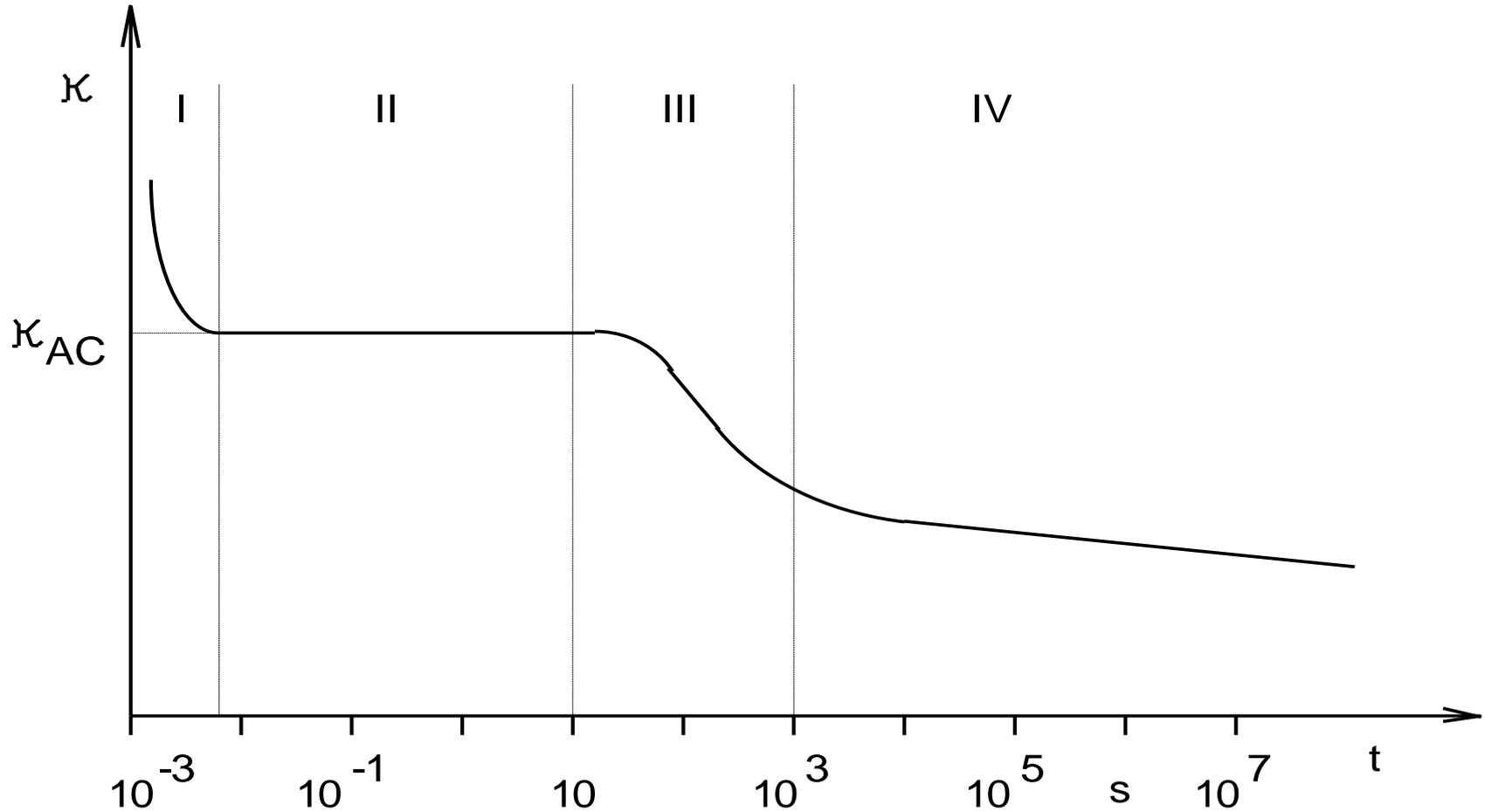
- leichte Brennbarkeit.
- $\tan \delta$ nimmt mit der Temperatur stark zu!

Verluste in flüssigen Isolierstoffen

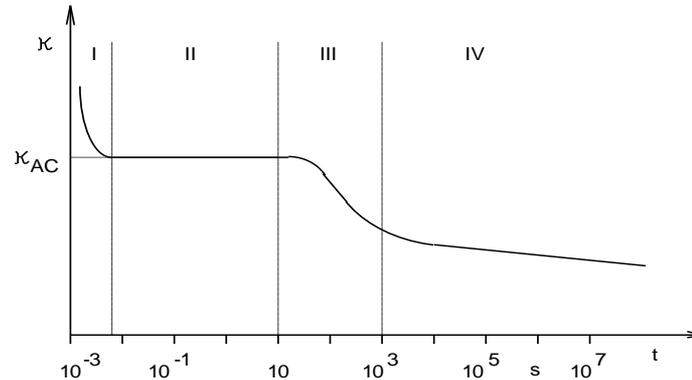
Gleichstromleitfähigkeit

- Der Ladungstransport in flüssigen Isolierstoffen erfolgt vorwiegend durch Ionen.
- Ionenentstehung durch Dissoziation von Verunreinigungen bzw. Alterungsprodukten in der Flüssigkeit.
- Der Einfluss von stets auch vorhandenen Elektronen ist bei nicht zu hohen Feldstärken gering, (freie Elektronen rekombinieren sehr rasch wieder mit positiven Ionen und neutralen Molekülen unter Bildung negativer Ionen).
- Charakteristischer Verlauf der Gleichstromleitfähigkeit von Flüssigkeiten mit der Zeit
 - ➔ **abnehmende Leitfähigkeit mit der Dauer der Spannungsbeanspruchung**

Gleichstromleitfähigkeit eines Isolieröls als Funktion der Beanspruchungszeit



Gleichstromleitfähigkeit eines Isolieröls als Funktion der Beanspruchungszeit



- Bereich I:** Steile Stromabnahme mit der Orientierung von Dipolen
- Bereich II:** Bewegung der freien Ladungsträger zu den Elektroden unter dem Einfluss des elektrischen Feldes. Die Leitfähigkeit in diesem Bereich entspricht der bei 50 Hz gemessenen Wechselstromleitfähigkeit.
- Bereich III:** Stromabnahme durch Verarmung der Isolierflüssigkeit an schnellen Ladungsträgern und Aufbau von Raumladungen vor den Elektroden.
- Bereich IV:** Stationärer Strom aufgrund von Ionen die durch Dissoziation kontinuierlich neu entstehen.

Ladungsträgerkonzentration in Isolierflüssigkeiten ist temperaturabhängig und steigt mit zunehmender Temperatur.

Verluste in flüssigen Isolierstoffen

Wechselstromleitfähigkeit

Trägerleitung, Ionenleitung

- Ionenleitung im Wechselfeld:
Gleiche grundlegende Mechanismen wie für die Gleichstromleitfähigkeit mit der Verschiebung freier Ladungsträger durch das elektrische Feld (bei nicht zu hohen Frequenzen)
- Da in Isolierflüssigkeiten die Ladungsträger vorwiegend aus Ionen bestehen, spricht man allgemein auch von "**Ionenleitung**".

Besserer Begriff : "**Trägerleitung**",
(deckt auch den bei hohen Feldstärken zunehmenden Anteil an Elektronenprozessen ab).

- Für beide Ladungsträgerarten bedeutet ihre Verschiebung im Wechselfeld eine Wechselstromleitfähigkeit
(Größe entspricht bei 50 Hz exakt dem Wert der Gleichstromleitfähigkeit nach 10^{-2} s Beanspruchungszeit).

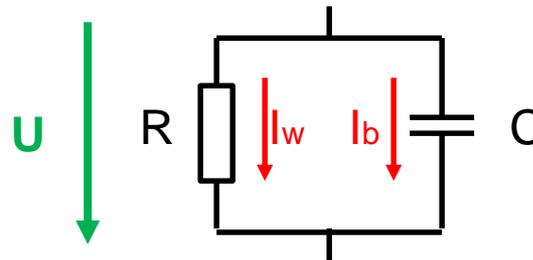
Verluste in flüssigen Isolierstoffen

Wechselstromleitfähigkeit

Ladungsträgerverschiebung im Wechselfeld

→ Endlicher ohmscher Widerstand R der Isolierflüssigkeit

Ersatzschaltbild:



$\tan \delta_L$ ("Verlustfaktor aus Trägerleitung,") für Parallelersatzschaltung aus R und C:

$$\tan \delta_L = \frac{1}{R \omega \epsilon_r \cdot C_0}$$

$\tan \delta_L$ ist bei konstanter Temperatur nur von der Frequenz abhängig.

Verluste in flüssigen Isolierstoffen

Wechselstromleitfähigkeit

Polarisationsverluste in Isolierflüssigkeiten

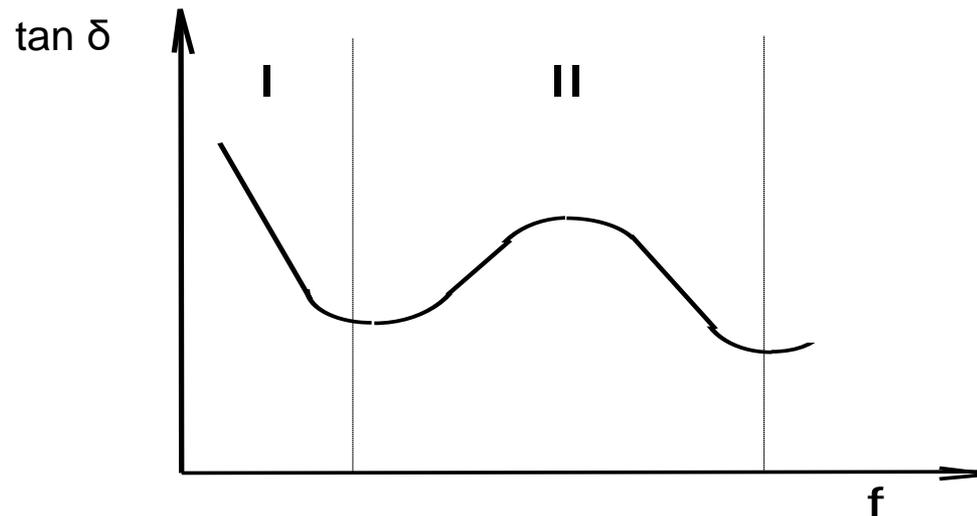
Dominierender Polarisationsmechanismus in Isolierflüssigkeiten:
Orientierungspolarisation

→ Allein der **Frequenzgang der komplexen Dielektrizitätszahl $\underline{\epsilon}_r$** bestimmt die Frequenzabhängigkeit der Polarisationsverluste.

Prinzipieller Verlauf des $\tan \delta$ für Isolieröl in Abhängigkeit von der Frequenz.

Bereich I:
Dominanz der Trägerleitfähigkeit

Bereich II:
Dominanz der Polarisationsverluste



Verluste in flüssigen Isolierstoffen

Wechselstromleitfähigkeit

Einflussgrößen auf den Verlustfaktor

Einflussgröße	Einfluss
gelöste Gase	Kein Einfluss feststellbar
Wassergehalt	Bei geringem Wassergehalt (z.B. Trafoöl bei unter ca. 30 ppm) nahezu unabhängig vom Wassergehalt. Mit zunehmendem Wassergehalt nahezu exponentielles Ansteigen des $\tan \delta$.
Feldstärke	Bei kleinen Feldstärken konstanter Verlustwiderstand (ohmscher Bereich) Bei Überschreiten des ohmschen Bereiches überproportionaler Anstieg des \tan mit der Feldstärke.
Temperatur	Höhere Temperaturen bewirken einen früheren Anstieg des Verlustfaktors mit der Feldstärke.

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Einflussparameter auf die Durchschlagfestigkeit:

- Dauer, Höhe und dem zeitlichen Verlauf der Spannung (Gleich-, Wechsel- und Stoßbeanspruchung)
- Form, Oberflächenbeschaffenheit und dem Material der Elektroden.
- Wasser- und Gasgehalt
- Verunreinigungen

→ unterschiedliche Theorien

Durchschlagsformen:

- **Verschleierte Gasentladung**
- **Faserbrückendurchschlag**

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Verschleierte Gasentladung

Kurzzeitige Wechsellspannungs- und besonders Stoßbeanspruchungen:

- Durchschlageinleitung aufgrund der hohen Feldstärke durch **aus der Kathode stammende Primärelektronen.**
- **Zusätzliche Ladungsträger durch Dissoziation**

Wien-Effekt:

Flüssige Isolierstoffe sind schwache Elektrolyte

- hohe Feldstärken
- Dissoziation (Aufspaltung von Molekülen in Ionen)
- neue Ladungsträger

- Zwischen Flüssigkeitsmolekülen sind sog. "**Leerstellen**" vorhanden
 - mit **leichtflüchtigen Ölkomponenten oder im Öl gelösten Fremdgasen**
 - Zusätzliche **Entstehung von Mikrohohlräume** durch Gasabscheidung unter elektrischem Feldeinfluss.
 - über Ionisierungsvorgänge **zusätzliche Gasentwicklung durch Ölersetzung und Überhitzung.**

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Verschleierte Gasentladung (Fortsetzung)

- **Vergrößerung der Ladungsträgerkonzentration durch Dissoziations- und Stoßionisationsprozesse (Zunahme der Stromstärke)**
- **Zusätzliche Erwärmung fördert Entstehung von Gasblasen.**
- **Gasblasen mit in ihnen ablaufenden Ionisierungsvorgängen**
 - **erhöhte Leitfähigkeit** der Blasen,
 - **Verzerrung der Feldverteilung**
 - Entstehung weiterer **Ladungsträgerlawinen**
 - Fortschreiten der Trägerlawine durch **Stoßionisation**
 - Gasentladungskanal leitet eine **Thermoionisation** ein
- **Vollkommenen Durchschlag der flüssigen Isolierstrecke.**

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

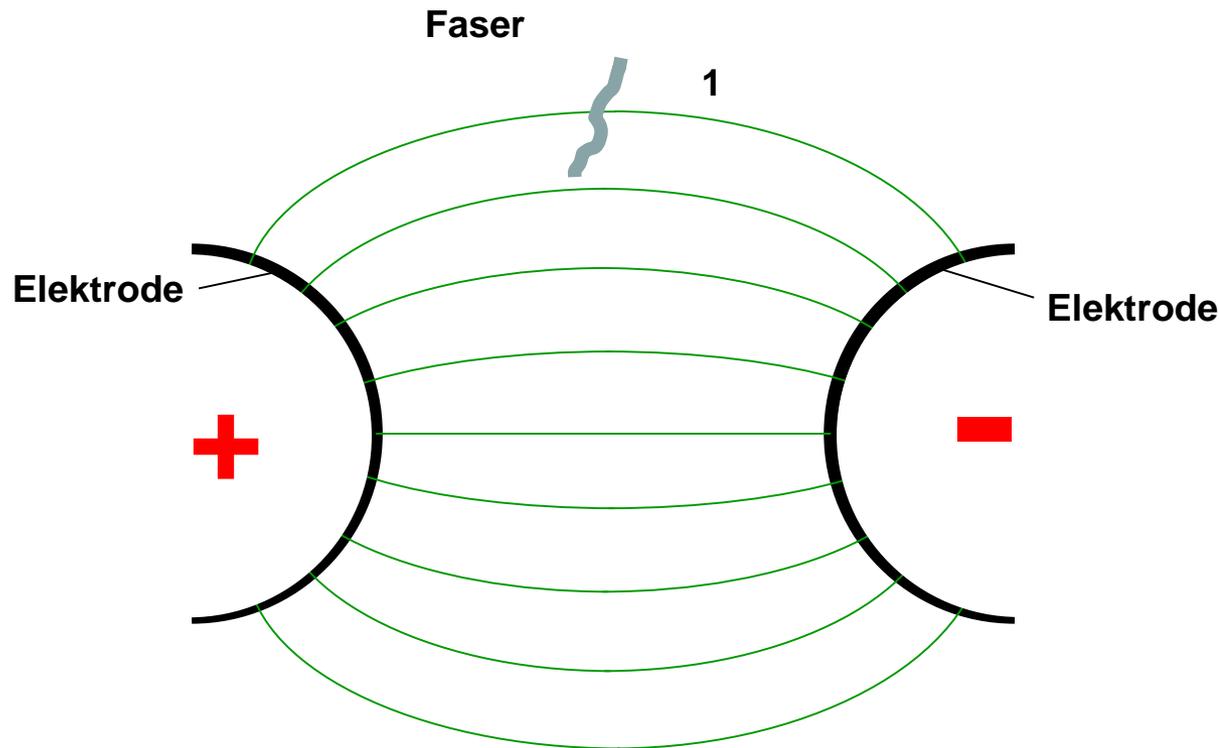
Faserbrückendurchschlag

Feuchtigkeitsaufnahme von in der Isolierflüssigkeit enthaltenen Fasern
z.B. durch

- **Ablösung von Cellulosefasern aus der Papierisolation oder sonstige unlösliche Teilchen**
 - **Vergrößerung ihrer Dielektrizitätszahl**
 - **Polarisation der Fasern** im elektrischen Feld
 - **Wanderung in den Bereich maximaler Feldstärke**
 - **Aneinanderlagerung und Brückenbildung**
 - **erhöhte Leitfähigkeit zwischen den Elektroden**
- **Erhöhte lokale Stromdichte in den Faserbrücken**
 - **Joul'sche Wärmeentwicklung**
 - **Verdampfung der vorhandenen Feuchtigkeit** sowie **niedrigsiedender Flüssigkeitskomponenten** in der Faserumgebung.
- **Gasbläschenbildung** und in der Folge **vollständiger Durchschlag**

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Faserbrückendurchschlag - Faserwanderung



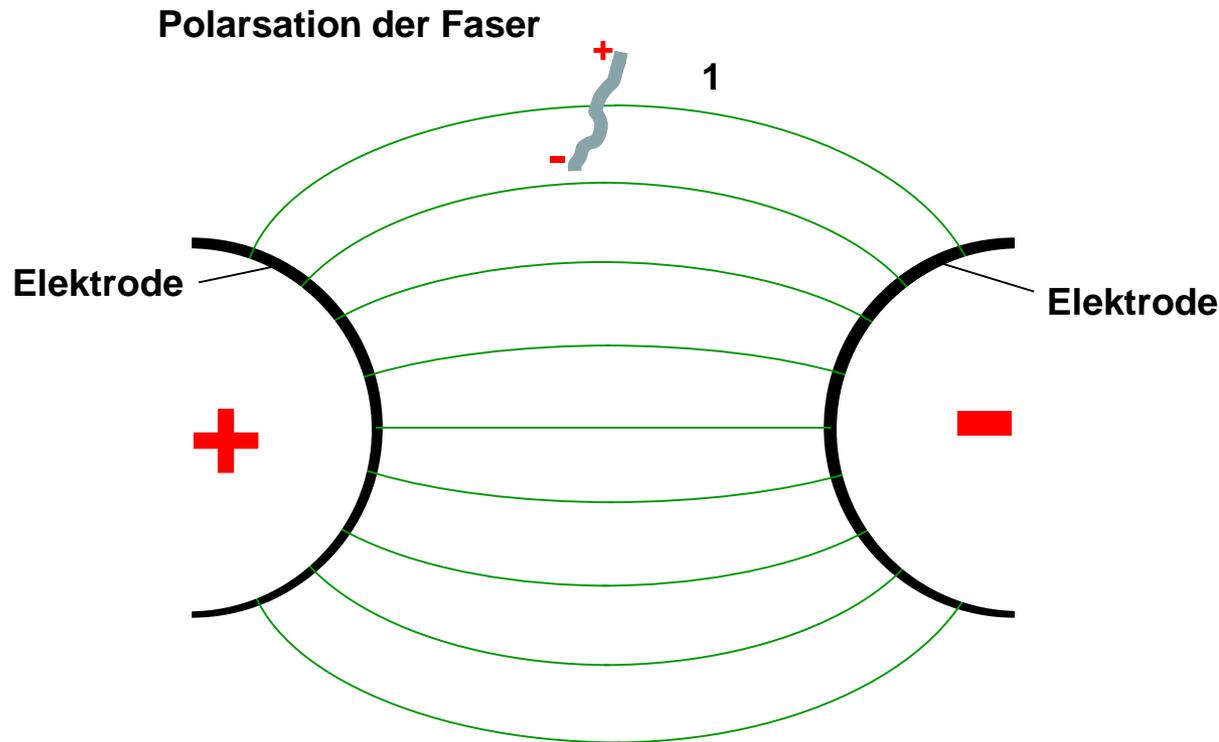
Entstehung einer
Faserbrücke

Elektrisches Feld von
2 Kugelelektroden

1 Faser (beliebige Position)

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Faserbrückendurchschlag - Faserwanderung



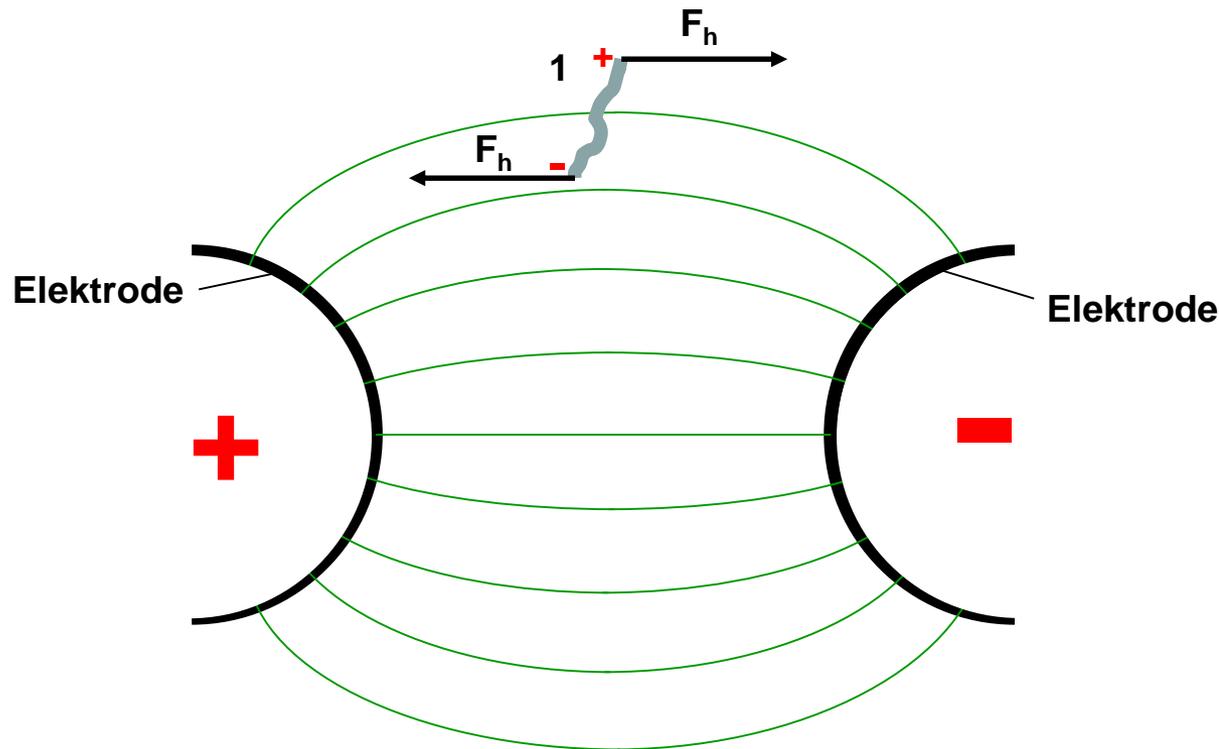
Entstehung einer
Faserbrücke

Elektrisches Feld von
2 Kugelelektroden

1 Faser (beliebige Position)

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Faserbrückendurchschlag - Faserwanderung



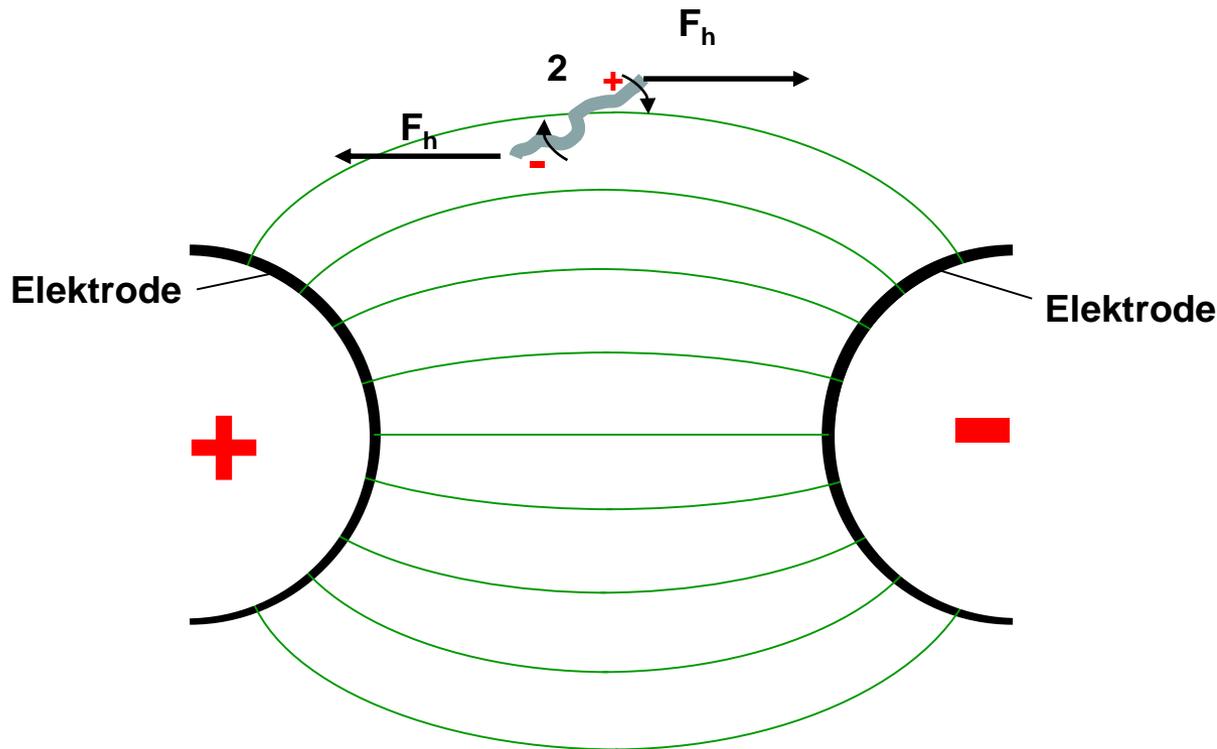
Entstehung einer
Faserbrücke

Elektrisches Feld von
2 Kugelelektroden

1 Faser (beliebige Position)

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Faserbrückendurchschlag - Faserwanderung



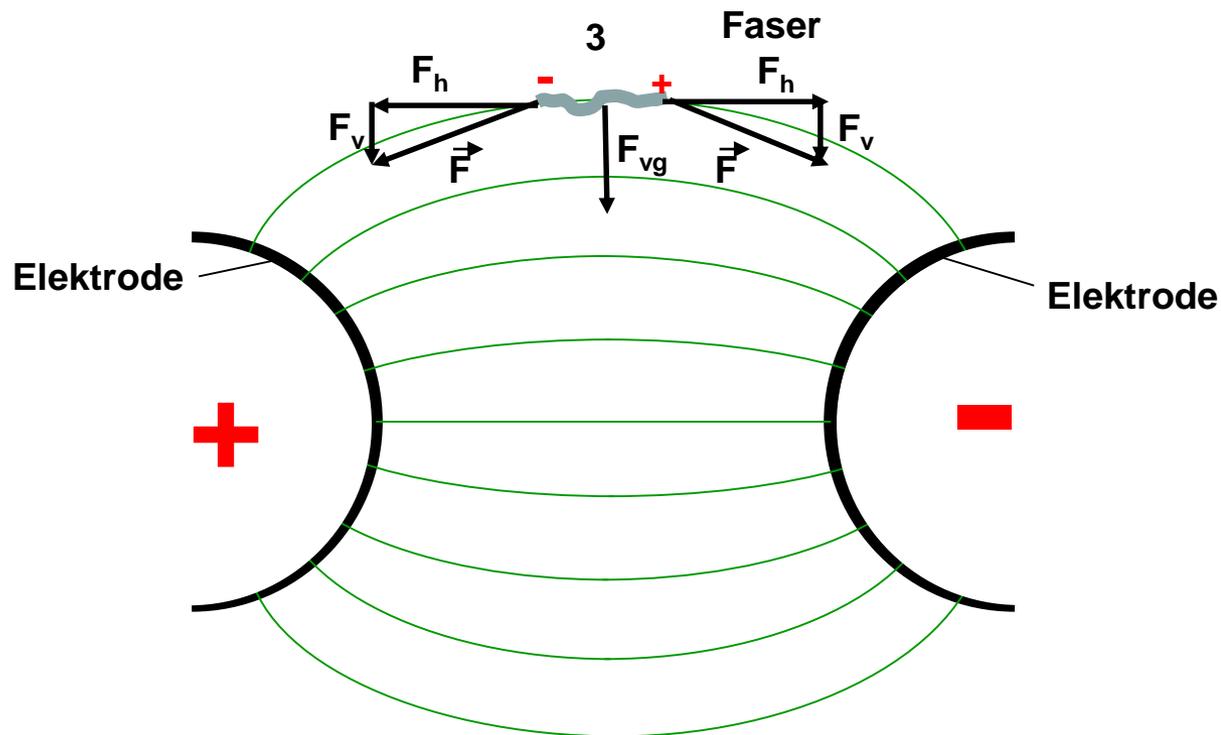
Entstehung einer Faserbrücke

Elektrisches Feld von 2 Kugelelektroden

- 1 Faser (beliebige Position)
- 2 Drehung der Faser

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Faserbrückendurchschlag - Faserwanderung

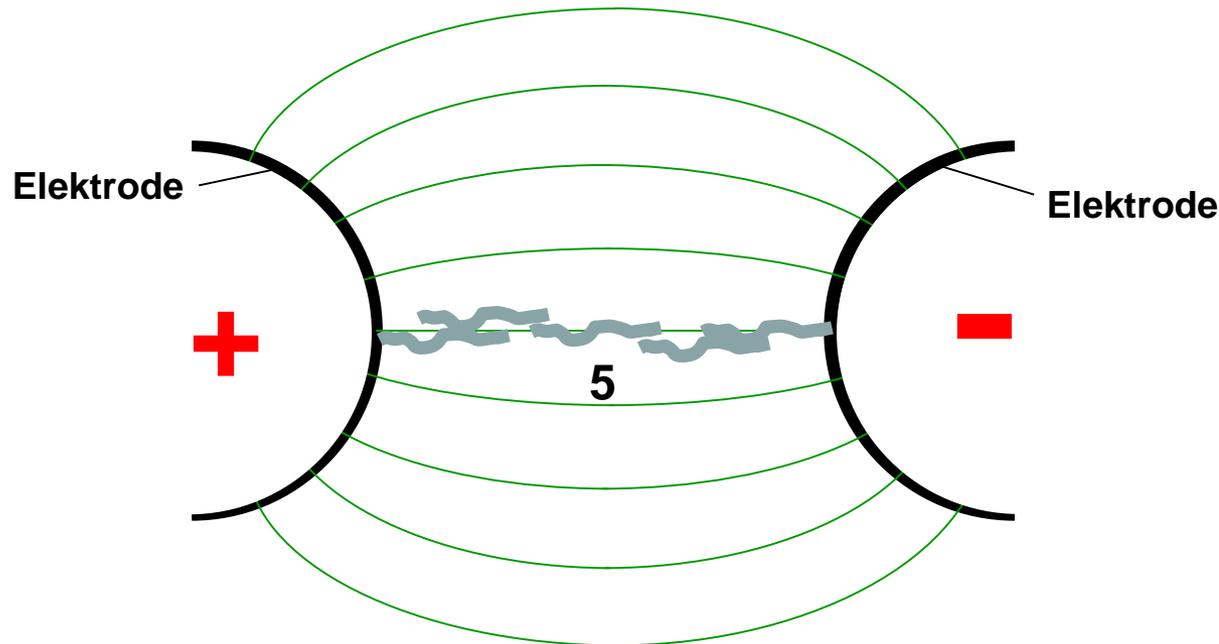


Entstehung einer Faserbrücke

- 1 Faser (beliebige Position)
- 2 Faser (gedreht)
- 3,4 Faser (wird nach unten gezogen)

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Faserbrückendurchschlag - Faserwanderung



Entstehung einer Faserbrücke

- 1 Faser (beliebige Position)
- 2 Faser (gedreht)
- 3,4 Faser (wird nach unten gezogen)
- 5 Faserbrücke

Durchschlagtheorien bei flüssigen Isolierstoffen

Einfluss von Temperatur, Gas- und Wassergehalt auf die Durchschlagfestigkeit von Mineralöl (Transformatoröl)

Wassergehalt:

- **niedriger Wassergehalt** (5 - 10 ppm) nahezu unabhängig von der Temperatur,
- **höhere Wassergehalte** (ca. 20 - 200 ppm) zwar herabgesetzt, steigt jedoch mit zunehmender Temperatur an.

Entscheidend: **relative Ölfeuchte** (d.h. im Öl enthaltene Wassermenge bezogen auf die Sättigungskonzentration bei der Temperatur T).

Relativer Feuchte \uparrow \rightarrow elektrische Durchschlagfestigkeit \downarrow

Übersättigter Bereich: (d.h. r.F. > 100% , d.h. Emulsion von Wasser im Öl)

\rightarrow Durchschlagfeldstärke bleibt auf etwa konstant niedrigem Niveau.

Gasgehalt:

- **Gelöstes Gas**: Unabhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von der Gasmenge (lediglich die Gasart hat Einfluss).
- **Gasbläschen**: Markante Herabsetzung der elektrische Festigkeit durch Teilentladungsvorgänge

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

- Grundsätzlich gleiche Leitungs- und Verlustmechanismen wie in flüssigen Isolierstoffen
- Besondere Gesichtspunkte:
 - Neben Leitungs- und Polarisationsverlusten ggf. noch zusätzliche **Ionisationsverluste**.
 - **Fehlende Wärmeabfuhr durch Konvektion**
 - ➔ ermöglicht starke auch lokale Erwärmung des Dielektrikums
 - ➔ möglicherweise Zerstörung.
 - ➔ Besondere Beachtung aller verschiedenen Verlustarten.

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Gleichstromleitfähigkeit

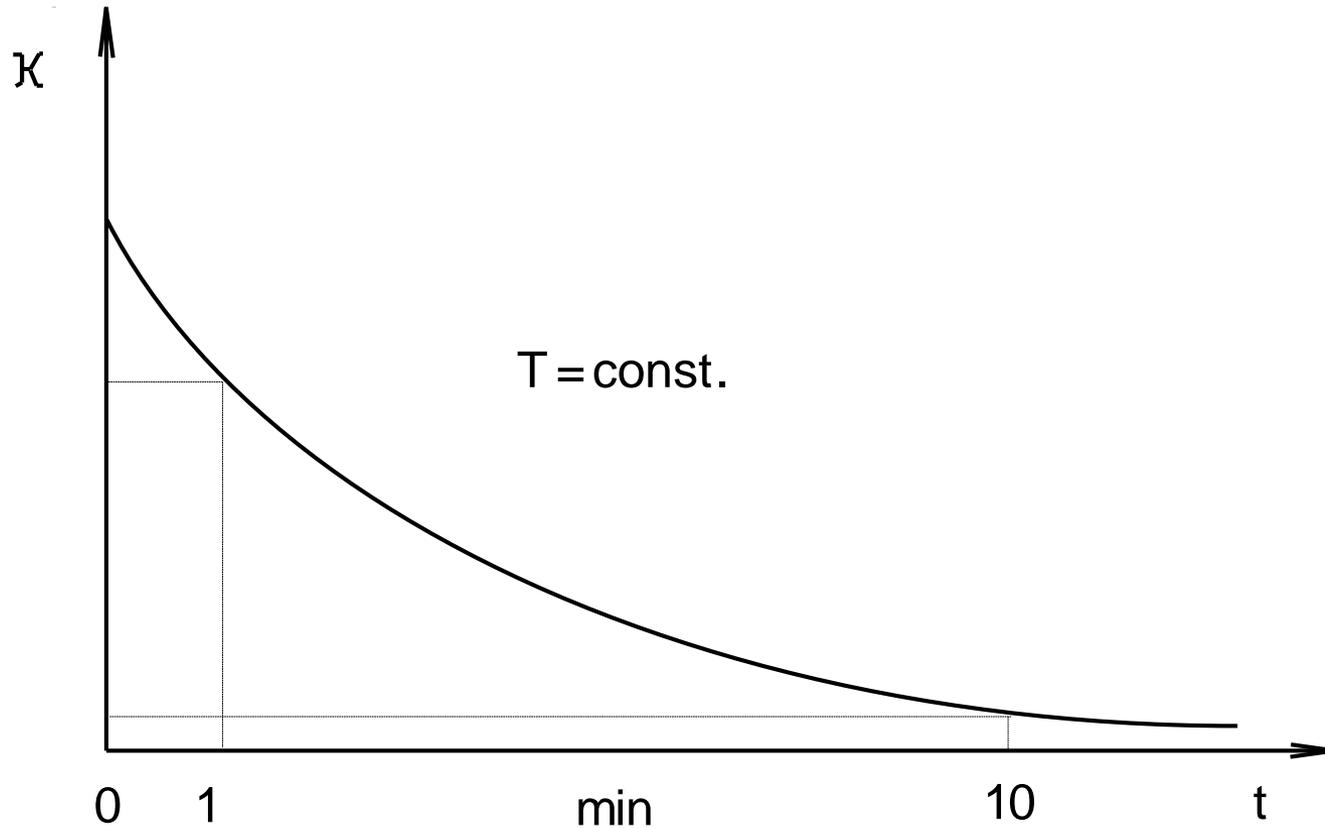
- **Beitrag mehrerer, teilweise zeitabhängiger Einzelmechanismen, die nach Abschluss bestimmter Zeiten zur Gesamtleitfähigkeit keinen Beitrag mehr leisten.**

→ Folge für alle festen Isolierstoffe:

- Charakteristische Verringerung der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit mit zunehmender Dauer der Spannungsbeanspruchung entsprechend der Beweglichkeit der jeweiligen Ladungsträger

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Zeitabhängigkeit der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit



Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen Zeitabhängigkeit der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit

Ursachen der Leitfähigkeitsabnahme: zeitlich begrenzte Mechanismen

Mechanismus	Dauer
- Verschiebung positiver und negativer Ladungsschwerpunkte in ursprünglich neutralen und unpolaren Atomen und Molekülen in (Deformationspolarisation)	Bruchteile einer ps
- Ausrichtung nach außen neutraler, jedoch polarer Moleküle (Orientierungspolarisation permanenter Dipole, z.B. H ₂ O).	bis zu mehreren Stunden
- Verschiebung von Ladungsträgern im gesamten Volumen bis in den Randbereich der Elektroden	bis zu Wochen
- Abwanderung von Ladungsträgern in die Elektroden und Rekombination von Ladungsträgern im Isolierstoff (Ladungsträgerverarmung)	bis zu Monaten
- Injektion von Elektronen aus der Kathode in den Isolierstoff und Speicherung im Dielektrikum (Elektronenanreicherung bewirkt den Aufbau einer homopolaren Raumladung vor der Kathode)	bis zu Monaten

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Zeitabhängigkeit der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit

Stationärer Anteil der Gleichstromleitfähigkeit:

- **Elektronen und Ionen, die im gesamten Isolierstoffvolumen frei beweglich sind.**

(müssen nach ihrer Entladung an den Elektroden oder ihrer Rekombination laufend durch die gleiche Anzahl neu entstehender Ladungsträger ersetzt werden).

Ersatz-Mechanismen:

- Ionenentstehung durch Dissoziation von Fremdmolekülen (z.B. eindiffundierte Luft, Feuchte, Verunreinigungen usw.)
- Herauslösen einzelner Bausteine des Isolierstoffes durch thermisch bzw. von Strahlung angeregte Molekülstöße (Gitterschwingungen)
- Elektronenstoßionisation

Die **Bereitstellung neuer Elektronen** erfolgt fast ausschließlich durch **Injektion aus der Kathode.**

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen Zeitabhängigkeit der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit

Vielzahl unterschiedlicher Mechanismen für Gleichstromleitfähigkeit
→ integrale Leitfähigkeitsmessung allein ermöglicht
keine Auskunft über die beteiligten Mechanismen

Prüfverfahren mit Messzeiten von nur 1 min (z.B. VDE 0303 Teil 3)

**Willkürliche in der Norm festgelegte Messzeit
um eine Vergleichbarkeit von Messwert zu erreichen.**

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Einfluss der elektrischen Feldstärke

Prinzipielle Abhängigkeit der Gleichstromleitfähigkeit von der Feldstärke

Bereich I:

geringe Feldstärke
ausschließlich **Ionenleitfähigkeit** und verschiedene Polarisationsvorgänge

Bereich II:

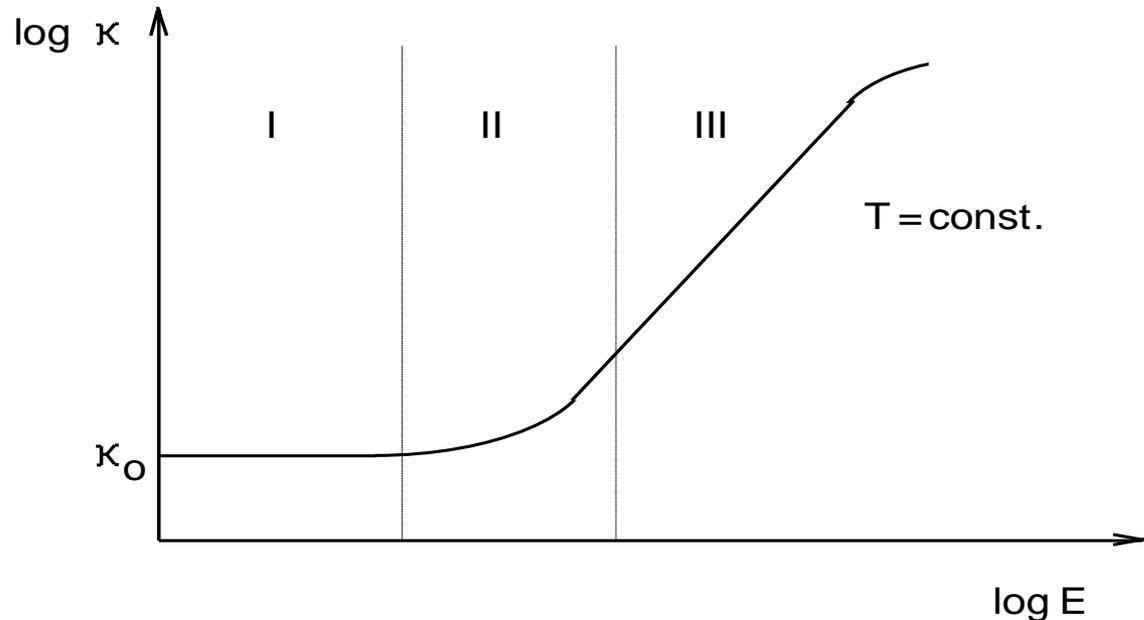
mittlere Feldstärke
(ca. 1 kV/mm)

Zunehmende Überlagerung des von Ionenverschiebung dominierten Ladungstransports durch Elektronenprozesse

Bereich III:

hohe Feldstärken

Potenzieller Leitfähigkeitsanstieg mit der Feldstärke bei nahezu ausschließlich von Elektronenprozessen bestimmten Transportmechanismen.



Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Temperatureinfluss

- Wie bei flüssigen Isolierstoffen
- Zunahme der Gleichstromleitfähigkeit mit der Temperatur

- **Ursache:**

Anstieg der Beweglichkeit und Anzahl der an den Verschiebungs- und Wanderungsprozessen beteiligten Ladungsträger mit steigender Temperatur (z.B. zunehmende thermische Dissoziation im Fall von Ionen).

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Wechselspannungsverluste

Grundsätzlich können **alle Mechanismen, die bei Gleichspannung am Ladungstransport beteiligt sind** auch dielektrische Verluste im Wechselfeld verursachen.

Zusätzlich:

Teilentladungen, die durch fortlaufende Ionisations- und Entladungsprozesse zu den Verlusten beitragen

$$\tan \delta = \tan \delta_L + \tan \delta_P + \tan \delta_{TE}$$

mit:

- $\tan \delta_L$ Verlustfaktor durch Leitungsvorgänge (Ionen, Elektronen)
- $\tan \delta_P$ Verlustfaktor durch Polarisationsvorgänge (Deformations-, Orientierungs-, Grenzflächenpolarisation)
- $\tan \delta_{TE}$ Verlustfaktor durch Teilentladungsverluste

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Wechselspannungsverluste

Leistungsverluste

Leitfähigkeitsanteil bei Wechselspannung durch freie Elektronen und Ionen, die auch für den stationären Anteil der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit κ_{∞} verantwortlich sind.

Die Komponente des Verlustfaktors durch Leitungsvorgänge ergibt sich zu

$$\tan \delta_L = \frac{\kappa_{\infty}}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}$$

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Wechselspannungsverluste

Leistungsverluste

Einflussgrößen:

- **Temperatur- als auch die Feldstärkeabhängigkeit** der Leitungs Komponente
→ identisch mit derjenigen der Gleichstromleitfähigkeit
- **Bereitstellungsmechanismen und Quellen der beteiligten Ladungsträger**
→ wie bei Gleichspannung.

Jedoch

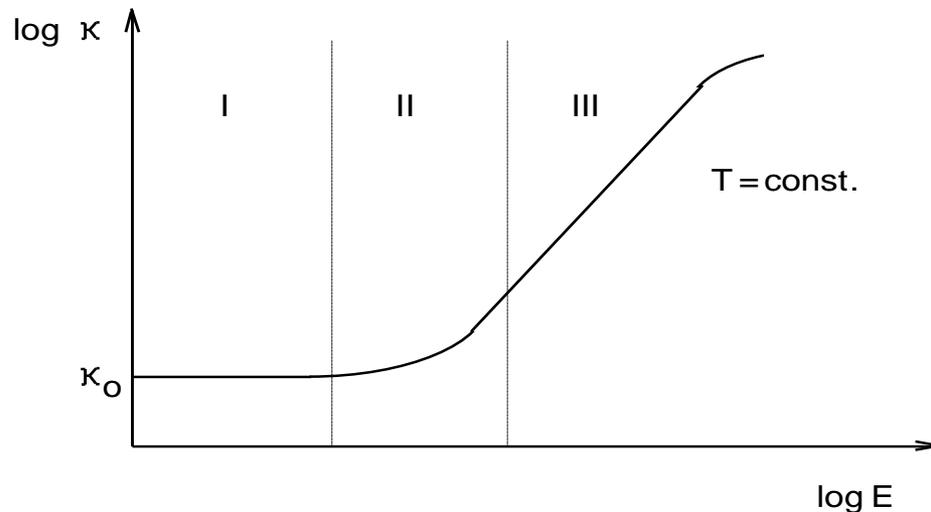
- **Abweichungen gegenüber dem Gleichspannungsverhalten:**

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Wechselspannungsverluste

Leitungsverluste

- **Abweichungen gegenüber dem Gleichspannungsverhalten:**



- **Übergang vom feldstärkeunabhängigen Ionenleitungsbereich in das durch Elektronenvorgänge bestimmte Hochfeldgebiet II und III** erfolgt bei AC erst bei wesentlich höheren Feldstärken (ca. 5 kV/mm und >100 kV/mm gegenüber 0,5 bis 2 kV/mm).

Ursache:

Mitwirkung von Polarisationsvorgängen am Verlustfaktor bei niedrigen Spannungen.

- **Der Verlustfaktor im Hochfeldgebiet III ist gegenüber dem der Gleichstromleitfähigkeit um ca. eine Größenordnung höher.**

Ursache:

Einmal bereitgestellte Ladungsträger bleiben im Dielektrikum, da nicht eine eindeutig gerichtete Feldkraft wie bei DC auf die Ladungsträger einwirkt.

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Wechselspannungsverluste

Polarisationsverluste

Zu den Gesamtverlusten bei festen Isolierstoffen tragen im Gegensatz zu flüssigen Isolierstoffen alle Polarisationsmechanismen bei:

- Deformationspolarisation,
- Orientierungspolarisation,
- Grenzflächenpolarisation

Grenzflächenpolarisation stellt dabei ein **typisches Feststoffphänomen** dar.

Grenzflächenpolarisation:

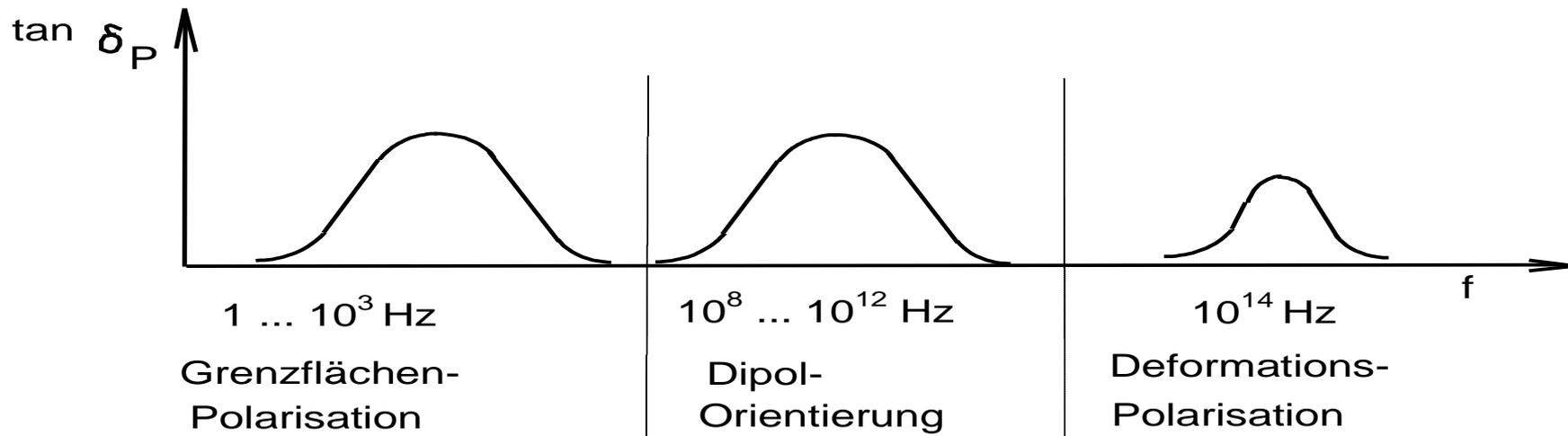
Freie Ladungsträger, die sich an Grenzflächen (z.B. Korngrenzen polykristalliner Materialien) ansammeln und im Takt der Wechselspannung umladen.

- ➔ Dielektrische Verluste, die stark temperatur- und frequenzabhängig mit jeweils ausgeprägten Maxima sind.

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen

Wechselspannungsverluste

Frequenzabhängigkeit der Polarisationsverluste



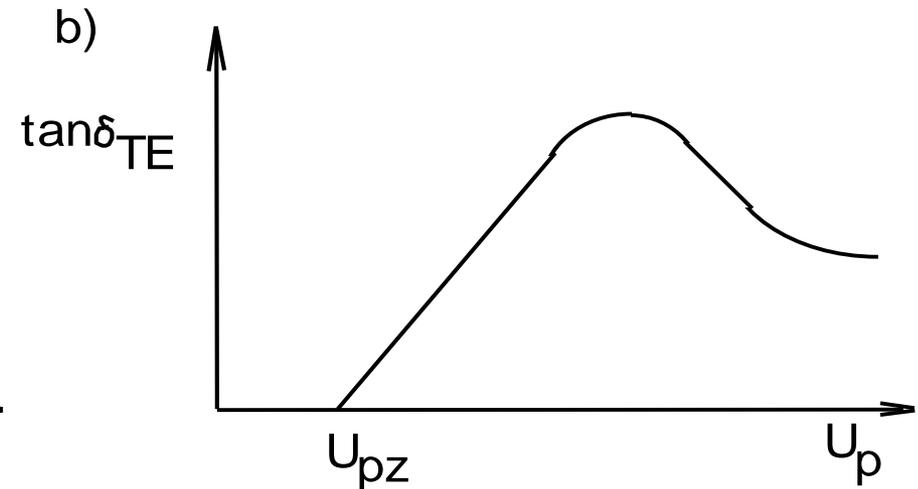
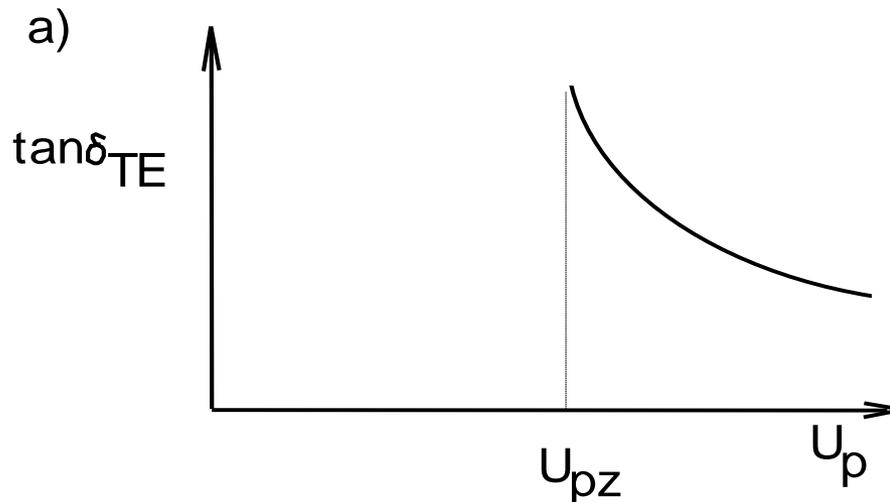
- Die einzelnen Maxima lassen sich dabei deutlich trennen.
- Obwohl die Maxima der verschiedenen Mechanismen über einen weiten Frequenzbereich auseinander liegen, können sie doch bei technischen Frequenzen (50 Hz) merkliche Beiträge liefern.

Grundlagen der Leitungs- und Verlustmechanismen in festen Isolierstoffen Wechselspannungsverluste

Ionisationsverluste / Teilentladungsverluste

Beispiele für mögliche Ursachen z:B.:

- Lunker,
- Verunreinigungen oder
- Metallspitzen



Prinzipielle Abhängigkeit der Verlustfaktorkomponente $\tan \delta_{TE}$ in Abhängigkeit von der Spannung U_p (U_{pz} Zündspannung)

a) Theoretischer Verlauf für einen Hohlraum

b) Verlauf bei vielen Hohlräumen mit unterschiedlichen Zündbedingungen

E N D E