

Durchschlag in Flüssigkeiten

Übersicht

1. Einleitung
2. Entladungsmechanismen in Öl
3. Einflussgrößen beim Öl-Durchschlag
4. Dielektrische Eigenschaften
5. Arten von Isolierflüssigkeiten
6. Anwendung von Isolierflüssigkeiten

1. Einleitung

Geschlossene Theorie

Für den Durchschlag in flüssigen Isolationsmedien existiert keine geschlossene Theorie

Schwierigkeit

Flüssige Isolierstoffe beinhalten oftmals eine Vielzahl von Stoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften, dazu kommt...

- Veränderungen in der Zusammensetzung
- Verunreinigungen
- Alterungserscheinungen

Verunreinigungen

Das Leitungs- und Durchschlagsverhalten wird massgeblich durch die Art und Stärke der Verunreinigung beeinflusst

- Gas/Wasser in Flüssigkeit
- Feststoffe in Flüssigkeit (Faserbrückendurchschlag)

1. Einleitung

Anwendung von flüssigen Isolierstoffen

Einsatzbeispiele:

- Transformatoren
- Wandler
- Leistungsschalter
- Kondensatoren
- Imprägnierungen

Vorteile:

- Hohe elektrische Festigkeit (im Vergleich zu Luft)
- Hohe Wärmeleitfähigkeit (Konvektion)

Nachteile:

- Hohes Gewicht
- Festigkeitsminderung durch Alterung und Verschmutzung
- Bedingt dichtes Gehäuse
- Brennbarkeit (bei Öl)

2. Entladungsmechanismen in Öl

Verschleierte Gasentladung

Ablauf

- 1) Vermutlich gibt es Gebiete niedriger Dichte im Öl (leichtflüchtige Ölkomponenten oder im Öl gelöste Fremdgase)
- 2) dort sind Stossionisation und Entladungsaufbau wie im Gas möglich
- 3) Stromstärke führt auf lokale Erwärmung, was zu mehr Gas führt
- 4) Feldverzerrung durch die Entladung im Gasbläschen führt auf Feldüberhöhung, welche zur Entladung im Öl führt

Wegen der Gasentladung:
„Verschleierte Gasentladung“

Hinweis auf Gasentladung:
 Druckabhängigkeit der Festigkeit!

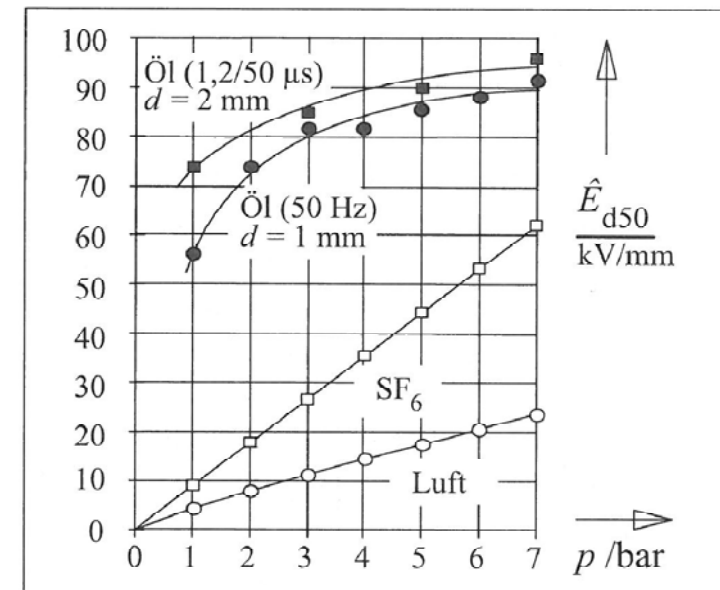


Bild 3.3.1-8: Druckabhängigkeit der elektrischen Festigkeit (50 %-Durchschlags-Scheitelwerte) für
 ○ Luft bei $d = 2 \text{ mm}$ (Gl. 3.2-25 mit $k = 5$),
 □ Schwefelhexafluorid bei $d = 2 \text{ mm}$ (Gl. 3.2-43),
 ● Öl bei Wechselspannung und $d = 1 \text{ mm}$ [60],
 ■ sowie Öl bei Blitzstoßspannung ($1,2/50 \mu\text{s}$) und $d = 2 \text{ mm}$ [66].
 (Küchler S. 210)

2. Entladungsmechanismen in Öl

Faserbrückenüberschlag

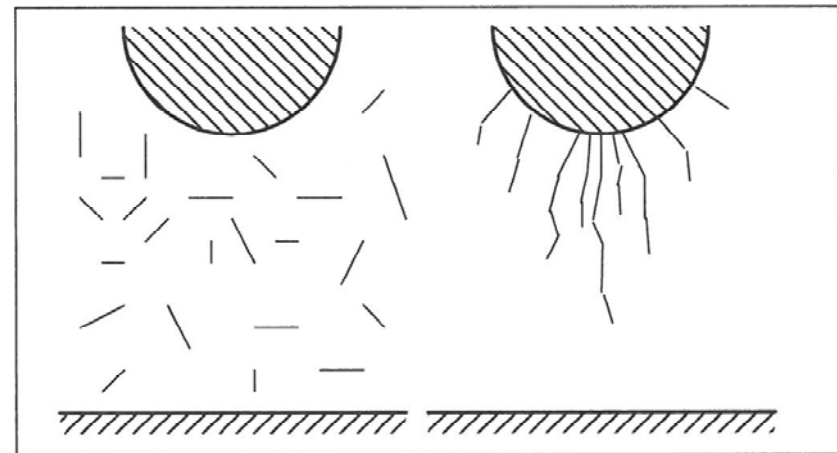
Ablauf

- 1) durch Alterung: Ablösung von Fasern und Partikel von Papierisolierungen, Barrieren etc. ins Öl
- 2) die Fasern sind i.d.R. hygroskopisch, durch das Wasser steigt ϵ_r stark
- 3) die damit stark polaren Fasern bewegen sich in Richtung hoher Feldstärke (Elektroden) und bilden **Faserbrücken**
- 4) durch hohe Leitfähigkeit: Starke Erwärmung, Wasser und niedrigsiedende Flüssigkeitskomponenten verdampfen

⇒ **Durchschlag**

Bemerkung:
Kann auch als lokaler
Wärmedurchschlag gedeutet werden

Abhilfe: **Barrieren**



(Küchler S. 209)

3. Einflussgrößen beim Öl-Durchschlag

Feuchtigkeit

Lösung

Mit zunehmender relativen Feuchte reduziert sich die Festigkeit dramatisch

Emulsion

Lösungsvermögen von Wasser in Öl überschritten
 $\Rightarrow$ Reduktion der Festigkeit auf 15-20%!

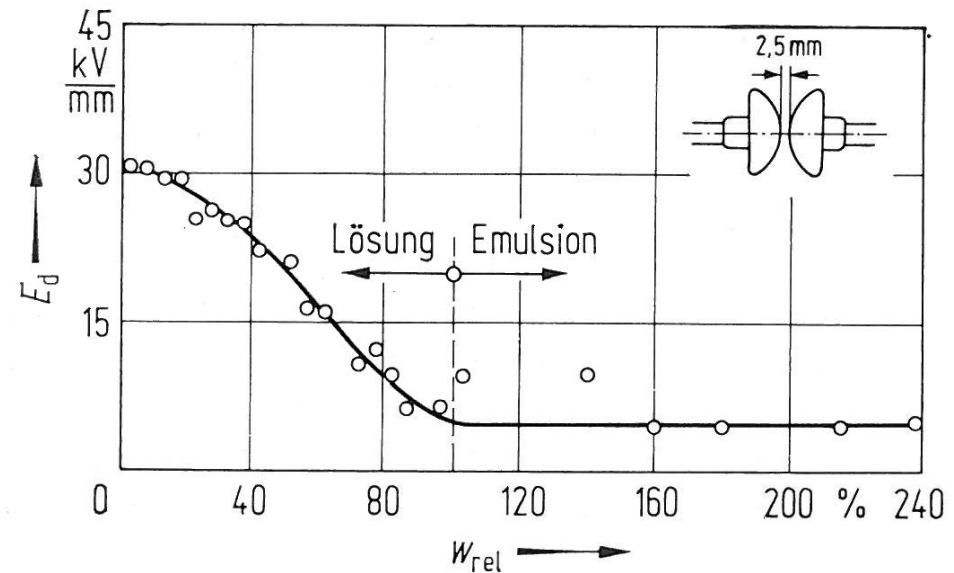


Bild 8.20. Durchschlagfeldstärke E_d von Isolieröl auf Mineralölbasis (Transformatoröl) in Abhängigkeit von der relativen Feuchte w_{rel} [8.2].

(Beyer S. 158)

3. Einflussgrößen beim Öl-Durchschlag

Feuchtigkeit

absolute Ölfeuchte:

Verhältnis von Wassermasse zu Ölmasse in einem Volumen:

$$w_{\text{abs}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{ÖL}}}$$

und wird meist in ppm (parts per million) angegeben. Ein ppm entspricht daher 1/1000 g Wasser pro 1 kg Öl.

relative Ölfeuchte:

Verhältnis von absoluter Ölfeuchte zur Sättigungsölfeuchte.

$$w_{\text{rel}} = \frac{w_{\text{abs}}}{w_{\text{sat}}}.$$

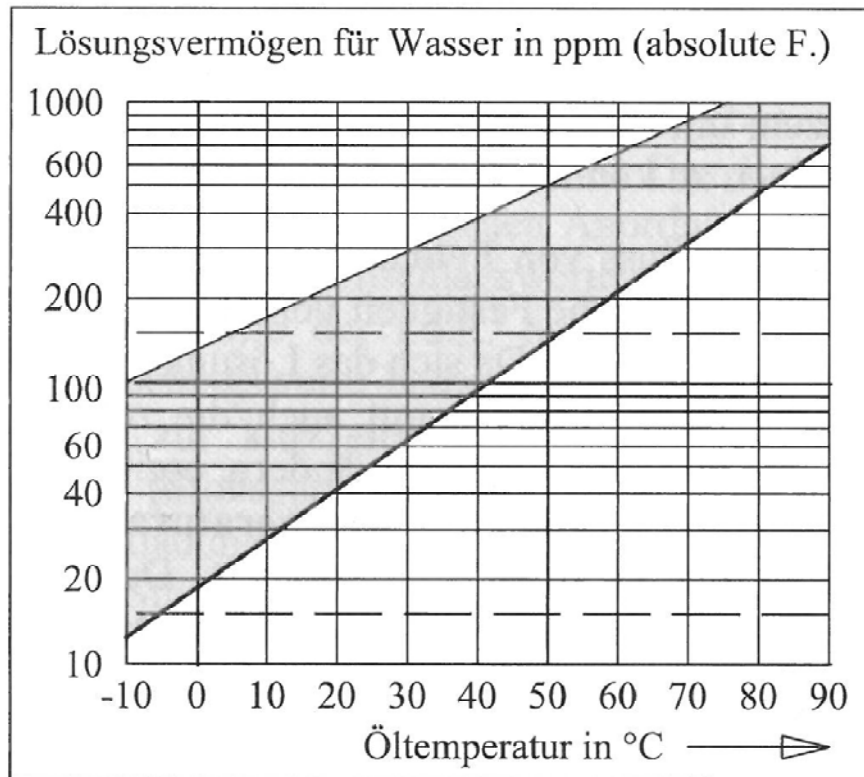
Die relative Ölfeuchte ist daher stark temperaturabhängig.

3. Einflussgrößen beim Öl-Durchschlag

Temperatur

Bedeutung der Temperatur

Maximale Löslichkeit von Wasser in Öl
ist **temperaturabhängig**:



(Küchler S. 210)

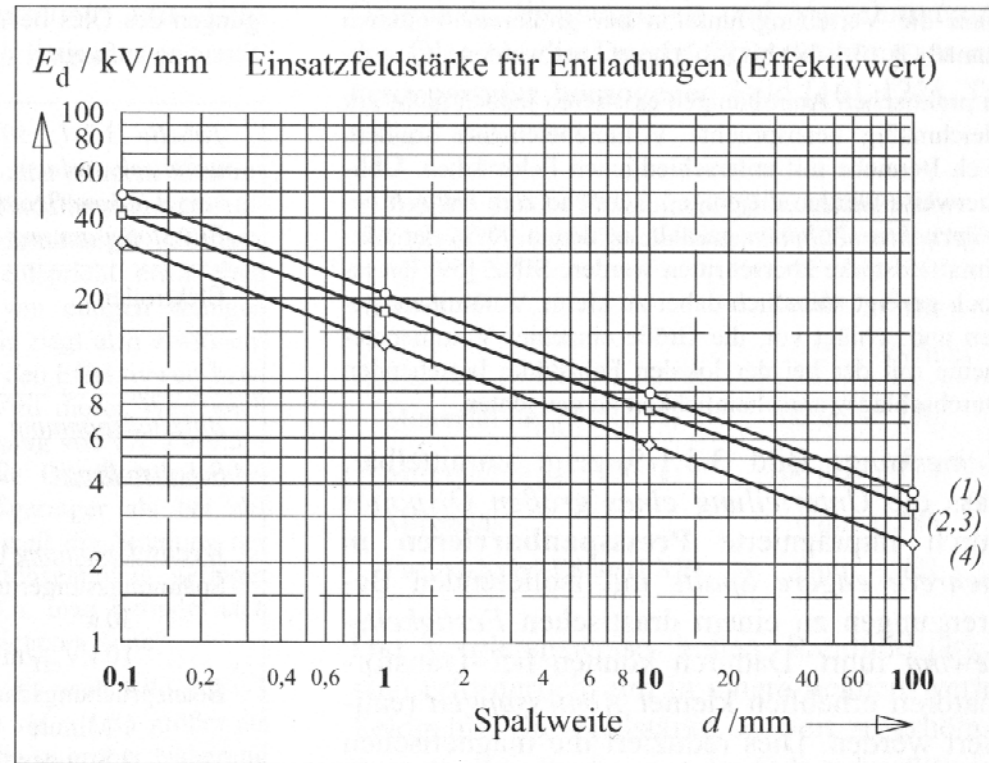
Absolute Feuchte in ppm bei Sättigung als Funktion der Öltemperatur für ein Mineralöl mit geringen Aromatengehalt (ca. 10%, untere Kurve) und für Aromate (100%, obere Kurve)

3. Einflussgrößen beim Öl-Durchschlag

Ölspaltweite

Elektrische Festigkeit von Ölspalten unter Wechselspannung (1 Minute, 50 Hz) als Funktion der Spaltweite für:

- (1) isolierte Elektroden und entgastes Öl
- (2) isolierte Elektroden und gasgesättigtes Öl
- (3) blanke Elektroden und entgastes Öl
- (4) blanke Elektroden und gasgesättigtes Öl



(Küchler S. 211)

⇒ Unterteilung mit Pressspanbarrieren in kleinere Spalten

3. Einflussgrößen beim Öl-Durchschlag

Fremdgase

Löslichkeit: Henry-Gesetz

Konzentration des gelösten Gases c_F ist dem Partialdruck des Gases p_G proportional ($K(T)$: temperaturabhängige Konstante)

$$c_F = K(T) \cdot p_G$$

Einbringung

- Teilentladungen (TE) an Spitzen oder schon vorhandenen Gasblasen: Nebst anderen Produkten bildet sich Wasserstoff (Festigkeit < als bei Luft!)
- Fehler beim Füllen, unzureichende Entgasung des Füllöls
- Alterung

Freies Gas

Extremer Festigkeitsverlust, an Gasblasen oder -schichten setzt wiederum TE ein

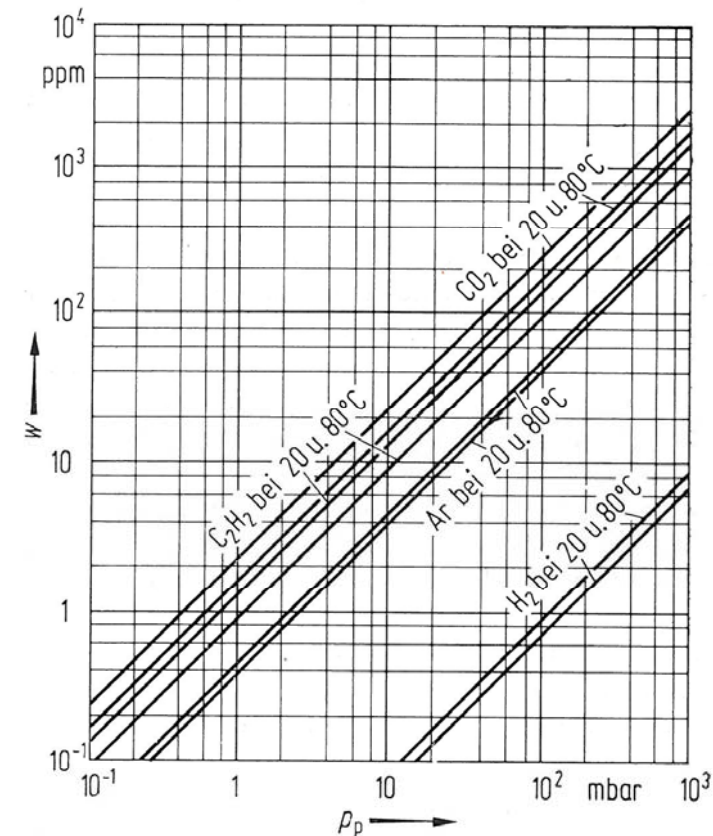


Bild 8.2. und 8.3. Gas- und Wasserdampfaufnahme w in Abhängigkeit vom Gas- bzw. Wasserdampfpartialdruck p_{part} bei 20 und 80 °C für Shell Diala D [8.7].

(Beyer S. 146)

3. Einflussgrößen beim Öl-Durchschlag Fremdgase

Ursache für Gase in Transformatoröl (Öl/Papier Isoliersystem):

- Abbauprodukte des Öls:
 - Wasserstoff, H_2
 - Methan, CH_4
 - Äthan, C_2H_6
 - Äthylen, C_2H_4
 - Acetylen, C_2H_2
- Abbauprodukte des Papiers:
 - Kohlenmonoxid, CO
 - Kohlendioxid, CO_2
 - Furane (incl Derivate)

Diese Gase können als **Indikatoren** für Fehlertypen, bzw. Alterung herangezogen werden ($\Rightarrow$ **Diagnosemessungen**)

4. Dielektrische Eigenschaften

Gleichstromleitfähigkeit

Ladungstransport

durch positive und negative Ionen (und bei höheren Feldstärken durch Elektronen).

Ionen entstehen durch Dissoziation von Verunreinigungen und Alterungsprodukten

Stromdichte

Im Gleichfeld $\mathbf{E}$ gilt für die Stromdichte $\mathbf{J} = q \cdot n \cdot b \cdot \mathbf{E}$

q : Ladung
 b : Mobilität
 n : Ionendichte

Wenn keine Sättigung oder Ionisation vorhanden, dann ist die Leitung ohmsch und die spezifische Leitfähigkeit $\kappa = q \cdot n \cdot b$ konstant

Mobilität

Die Mobilität (*aka* mittlere Beweglichkeit) kann durch die Formel für viskose Reibung $F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ abgeschätzt werden zu

$$b = \frac{q}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

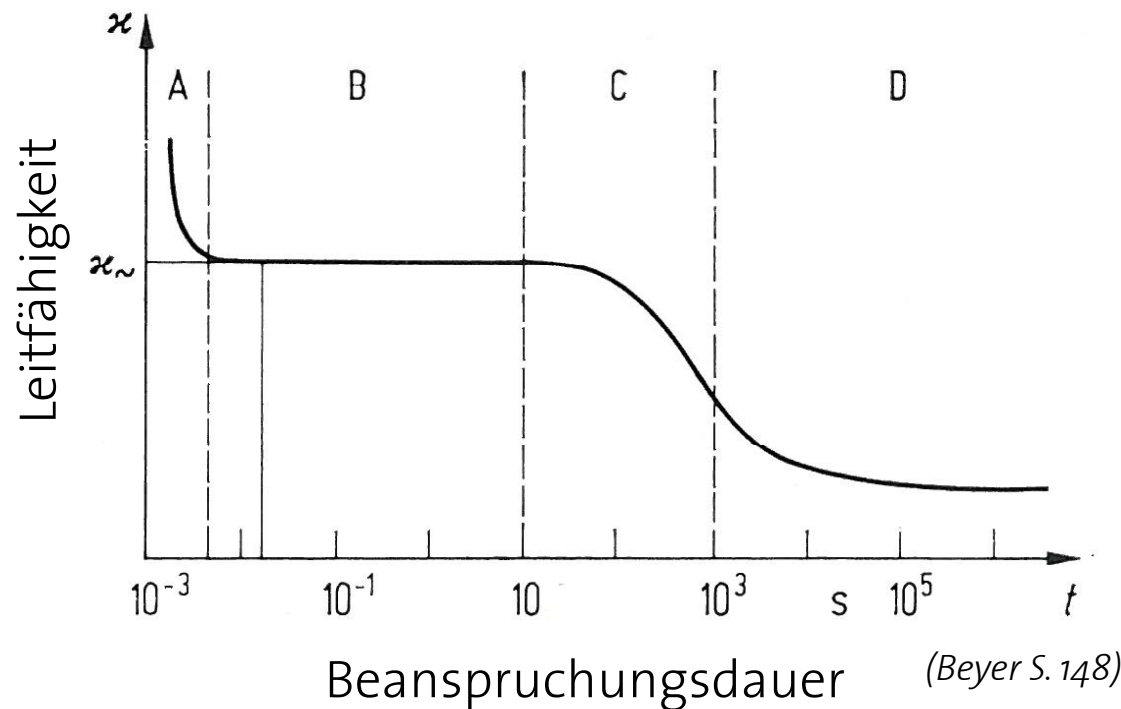
F_R : Reibungskraft
 v : Geschwindigkeit
 η : Viskosität
 r : Radius der Ionen

4. Dielektrische Eigenschaften

Gleichstromleitfähigkeit

Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer

Gleichstromleitfähigkeit ist abhängig von der Beanspruchungszeit (Bsp. eines Isolieröles):



- A: Orientierung von Dipolen
- B: freie Ladungsträger
- C: Verarmung von Ladungsträgern
- D: Gleichgewicht von produzierten zu abgesaugten Ionen.

Gleichstromleitfähigkeit

Bereich B entspricht der AC-Leitfähigkeit (50 Hz) und ist künftig z.T. mit „DC-Leitfähigkeit“ gemeint

4. Dielektrische Eigenschaften

Gleichstromleitfähigkeit

Abhängigkeit von der Temperatur

Im Bereich der ohmschen Leitfähigkeit kann die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit durch

$$\kappa = \kappa_0 e^{-\frac{F}{k \cdot T}}$$

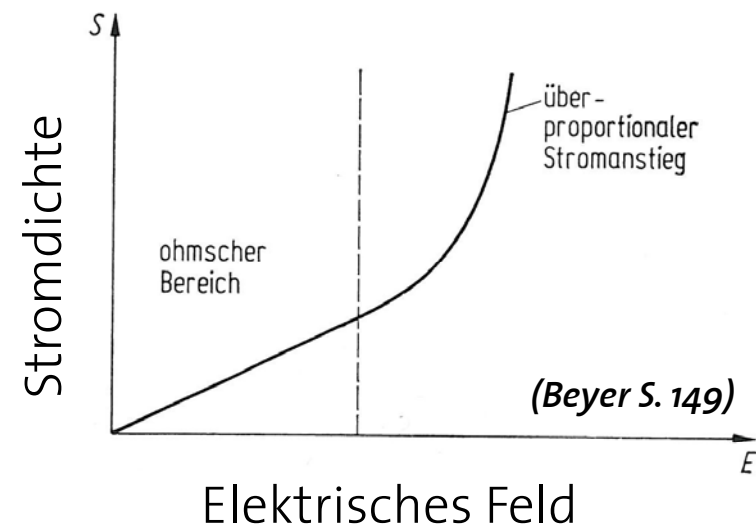
κ : Leitfähigkeit
 F : Stoffkonstante
 T : Temperatur

beschrieben werden (*Van t'Hoff'sches Gesetz*).

Nichtlinearität (Wien Effekt)

Bei höheren Feldstärken kommt es zum überproportionalen Anstieg der Stromdichte.

Erfolgt bei umso niedrigeren Feldstärken, je höher die Temperatur ist.



4. Dielektrische Eigenschaften

Gleichstromleitfähigkeit

Abhängigkeit von Verunreinigungen und Alterungsprodukten

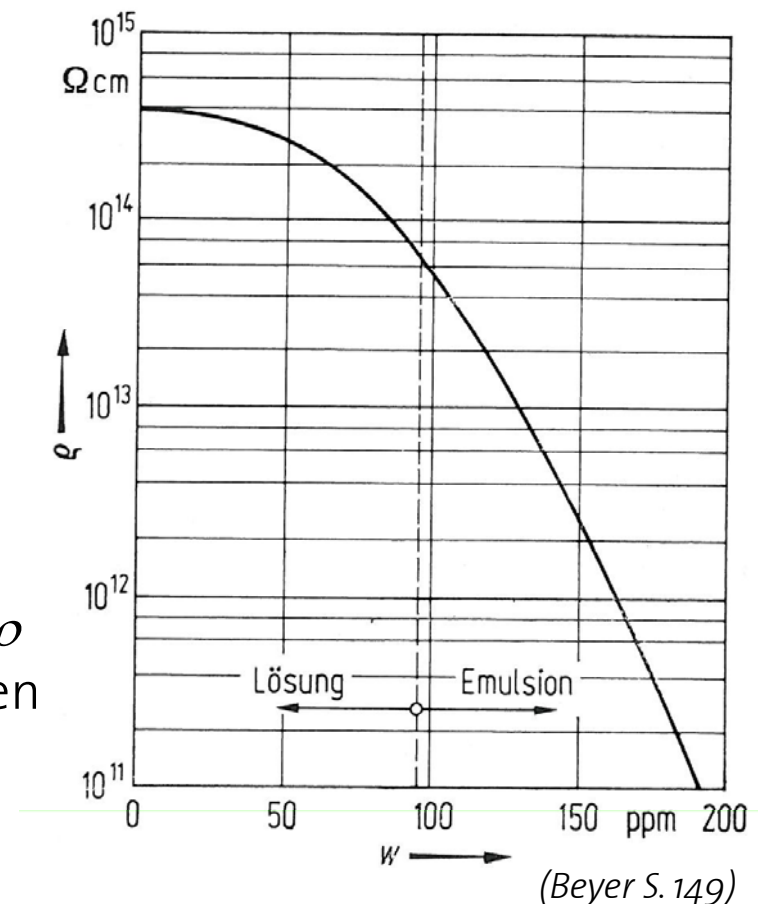
Gase

Bei gelösten Gasen ist kein Einfluss feststellbar.

Wasser

Leitfähigkeit wird von Wasser erheblich beeinflusst:

spezifischer Widerstand ρ
als Funktion des absoluten
Wassergehalts w



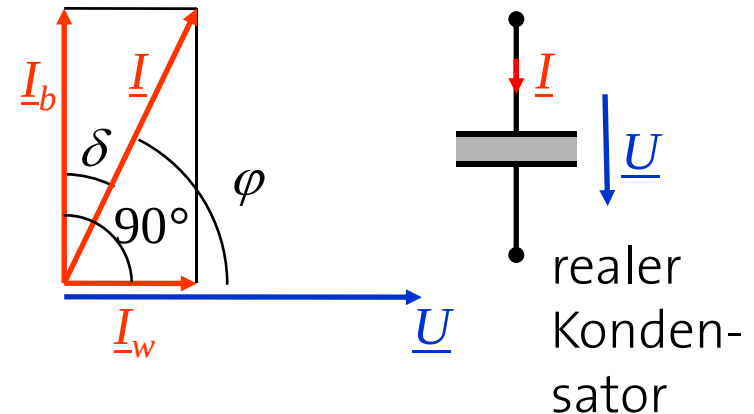
4. Dielektrische Eigenschaften

Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$

Definition

Der *dielektrische Verlustfaktor* $\tan \delta$ ist definiert aus dem Verhältnis der Wirkleistung zur Blindleistung einer an Spannung liegender Kapazität

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



Bemerkungen:

- δ ist der so genannte *Verlustwinkel*
- Im englischen Sprachraum ist auch
 - der *dissipation factor* $\cot \varphi (= \tan \delta)$ und
 - der *power factor* $\cos \varphi$ gebräuchlich
- Die dielektrische Verlustleistung ist $P_{\text{diel}} = U^2 \omega C \tan \delta$ und damit ein Mass für die dielektrischen Verluste und der damit verbundenen Erwärmung des Dielektrikums

4. Dielektrische Eigenschaften

Dielektrischer Verlustfaktor $\tan\delta$

Beschreibung der Leitfähigkeitsverluste

Die Leitungsverluste können mit dem Ersatzschaltbild erfasst werden:

Der Strom ist dann:

$$\underline{I} = \left(\frac{1}{R_p} + j\omega C_p \right) \cdot \underline{U}$$

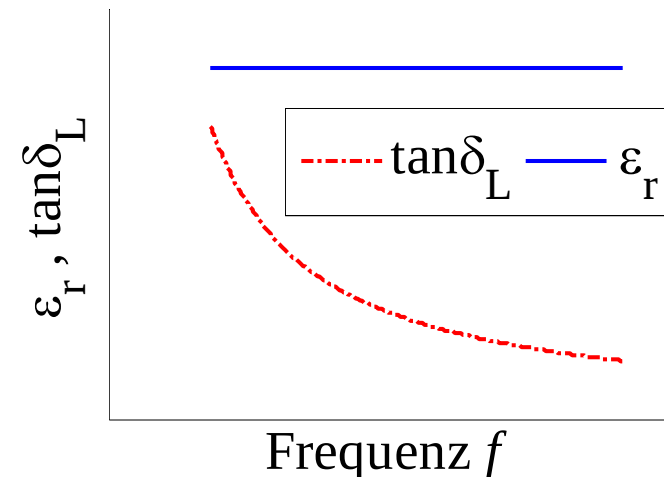
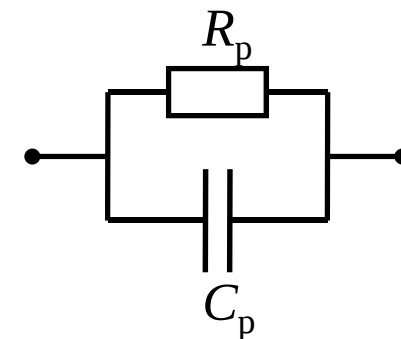
Damit ist der Verlustfaktor durch Leitungsverluste

$$\tan \delta_L = \frac{I_w}{I_b} = \frac{R_p^{-1} \cdot U}{\omega C_p \cdot U} = \frac{1}{\omega C_p \cdot R_p}$$

Bemerkung:

Damit ist noch keine Frequenzabhängigkeit von ε erfasst.

Verlustleistung konst., Blindleistung ändert!



4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Bis jetzt

haben wir die kapazitiven Verschiebungsströme und die Gleichströme angeschaut. Dabei war $\mathbf{E}(t)/\mathbf{P}(t) = \text{const.}$

Zur Erinnerung:

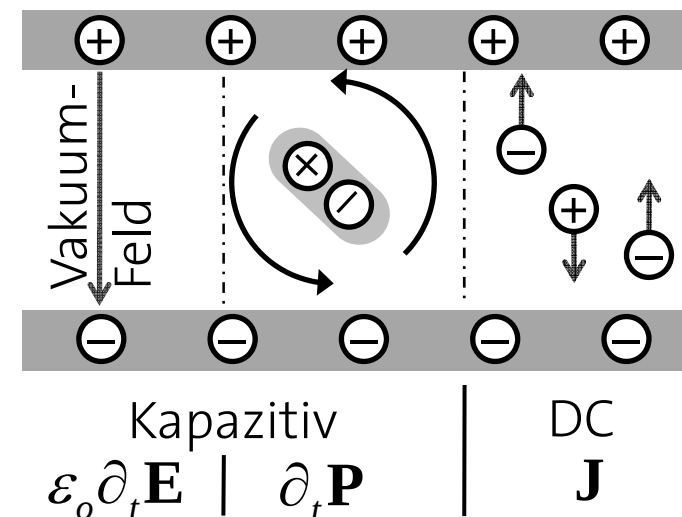
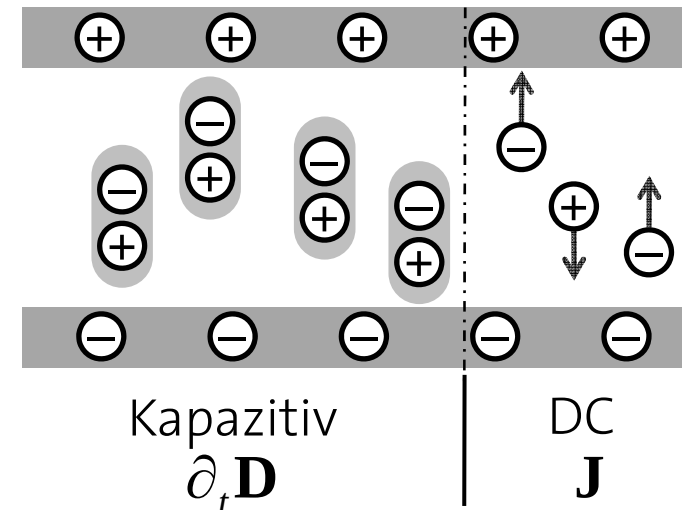
$$\mathbf{D}(t) = \varepsilon_r \varepsilon_o \mathbf{E}(t) = \varepsilon_o \mathbf{E}(t) + \mathbf{P}(t)$$

Neu

Bei „schnellen“ Änderungen bzw. „trägen Dipolen“ hat $\mathbf{P}$ aber eine andere Zeitabhängigkeit als $\mathbf{E}$: $\mathbf{E}(t)/\mathbf{P}(t) \neq \text{const.}$ $\mathbf{P}$ ist verzögert.

$\Rightarrow \varepsilon_r$ ist zeitabhängig!

$\Rightarrow$ Verzögerte $\mathbf{P}$ ergibt Verluste!



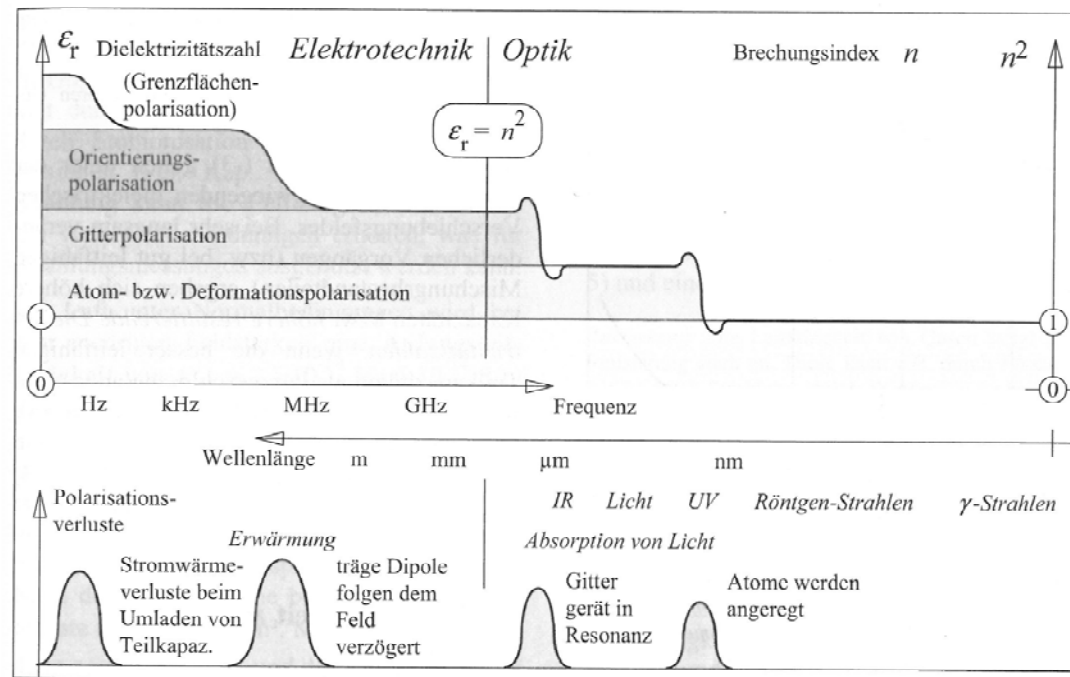
4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Zeitabhängigkeit der Polarisation

Da die verschiedenen Polarisationsmechanismen mit Verschiebungen von Masse verbunden sind, kann die Polarisation dem elektrischen Feld nicht instantan erfolgen $\Rightarrow$ die **Polarisation ist zeitabhängig**.

Die Zeit, welche zur Ausrichtung von Ladungen und Dipolen erforderlich ist, nennt man **Relaxationszeit**.



(Küchler S. 243)

4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Polarisation im Zeitbereich

$\mathbf{P}$ setzt sich i.d.R. aus mehreren
Polarisationsmechanismen zusammen:

$$\mathbf{P}(t) = \sum_i \mathbf{P}_i(t)$$

Schrittantwort

Bei einem Sprung von $\mathbf{E}(t)$ wird i.d.R.

$$\frac{\partial_t \mathbf{P}_i(t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_i} (\mathbf{P}_i(\infty) - \mathbf{P}_i(t))$$

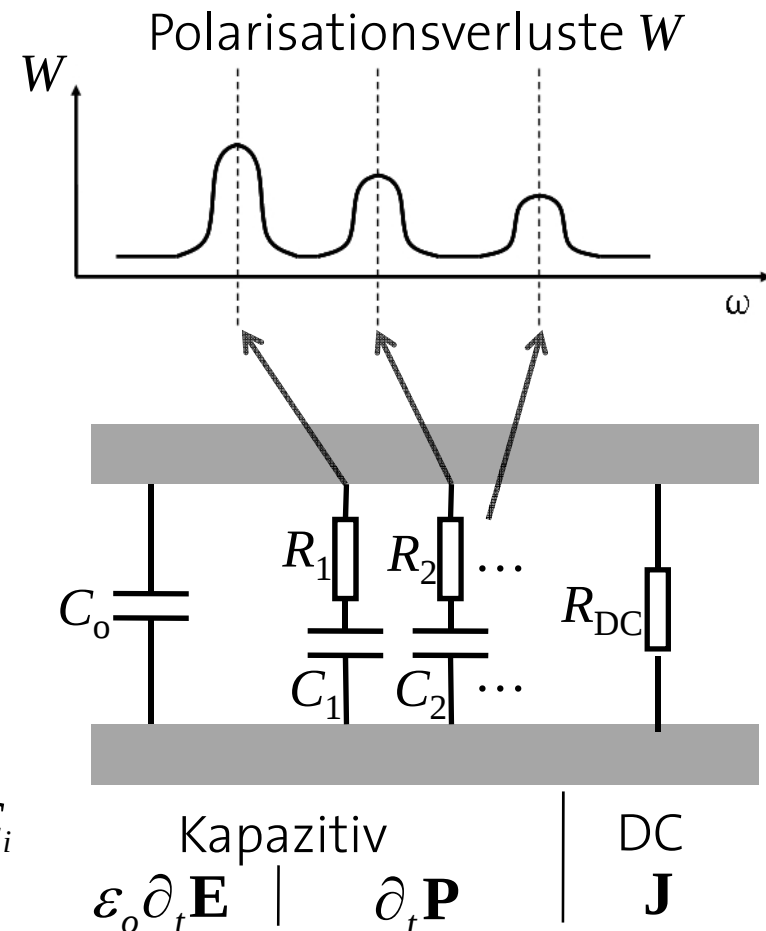
angesetzt, wobei

τ_i : Zeitkonstante/Relaxationszeit ist

Lösung: $\mathbf{P}_i(t) = \mathbf{P}_i(\infty) (1 - \exp[-t/\tau_i])$

Ersatzschaltbild

Verhalten von $\mathbf{P}_i$ mit R_i und C_i mit $\tau_i = R_i \cdot C_i$
nachbildbar.



4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Polarisation im Frequenzbereich

Komplexe Permittivität

Die verzögerte Polarisation äussert sich im Frequenzbereich durch die komplexe Permittivität

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}_r \cdot \varepsilon_o = (\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r) \varepsilon_o$$

ε_o : Dielektrizitätskonstante
 $\underline{\varepsilon}_r$: komplexe relative Permittivität
 ε'_r : Realteil von $\underline{\varepsilon}_r$
 ε''_r : Imaginärteil von $\underline{\varepsilon}_r$

Frequenzabhängigkeit

Es sei nur eine Polarisationsmechanismus vorhanden: $\mathbf{P} = \mathbf{P}_i$

Dann ergibt die Lösung $\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(\infty)(1 - \exp[-t/\tau])$
im Frequenzbereich:

$$\underline{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau}$$

τ : Relaxationszeit
 ε_{rs} : Realteil von $\underline{\varepsilon}_r$ bei $f \ll f_{\text{Relaxation}}$
 $\varepsilon_{r\infty}$: Realteil von $\underline{\varepsilon}_r$ bei $f \gg f_{\text{Relaxation}}$

4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Polarisation im Frequenzbereich

Real- und Imaginärteil

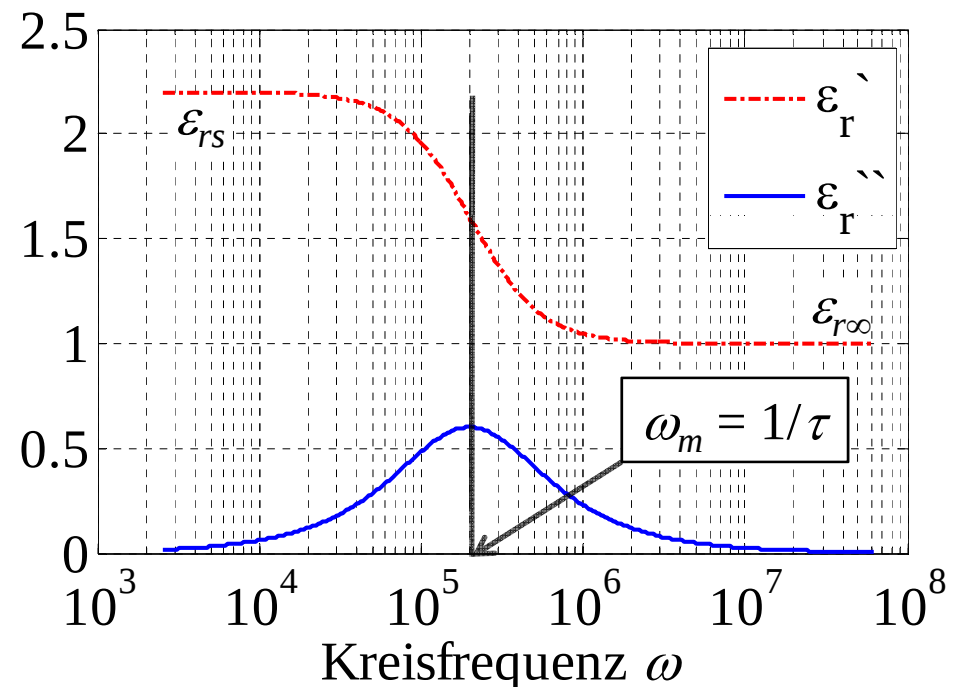
$$\underline{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad \text{ergibt}$$

$$\varepsilon'_r(\omega) = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + (\omega\tau)^2},$$

$$\varepsilon''_r(\omega) = \frac{(\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty})}{1 + (\omega\tau)^2} \cdot \omega\tau$$

Beispiel

Mit $\tau = 5 \mu\text{s}$, $\varepsilon_{rs} = 2.2$, $\varepsilon_{r\infty} = 1$



4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Polarisation im Frequenzbereich

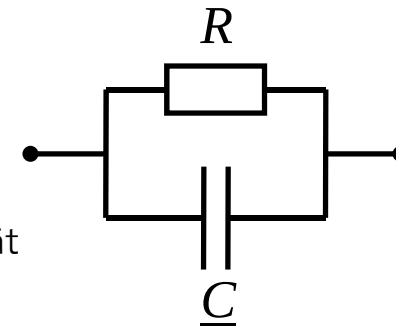
Ersatzschaltbild

Die Kombination von Leitungsverluste **und** **Polarisationsverluste** können mit dem Ersatzschaltbild erfasst werden.

Die Kapazität ist nun also komplex

$$\underline{C} = \underline{\varepsilon}_r \cdot C_o$$

ε_o : Dielektrizitätskonstante
 $\underline{\varepsilon}_r$: komplexe relative Permittivität
 ε_r' : Realteil von $\underline{\varepsilon}_r$
 ε_r'' : Imaginärteil von $\underline{\varepsilon}_r$



$$\underline{I} = \left(\frac{1}{R} + j\omega(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')C_o \right) \cdot \underline{U} \quad \text{also} \quad I_w = \left(\frac{1}{R} + \omega \varepsilon'' C_o \right) \cdot U, \quad I_b = \omega \varepsilon' C_o \cdot U$$

Womit der Verlustfaktor

$$\tan \delta = \tan \delta_L + \tan \delta_P = \frac{I_w}{I_b} = \frac{1}{\omega \varepsilon_r' C_o \cdot R} + \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$$

ergibt.

4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Polarisation im Frequenzbereich

Verlustfaktor durch Polarisationsverluste

Kombination von

$$\tan \delta_p = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad \epsilon_r(\omega) = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau}$$

ergibt

$$\tan \delta_p = \frac{\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty}}{\epsilon_{rs} + \epsilon_{r\infty}(\omega\tau)^2} \omega\tau$$

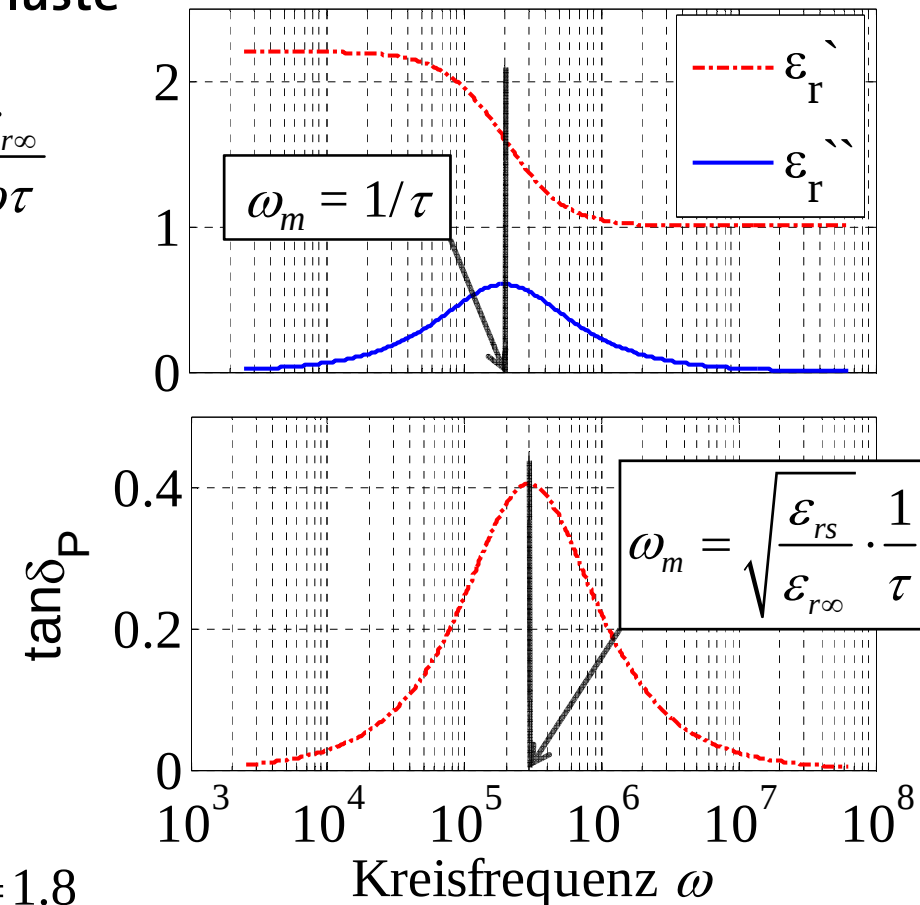
Beispiel

Mit $\tau = 5 \mu\text{s}$, $\epsilon_{rs} = 2.2$, $\epsilon_{r\infty} = 1$

Bemerkung

Wasser $\epsilon_{rs} = 81$, $\epsilon_{r\infty} = n^2 = 1.33^2 = 1.8$

$\Rightarrow$ Mikrowelle bei $f \approx 2.5 \text{ GHz}$



4. Dielektrische Eigenschaften

Polarisationsverluste

Polarisation im Frequenzbereich

Gesamter Verlustfaktor
ist

$$\begin{aligned}\tan \delta &= \tan \delta_L + \tan \delta_p = \\ &= \frac{\kappa}{\omega \varepsilon_{rs} \varepsilon_0} + \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}}{\varepsilon_{rs} + \varepsilon_{r\infty}} \frac{\omega \tau}{(\omega \tau)^2 + 1}\end{aligned}$$

Beispiel

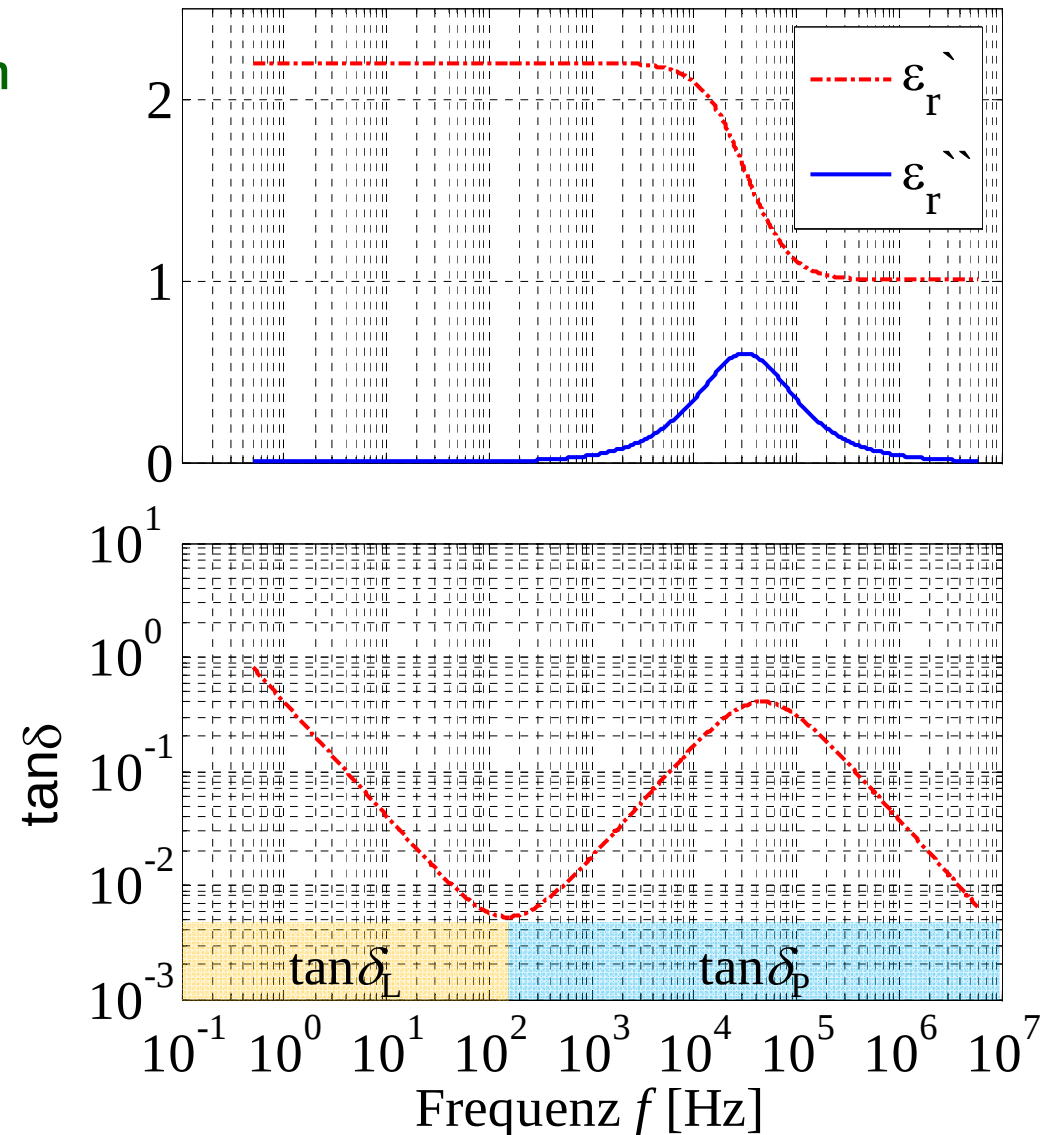
Typische Werte für Mineralöl:

$$\tau = 5 \mu\text{s}, \varepsilon_{rs} = 2.2, \varepsilon_{r\infty} = 1$$

$$\kappa = 5 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$$

Bemerkung:

Feuchtigkeit erhöht $\tan \delta_L$
und $\tan \delta_p$



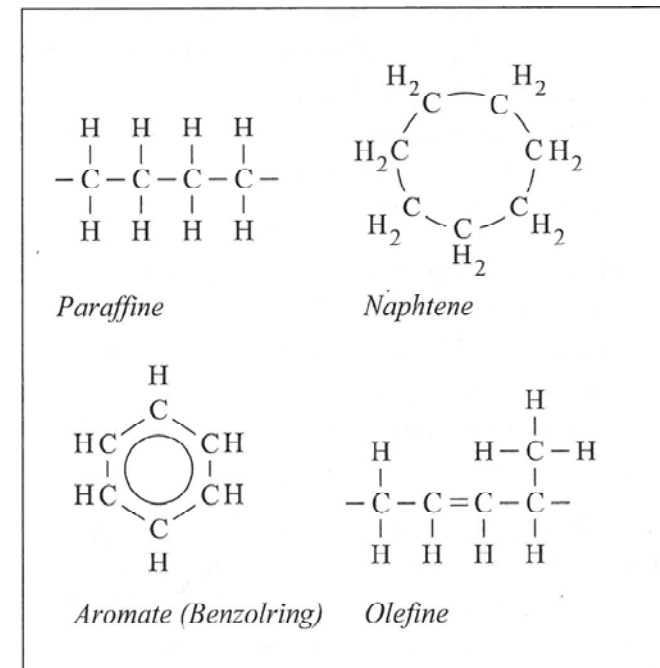
5. Arten von Isolierflüssigkeiten

Isolieröle auf Mineralbasis: Mineralöle

Anwendung

Mineralöle sind die am häufigsten verwendeten Isolieröle. Wegen dem grossen im Transformatorenbau verwendeten Volumen werden sie auch *Transformatorenöle* genannt.

Bestandteile:	40 - 60%	Paraffine
	30 - 50%	Naphtene
	5 - 20%	Aromate
	1%	Olefine



(Küchler S. 289)

Eigenschaften

- Paraffine verhindern das Fließen bei tiefen Temperaturen
 ⇒ Verwendung bei tiefer Temperatur: Hohe Anteile an Naphtenen
- Aromate führen bei Zutritt von O_2 und Licht zu beschleunigter Alterung, haben dafür so genannte *Gasfestigkeit* (Bindung von Wasserstoff)
 ⇒ Wenn Isolation hermetisch abgeschlossen (Kondensatoren, Durchführungen) werden hohe Aromatenanteile verwendet

5. Arten von Isolierflüssigkeiten

Isolieröle auf Mineralbasis: Mineralöle

Eigenschaftswerte von Mineralölen (bei 20°C und einem Wassergehalt < 10 ppm)	
Durchschlagfeldstärke	$E_{d\text{ eff}} = 200 \dots 350 \text{ kV/cm}$
Dielektrizitätszahl	$\epsilon_r \approx 2,2$ bei 50 Hz
Dichte	$\gamma = 0,9 \text{ g/cm}^3$
dielektrischer Verlustfaktor	$\tan \delta \sim 10^{-3}$ bei 50 Hz

Leitfähigkeit

$\kappa = 10^{-9} \text{ S/m}$ (feucht); $\kappa = 10^{-13} \text{ S/m}$ (trocken)

Verlustfaktor (bei 50 Hz)

$\tan \delta = 10^{-1}$ (feucht); $\tan \delta = 10^{-3}$ (trocken)

5. Arten von Isolierflüssigkeiten

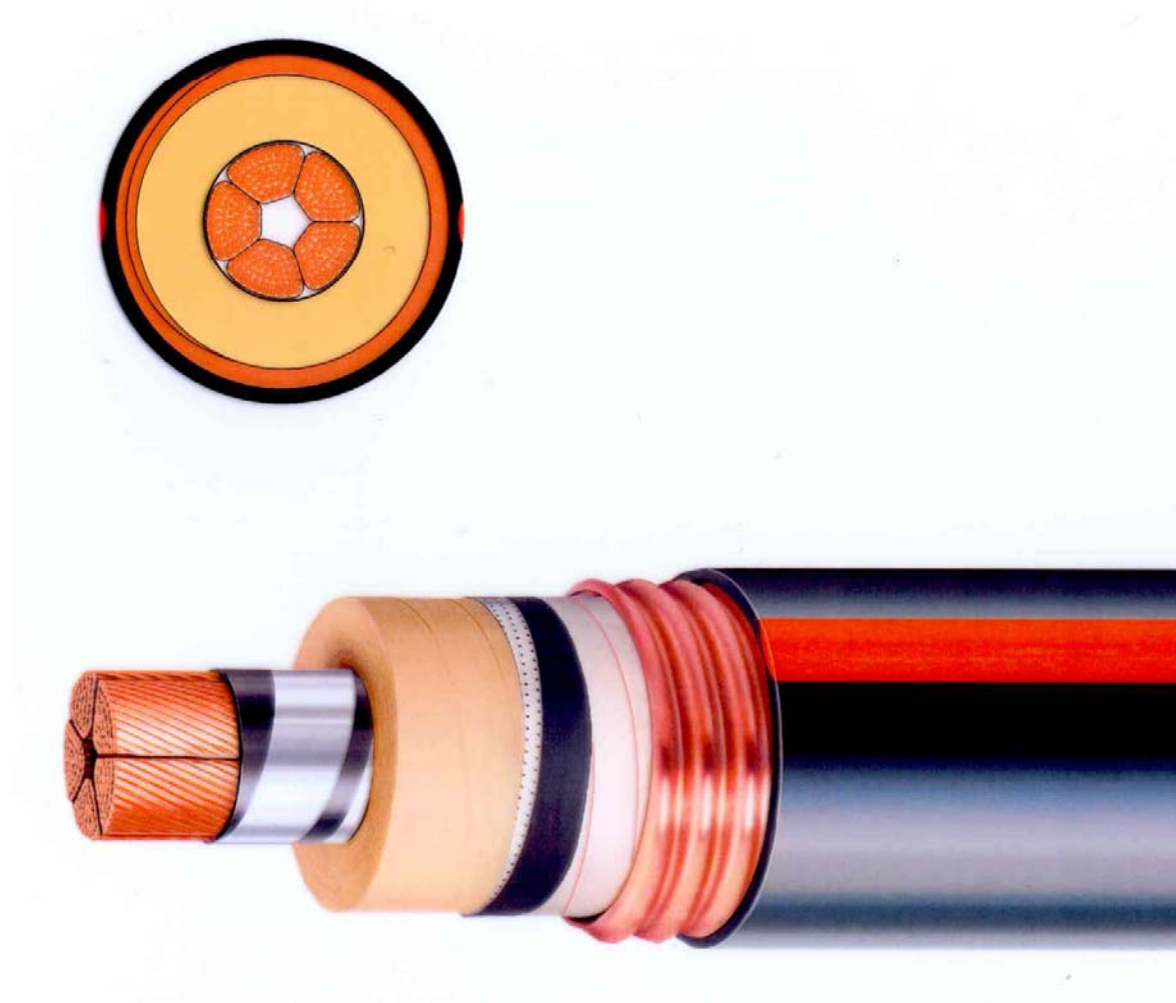
Synthetische Isolierflüssigkeiten

Stoffe

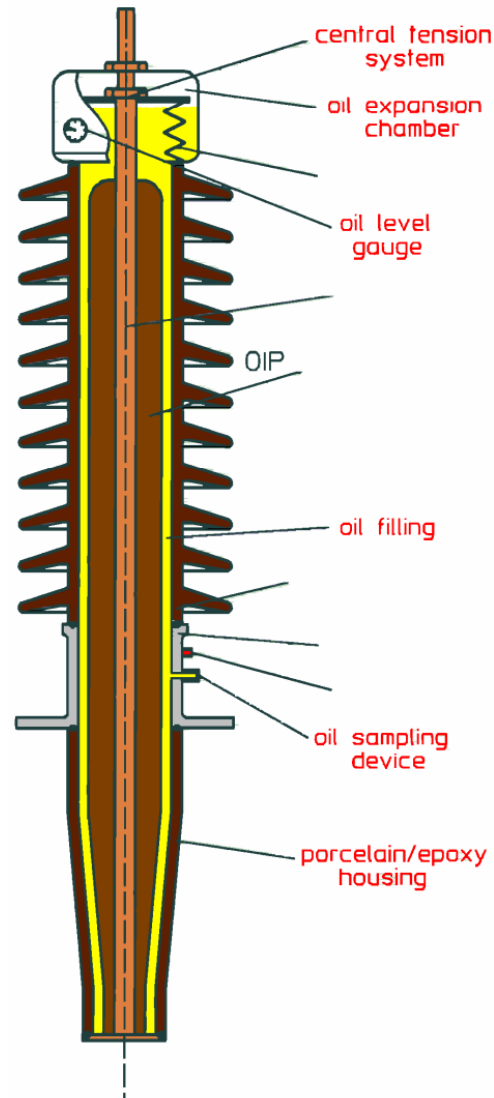
- reine Kohlewasserstoffe: Polyisobuten, Verwendung bei Massekabeln
- Askarele (polychlorierte Biphenyle, PCB) **heute verboten !!**
- Siliconflüssigkeiten: Hoher Flammpunkt, aber teuer

6. Anwendung von Isolierflüssigkeiten

Öl-Papier-Kabel



6. Anwendung von Isolierflüssigkeiten Durchführungen



6. Anwendung von Isolierflüssigkeiten

Öl-Board-Isolation beim Leistungstransformator



Literatur

Kapitel *Küchler*:

N°	Titel	Kommentar
3.3.1	Entladungen in Flüssigkeiten	wichtig
4	Dielektrische Systemeigenschaften	wichtig
5.4	Isolierflüssigkeiten	empfohlen