

## 6.7 Zusammenfassungen zu Kapitel 6

### 6.7.1 Merkmale zu Kapitel 6 "Dielektrika und Optik"

**Spannung** und **Strom** sind aus Materialsicht bedeutungslos, was zählt ist **Feldstärke  $E$**  und **Stromdichte  $j$** .

- In **Dielektrika**=Isolatoren fällt die Spannung ab. Das Dielektrikum wird durch das elektrische Feld polarisiert.
- Dielektrika werden gebraucht für.
  - Generelle **Isolierung** - von nm dicken "Gateoxiden" in IC's zu cm dicken Hochspannungsisolatoren.
  - Kondensatoren** - nicht nur als Bauelemente sondern auch in unerwünschten **parasitären** Kapazitäten.
  - Kritischer Teil von **MOS Transistoren**.
  - Wärmen mit Mikrowellen
  - Als **Piezomaterialien** und **Elektrete** für viele Anwendungen.
  - Als **optische Materialien** ("Linse" bis Glasfaser und Laser).

Der **Brechungsindex  $n$**  als bestimmende Kenngröße der Optik ist direkt mit der (relativen) Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r$  verknüpft.

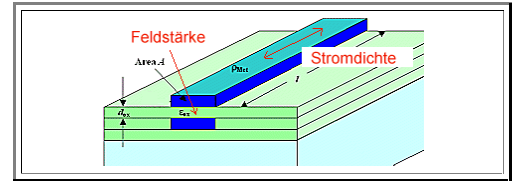
- Der **DC**-Wert der Dielektrizitätskonstanten für Wasser ist  $\epsilon_r(\text{H}_2\text{O}) \approx 80$ ; der Brechungsindex von Wasser ist  $n(\text{H}_2\text{O}) \approx 1,3$ . Der größtmögliche Brechungsindex liegt um  $n_{\text{max}} \approx 2,4$  (Diamant).
- $\Rightarrow \epsilon_r = \epsilon_r(\omega)$ . Die Dielektrizitätskonstante ist **frequenzabhängig** und wird tendenziell mit wachsender Frequenz **kleiner**.

Es sind **drei** Fragen zu beantworten

- Nicht einfach.
- Aber machbar.

In Bezug auf **elektrischen Durchbruch** gilt der **1. Hauptsatz der Materialwissenschaft!**

- Es gibt einige feldstärkeabhängige Mechanismen, die sofort oder im Laufe der Zeit zum Durchbruch führen können:
  - Thermischer Durchschlag.
  - Lawinendurchbruch.
  - Lokale Entladungen.
  - Elektrolytischer Durchschlag
- Die maximale Durchbruchfeldstärke (in sehr dünnem ( $d < 10$  nm) und sehr perfektem (amorphem) **SiO<sub>2</sub>**) liegt bei ca. **15 MV/cm**.
- "Normale" Materialien halten deutlich weniger aus.



$$n^2 = \epsilon_r$$

- Was bestimmt die kritische Feldstärke  $E_{\text{krit}}$  eines Dielektrikums?
- Was bestimmt  $\epsilon_r$ , die "DK"?
- Warum und wie ist die DK frequenzabhängig?

Material	Durchbruchfeldstärke [kV/cm]
Öl	200
Glas, Keramiken (Porzellan)	200...400
Glimmer (früher viel verwendet)	200...700
Ölpapier	1800
Polymere	50...900
SiO <sub>2</sub> in ICs	> 10 000

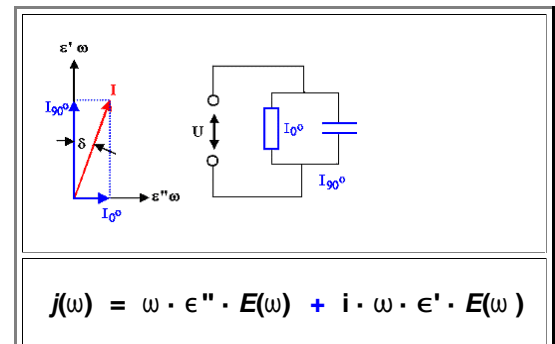
Ideale Dielektrika sind *perfekte* Isolatoren charakterisiert durch ihre **DK**  $\epsilon_r$  oder durch die Suszeptibilität  $\chi$

- Die **DK** oder die Suszeptibilität eines Dielektrikums folgt aus seiner *Polarisation*.
- Die Beziehung zwischen Feld  $E$  und Polarisation  $P$  ist aus Material Sicht sinnvoller als die Beziehung zwischen Feld und Verschiebungsdichte  $D$
- Umrechnungen sind einfach  $\Rightarrow$

<b>Sinnvolles Materialgesetz</b>	$\underline{P} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \underline{E}$
<b>Sinnvolle <i>neue</i> Materialkonstante</b>	$\chi =$ <b>dielektrische Suszeptibilität</b>
<b>Alte Materialkonstante (DK oder Permittivität)</b>	$\epsilon_r = \chi + 1$
<b>Beziehung <math>\underline{D} \Leftrightarrow \underline{P}</math></b>	$\underline{D} = \epsilon_0 \cdot \underline{E} + \underline{P}$

Reale Dielektrika haben eine endliche Leitfähigkeit

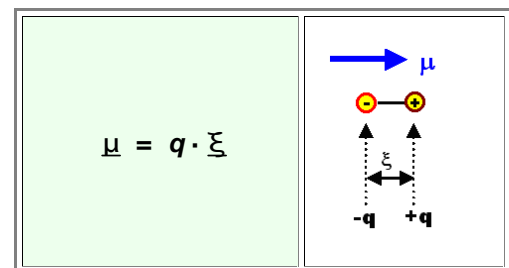
- Das lässt sich am einfachsten wie gezeigt beschreiben. Der insgesamt fließende Wechselstrom wird durch eine komplexe dielektrische Funktion  $\epsilon(\omega)$  erfasst  $\Rightarrow$
- Der Realteil  $\epsilon'$  beschreibt den um **90°** phasenverschobenen Teil der Stromdichte  $j(\omega)$  und der Imaginärteil  $-\epsilon''$  den Teil, der in Phase fließt.
- Damit sind Wirk- und Blindleistung proportional zu  $\epsilon''$  bzw.  $\epsilon'$ .
- Dies gilt unabhängig davon von welchem Effekt der Imaginärteil resultiert.



Ein externes elektrisches Feld wird in einem Dielektrikum *immer* Dipole induzieren *und* zusätzlich die eventuell vorhandenen Dipole verändern.

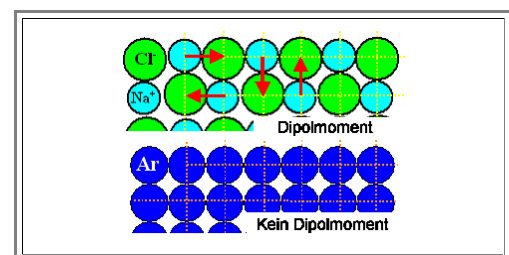
- Die Polarisation eines Dielektrikum ist die Vektorsumme der enthaltene Dipolmomente per Volumen

Ein Dipolmoment ist definiert wie gezeigt  $\Rightarrow$



Viele Materialien enthalten Dipomomente (z. B. Ionenkristalle Oxide, Wasser, ...) andere (Edelgas, dielektrische Elementkristalle) sind neutral

- Im ersten Fall addieren sich die vorhandenen Moment ohne Feld i.d.R. zu  $\underline{P} = 0 \text{ C/cm}^2$ ; mit Feld wird die Ausrichtung so geändert, dass  $\underline{P} \neq 0 \text{ C/cm}^2$  resultiert.



Es gibt neben der mathematisch schwer greifbaren Grenzflächenpolarisation *drei* wesentliche *Polarisationsmechanismen*.

- Im **1.** Fall wird die durch das Feld die Elektronenhülle relativ zum Atomkern verschoben und dadurch ein Dipolmoment induziert.

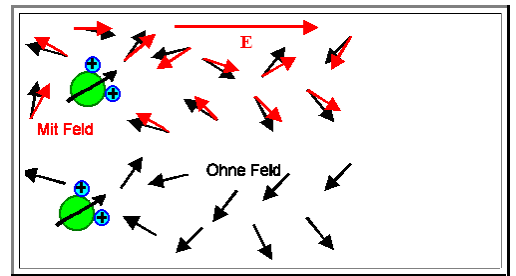
- Sehr schwacher Effekt bei kugelförmigen Atomen

- Atom- oder Elektronenpolarisation**
- Ionenpolarisation**
- Orientierungspolarisation**

(Beispiel Edelgase; auch als Kristall);  $\epsilon_r=1,00...$  )

- Starker Effekt bei gerichteten kovalenten Bindungen (Beispiel typische Halbleiter **Si, Ge, GaAs, ...**);  $\epsilon_r=10 - 20$ .

- Die **Ionenpolarisation** ist in allen Ionenkristallen und polaren Bindungen (Oxide, Keramiken) vorhanden. Mittel bis sehr stark.
- **Orientierungspolarisation** kommt nur bei Flüssigkeiten vor, da die (Molekül-)Dipole sich drehen können müssen. Recht stark:  $\epsilon_r(\text{H}_2\text{O})=80$ .



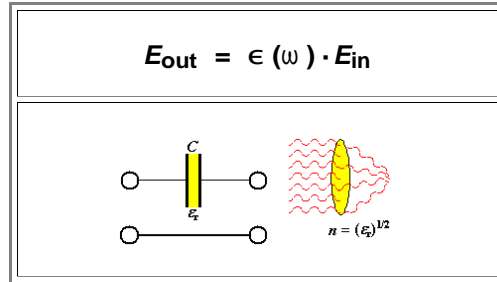
In allen Fällen ist die Polarisation **proportional** zum Feld.

- Damit ist die Grundgleichung "bewiesen"; die **Suszeptibilität**  $\chi$  kann berechnet werden.

$$\underline{P} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \underline{E}$$

**Frequenzabhängigkeit der Polarsation.** Uns interessieren Frequenzen bis in Ultraviolette - d. h. jenseits  $10^{15}$  Hz

- Die Grundbeziehung ist  $\Rightarrow$
- Wie Eingang und Ausgang aussieht, hängt von der Frequenz ab.
- Bei optischen Frequenzen wird man z. B. Licht durch eine Linse schicken, bei **RF** reicht es, einen Kondensator zu vermessen.



Es gibt nur **zwei** grundlegende Mechanismen, die die Frequenzabhängigkeit der **DK** bestimmen:

- Elektronenpolarisation und ionische Polarisation zeigen **Resonanz**, die Orientierungspolarisation zeigt **Relaxation**.

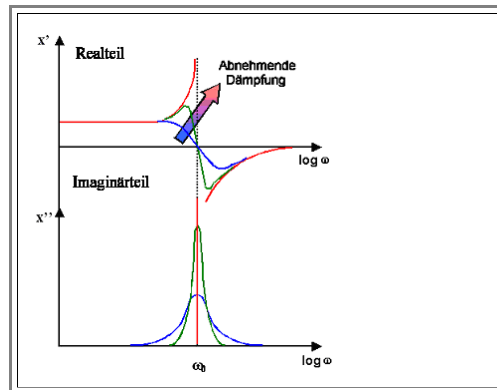
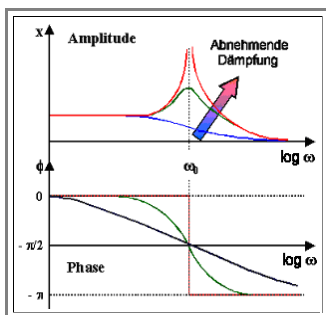
1. Resonanz
2. Relaxation

Resonanz erhält man beim getriebenen gedämpften Schwinger.

- Die Lösungen kann man als Amplitude und Phase oder als Real- und Imaginärteil einer komplexen Amplitude darstellen.
- Die Amplitude bestimmt das elektrische Dipolmoment, da in beiden Resonanzmechanismen die Ladungen gegeneinander schwingen.

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + mk_R \cdot \frac{dx}{dt} + k_F \cdot x = q \cdot E_0 \cdot \cos(\omega t)$$

Die Lösungen der Differentialgleichung kann man für Amplitude und Phase angeben (unten) oder für Real- und Imaginärteil (rechts). Wir nehmen natürlich die komplexe Variante!



- Damit ist der Verlauf der komplexen **DK** im Bereich der Resonanzen grundsätzlich skizziert.

In allen Materialien muss die Resonanz stets stark gedämpft sein, da die die Energie eines heftig schwingenden Dipols sofort auf Nachbarn dissipiert wird.

Die Resonanzfrequenz  $\omega_0$  ist gegeben durch  $\Rightarrow$

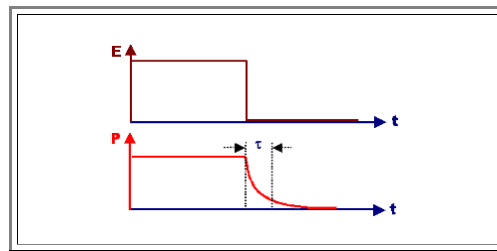
- In der Federkonstante der ionischen Polarisation steckt der  $E$ -Modul. Es schwingen "schwere" Atome, und wir wissen schon, dass  $\omega_0 \approx 10^{13}$
- Bei der Atom- oder Elektronenpolarisation schwingen leichte Elektronen, daher  $\omega_0 \approx 10^{15}$  d.h. die Resonanz liegt im optischen Bereich.

$$\omega_0 = \left( \frac{k_F}{m} \right)^{1/2}$$

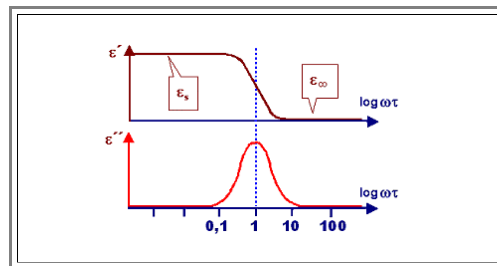
Die *Relaxation*, d.h. allmähliche Rückkehr aus dem etwas orientierten Zustand nach Abschalten des Felds in den völlig ungeordneten Zustand, wird beschrieben durch  $\Rightarrow$

- Aus der Grundgleichung in der Zeit

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

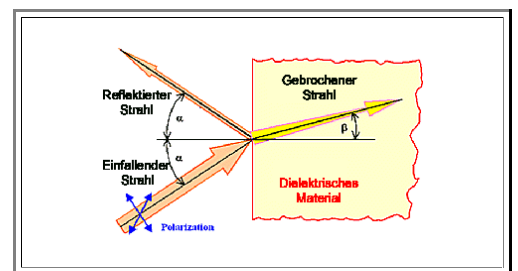


- folgt durch Fourier-Transformation die Grundgleichung in der Frequenz. Der Graph dazu sieht so aus  $\Rightarrow$
- Der Wert der typischen Relaxationszeitkonstanten  $\tau$  liegt im Bereich  $1/\tau \approx 10$  GHz
- Insbesondere der Imaginärteil erklärt die Funktionsweise der "Mikrowelle"



*Optik und Dielektrika.* Licht fällt auf ein (dielektrisches) Material

- "Input" Größen sind die *Frequenz* (Größenordnung  $5 \cdot 10^{14}$  Hz), die *Intensität*  $I_0$ , der *Einfallswinkel* und die *Polarisationsebene*.
- Alles was passieren kann ist:
  - Brechung*, d. h. Eindringen in das Material mit Intensität  $I_M$  unter dem Winkel  $\beta$
  - Reflexion* mit Intensität  $R=I_0 - I_M$ .
  - Absorption* mit  $I_M(z) = I_M(z=0) \cdot \exp(-az)$ ;  $1/a$  ist die *Absorptionslänge*



Die dielektrische Funktion des Materials enthält die die gesamte notwendige Information

- Dazu führt man einen *komplexen Brechungsindex* ein  $\Rightarrow$
- Im *Realteil*  $n$  steckt die Information zu den Punkten 1 und 2.
- Im *Imaginärteil*  $\kappa$  steckt die Information über die *Absorption*.

$$(n + i\kappa)^2 = \epsilon' - i \cdot \epsilon''$$

$$\text{Blindleistung: } L_B = \omega \cdot \epsilon' \cdot E^2$$

$$\text{Wirkleistung: } L_W = \omega \cdot \epsilon'' \cdot E^2$$

Optik ist damit zurückgeführt auf die Polarisierung von Dielektrika bei hohen Frequenzen.

⇒ In der (komplexen) dielektrischen Funktion eines Materials stecken alle elektrischen und optischen Eigenschaften des Materials.