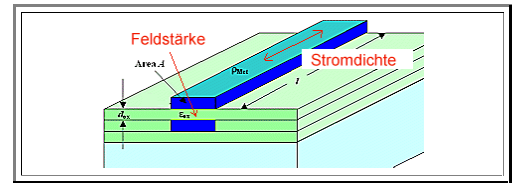


6.7 Zusammenfassungen zu Kapitel 6

6.7.1 Merkpunkte 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 ϵ_r verknüpft.

- Der **DC-Wert** der Dielektrizitäts"konstanten" 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 Dielektrizitäts"konstante" ist **frequenzabhängig** und wird tendenziell mit wachsender Frequenz **kleiner**.

$$n^2 = \epsilon_r$$

Es sind **drei** Fragen zu beantworten

- Nicht einfach.
- Aber machbar.

1. Was bestimmt die kritische Feldstärke E_{krit} eines Dielektrikums?
2. Was bestimmt ϵ_r , die "DK"?
3. Warum und wie ist die DK frequenzabhängig?

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) **SiO₂**) liegt bei ca. **15 MV/cm**.
- "Normale" Materialien halten deutlich weniger aus.

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

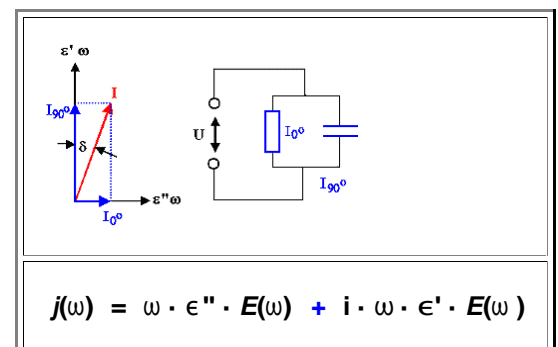
Ideale Dielektrika sind **perfekte** Isolatoren charakterisiert durch ihre **DK** ϵ_r oder durch die Suszeptibilität χ

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

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

Reale Dielektrika haben eine endliche Leitfähigkeit

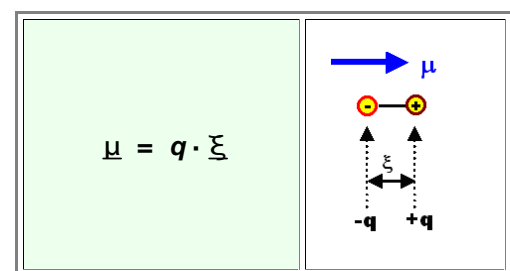
- Das lässt sich am einfachsten wie gezeigt beschreiben. Der insgesamt fließende Wechselstrom wird durch eine komplexe dielektrische Funktion $\epsilon(\omega)$ erfasst \Rightarrow
- Der Realteil ϵ' beschreibt den um **90°** phasenverschobenen Teil der Stromdichte $\underline{j}(\omega)$ und der Imaginärteil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

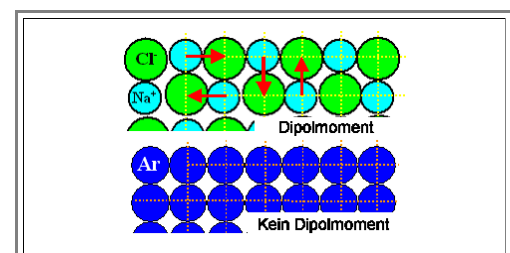
- Die Polarisation eines Dielektrikum ist die Vektorsumme der enthaltene Dipolmomente per Volumen

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.

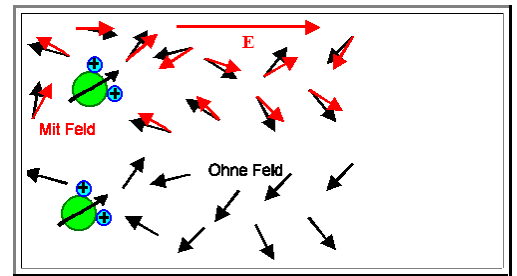
- Sehr schwacher Effekt bei kugelförmigen Atomen

1. Atom- oder Elektronenpolarisation
2. Ionenpolarisation
3. 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.

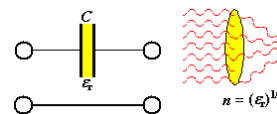
- Damit ist die Grundgleichung "bewiesen"; die **Suszeptibilität** χ kann berechnet werden.

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

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.

$$E_{\text{out}} = \epsilon(\omega) \cdot E_{\text{in}}$$



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

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

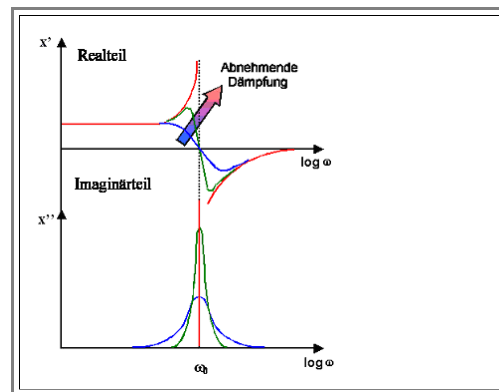
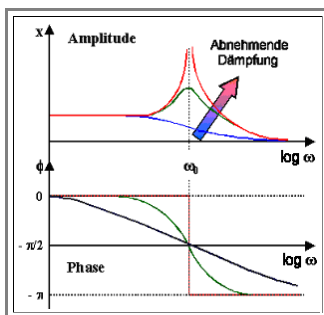
1. Resonanz
2. Relaxation

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.

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

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 Energie eines heftig schwingenden Dipols sofort auf Nachbarn dissipiert wird.

Die Resonanzfrequenz ω_0 ist gegeben durch \Rightarrow

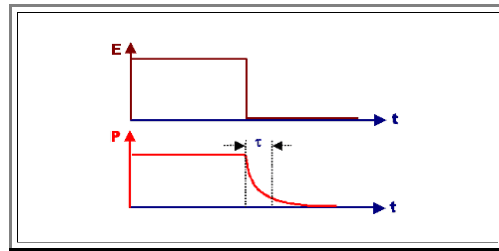
- In der Federkonstante der ionischen Polarisation steckt der **E-Modul**. Es schwingen "schwere" Atome, und wir wissen schon, dass $\omega_0 \approx 10^{13}$
- Bei der Atom- oder Elektronenpolarisation schwingen leichte Elektronen, daher $\omega_0 \approx 10^{15}$
d.h. die Resonanz liegt im optischen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

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

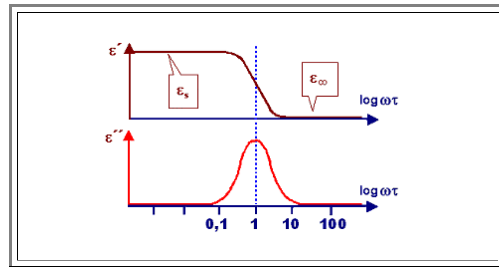
Die **Relaxation**, d.h. allmähliche Rückkehr aus dem etwas orientierten Zustand nach Abschalten des Felds in den völlig ungeordneten Zustand, wird beschrieben durch \Rightarrow

- Aus der Grundgleichung in der Zeit

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

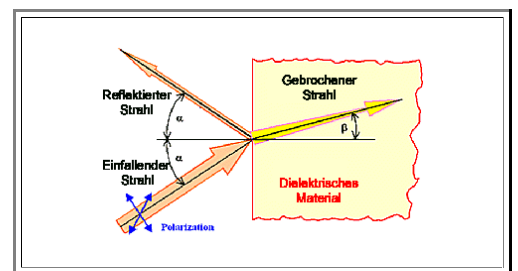


- folgt durch Fourier-Transformation die Grundgleichung in der Frequenz. Der Graph dazu sieht so aus \Rightarrow
- Der Wert der typischen Relaxationszeitkonstanten τ liegt im Bereich $1/\tau \approx 10 \text{ GHz}$
- Insbesondere der Imaginärteil erklärt die Funktionsweise der "Mikrowelle"



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

- "Input" Größen sind die **Frequenz** (Größenordnung $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$), 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 β
 - 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** κ 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.

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