



Vorlesung Optik und Festkörperelektronik

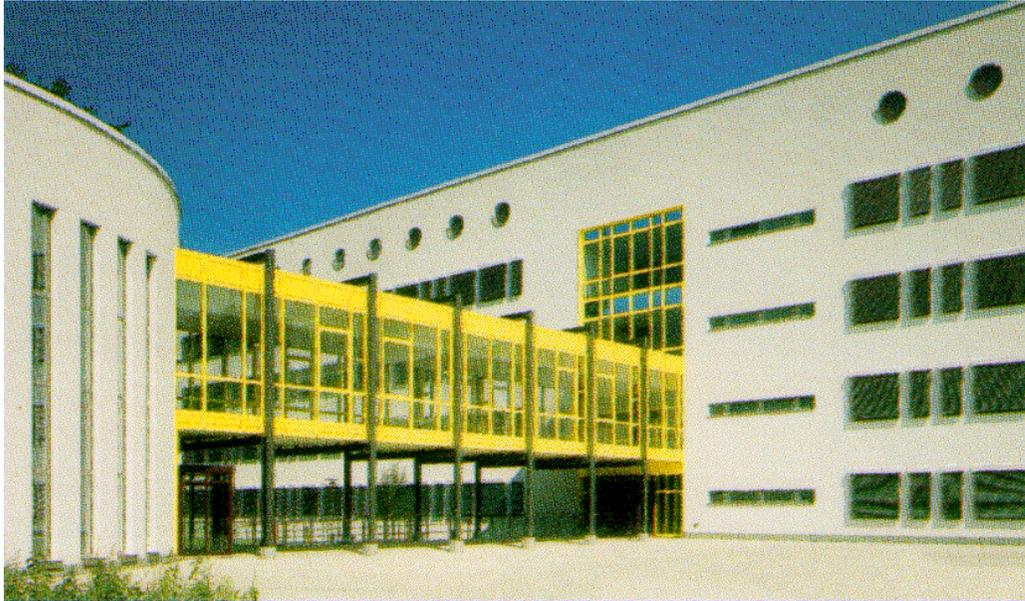
Teil 3 – Dielektrika und Grenzflächen

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer
Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffe der
Elektrotechnik



Institut für Angewandte Materialien (IAM-WET)

Verantwortlich für Teil 3 der Vorlesung



Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer

Adenauerring 20 b, Geb. 50.40, 3. OG

Tel.: 0721 608-47490, Raum 320

E-Mail: ulrike.krewer@kit.edu

Sprechstunde: nach vorheriger Anmeldung

www.iam.kit.edu/wet/



Lehrveranstaltung Optik und Festkörperelektronik

Veranstaltungstermine und Organisation

Tag/Monat	April	Mai	Juni	Juli
1		1. Mai Feiertag	Pfingstmontag	
2			V11 FE (8)	V17 FE (14)
3				Ü8 FE (7), Ausgabe T7
4			V12 FE (9)	
5		V4 FE (1)	U5 FE (4), Ausgabe T3	
6				Tut 6
7		V5 FE (2), Ausgabe Ü2		V18 FE (15)
8				
9			V13 FE (10)	V19 FE (16), (Institutsführung)
10			Ausgabe Ü6/T4	Ausgabe Ü9/T8
11		Tut 1	Fronleichnam	
12		V6 FE (3), Ausgabe Ü3	Brückentag	
13				Tut 7
14		Ü2 FE (1)		V20 FE (17)
15		V7 FE (4), Ausgabe T2	Tut 3	
16			V14 FE (11)	
17				Ü9 FE (8), Ausgabe Ü10
18				
19		Ü3 FE (2)	Ü6 FE (5), Ausgabe Ü7/T5	
20	VL-Beginn	Ausgabe Ü4		Tut 8
21	V1 Optik (1), Ausgabe Ü1	Christi Himmelfahrt		V21 FE (18)
22		V8 FE (5)	Tut 4	
23	V2 Optik (2)		V15 FE (12)	V22 FE (19)
24				Ü10 FE (9), VL-Ende
25		Tut 2		
26		V9 FE (6)	Ü7 FE (6), Ausgabe Ü8/T6	
27				
28	V3 Optik (3)	V10 FE (7)		
29	Deadline Tut.-Anmeldung	Ü4 FE (3), Ausgabe Ü5	Tut 5	
30	U1 Optik, Ausgabe T1		V16 FE (13)	
31		Pfingsten		

IAM-WET-Teil:
6 Vorlesungen
2 Übungen
1 Tutorium

Dr.-Ing. **Stefan F. Wagner**

Büro: Forschungszentrum Umwelt, Geb. 50.40, Raum 315

Telefon: 0721/608-48455

E-Mail: stefan.wagner@kit.edu



Janis Geppert M. Sc.

Büro: Forschungszentrum Umwelt, Geb. 50.40, Raum 329

Telefon: 0721/608-47600

E-Mail: Janis.geppert@kit.edu



Sprechstunden

Nach Vereinbarung – einfach anrufen oder E-Mail schreiben

Generell: Vorlesungsfolien, Probeklausur, weitere Links/Literatur bald auf Ilias.

Neue Professorin in der ETIT: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer

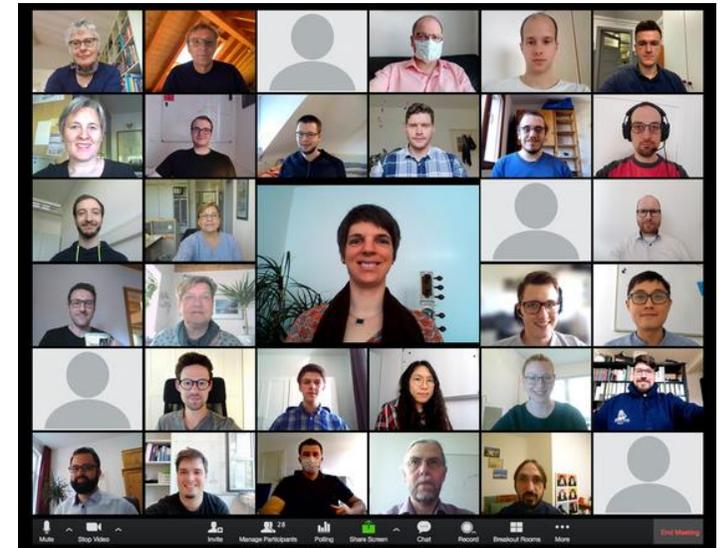


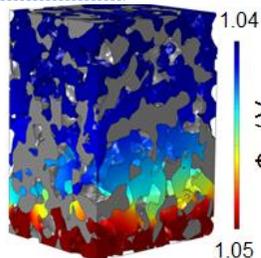
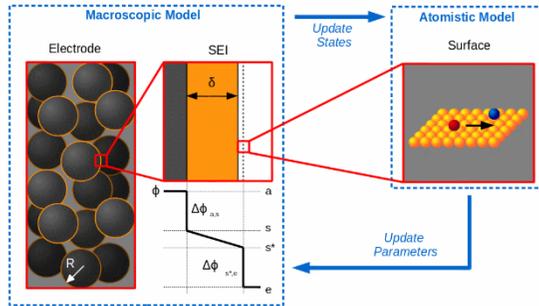
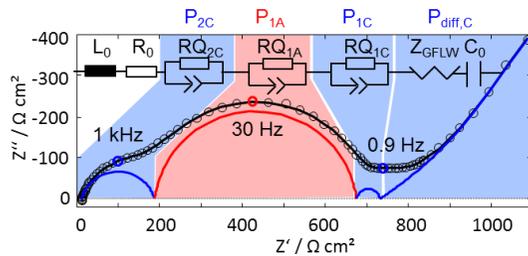
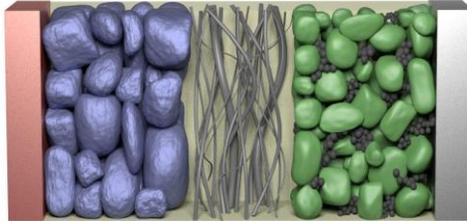
Werdegang

- Dipl.-Ing. **Chemieingenieurwesen** (Erlangen)
- **Promotion zu Brennstoffzellen** (Magdeburg)
- 2 Jahre **industrielle Brennstoffzellenforschung** (**Samsung/Südkorea**)
- Nachwuchsgruppenleitern & Jun.-Prof. **Portable Energiesysteme** (MPI/U. Magdeburg)
- Institutsleiterin und Professorin für **Energie- & Systemverfahrenstechnik**, TU Braunschweig (2012-20)
- **Seit 4/2020**: Leiterin und Professorin IAM-WET (Werkstoffe d. Elektrotechnik), ETIT, KIT

Arbeitsgebiet Elektrochemische Technologien

- Nachhaltige Energiewandlung und Speicherung
- Batterien, Brennstoffzellen, Elektrolyse





Leitung: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer

Charakterisierung und Modellierung von elektrochemischen Technologien für nachhaltige Energieversorgung und Elektromobilität

Anwendungsschwerpunkte:

- Elektrochemische Energiewandler (Festelektrolyt- und Polymer-Brennstoffzelle, Elektrolyse)
- Elektrochemische Energiespeicher (Lithium-Ionen- und All-Solid-State-Batterien)
- Elektrosynthese (Power-to-Fuels/Chemicals, CO₂-Nutzung)
- Mischleitende Werkstoffe für Gasmembranen/Sensoren

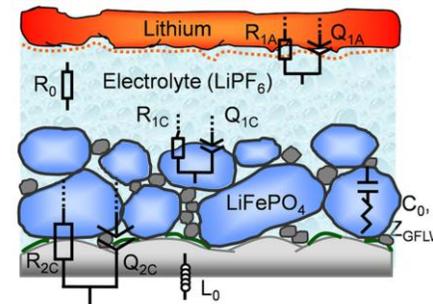
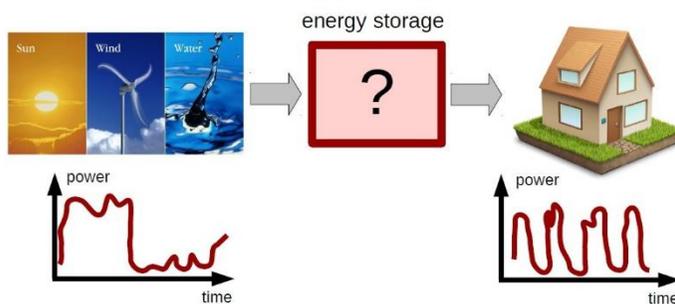
Forschungsschwerpunkte:

- Elektrische/elektrochemische Reaktions- und Transportvorgänge an Elektroden und in elektrochemischen Zellen
- Analyse und Optimierung elektrochemischer Technologien

Methodische Schwerpunkte:

- Elektrische/elektrochemische Mess- und Auswerteverfahren im Frequenz- und Zeitbereich
- Elektrochemische Modellierung und Simulation
- 3D-Analyse poröser Medien (Tomographieverfahren)

- **Batterien und Brennstoffzellen** (WS, Master)
- **Batterie- und Brennstoffzellensysteme** (SS, Master)
- **Batteriemodellierung mit MATLAB** (WS, Bachelor)
- **Praktikum Batterien und Brennstoffzellen** (WS, Master)
- **Modellbildung elektrochemischer Systeme** (SS, Master)
- **Sensoren** (WS, Master)
- **Elektrotechnik für Wirtschaftsingenieure I/II** (WS / SS, Bachelor, WING)
- **Seminare zu Batterien, Brennstoffzellen und Sensorik** (WS / SS, Bachelor, Master)
- **In Planung: Electrochemical Energy Engineering (Bachelor, ab WS20 o. SS21)**

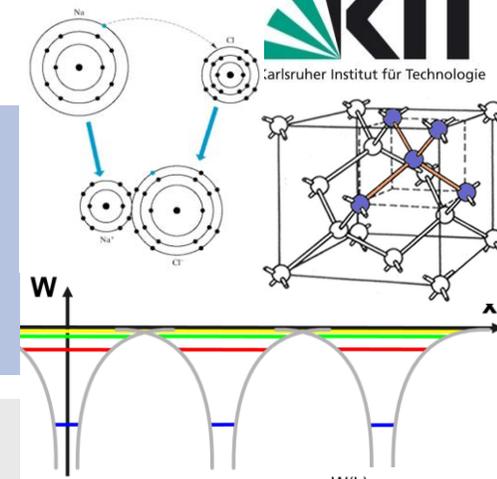


Lehrveranstaltung Optik und Festkörperelektronik

Ziel und Rückblick

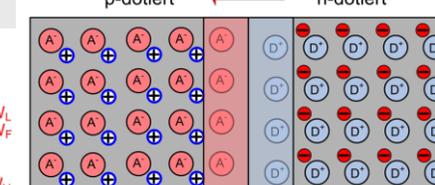
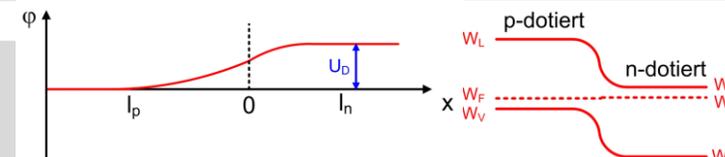
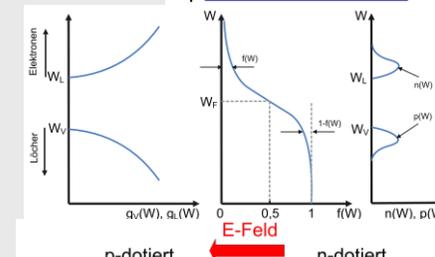
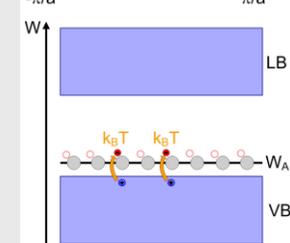
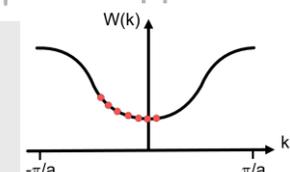
Ziel der Vorlesung (Teil: Festkörperelektrik)

- Verständnis zu **Aufbau und Zuständen** von Feststoffen
- Verständnis zu **Ladungstransport in ihnen und an ihrer Grenzfläche**



Bisher beantwortet

- Wie sind **Atome** aufgebaut? (Kerne, e^- , diskrete Energieniveaus, Orbitale)
- Wieso führen Energieniveaus in Atomen zu unterschiedlichen
 - **Chem. Bindungen** zwischen Atomen (kovalent, ionisch, metallisch, v-d-Waals, ...)
 - **Strukturen** (kristallin (fcc, hcp), polykristallin, amorph)
- Wieso und wie gut leiten Halbleiter e^- ? (teilbesetzte Bänder, Loch, T, Dotieren)
- Welche **Prozesse tragen zu Strom in Halbleitern** (Metallen) bei?
 - Driftstrom (E); Diffusionsstrom ($dn/dx, t$), Generation/Rekomb. ($T, h\nu$)
- Was passiert an **Grenzflächen von p- und n-Halbleitern** & in pn-Diode?
 - **Raumladungszone**, Elektrochem. GGW (W_f), **Spannung**, Sperrschicht



Ziel der Vorlesung (Teil: Festkörperelektrik)

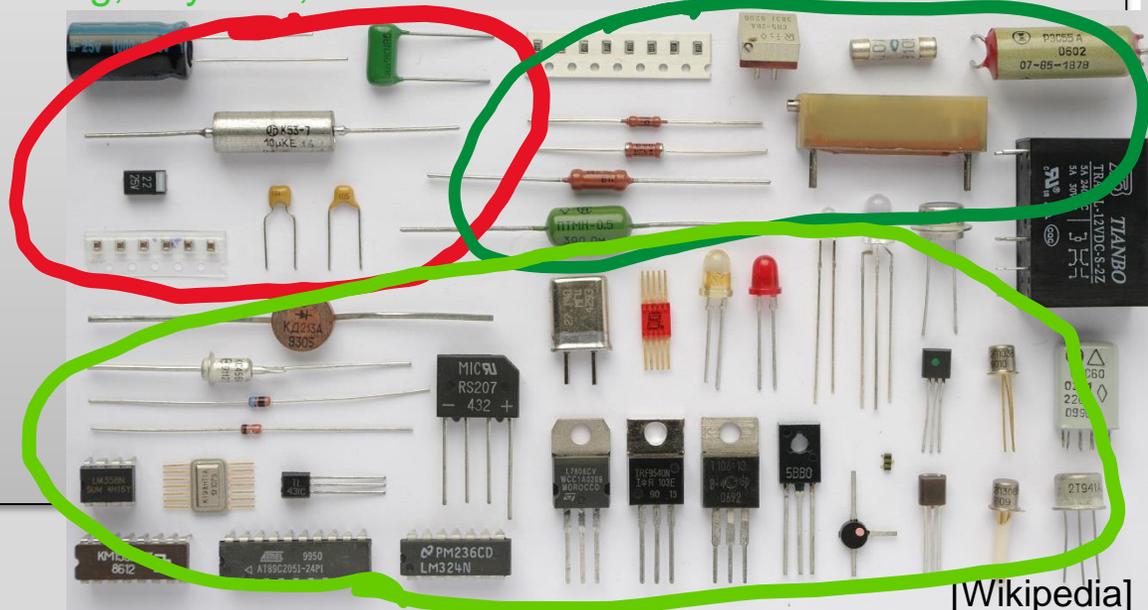
- Verständnis zu Aufbau und Zuständen von Feststoffen
- Verständnis zu Ladungstransport in ihnen und an ihrer Grenzfläche

Was kann ich mit dem Wissen anfangen?

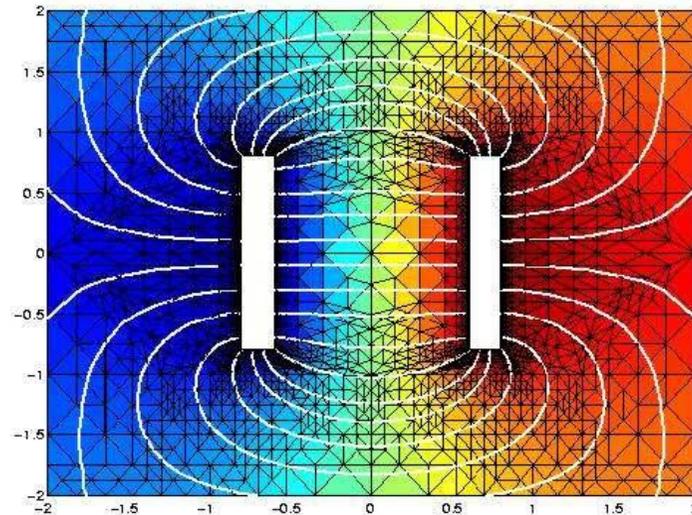
- Verständnis von Aufbau, Verhalten und Prozessen von Materialien elektrischer Bauteile
- Materialauswahl, Verständnis Temperatureffekt/Versagen/..., Optimierung, Simulation

- erledigt ✓
- Diode, Transistor, integrierte Schaltung, Thyristor, Gleichrichter -> Halbleiter ✓
 - Elektrischer Widerstand
 - aus Metall ✓
 - aus Keramik -> Halbleiter ✓

- Kommt Jetzt!
- Isolator?
 - Kondensator?
 - Spannungsquelle (Batterie,..)?



Dielektrika



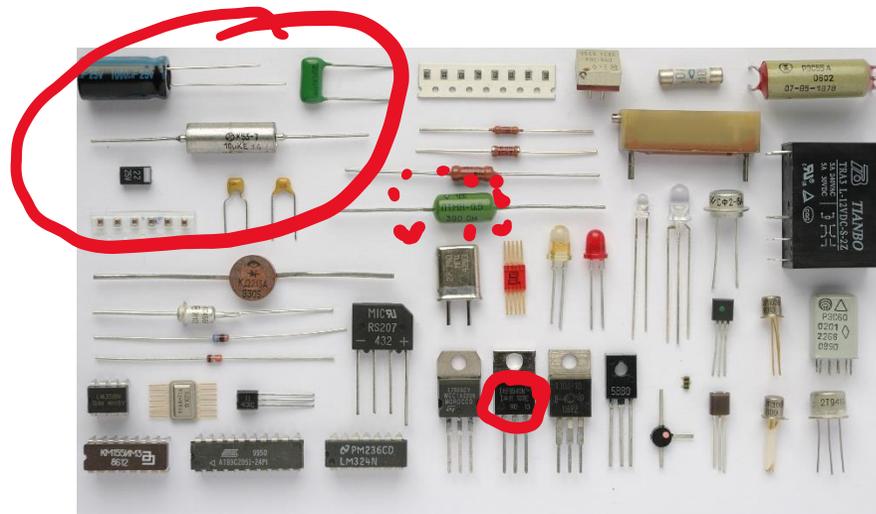
- E. Ivers-Tiffée, W. von Münch, *Werkstoffe der Elektrotechnik*, Teubner, 10. Aufl. 2007
(freier Download KIT-Bib: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-8351-9088-7>)
- G. Fasching, *Werkstoffe für die Elektrotechnik*, Springer, 4. Aufl. 2005
(Präsenzexemplar KIT-Bib.; gute, tiefere Erklärungen)



Abb. sind, so nicht anders angegeben, dem Vorlesungsskript OFE oder Buch Ivers-T. entnommen

Dielektrika

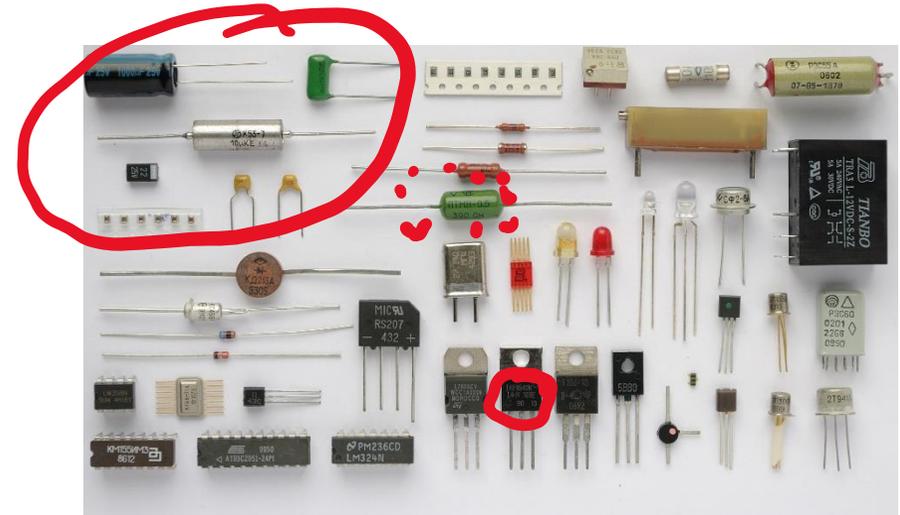
Aufbau und elektrische Eigenschaften



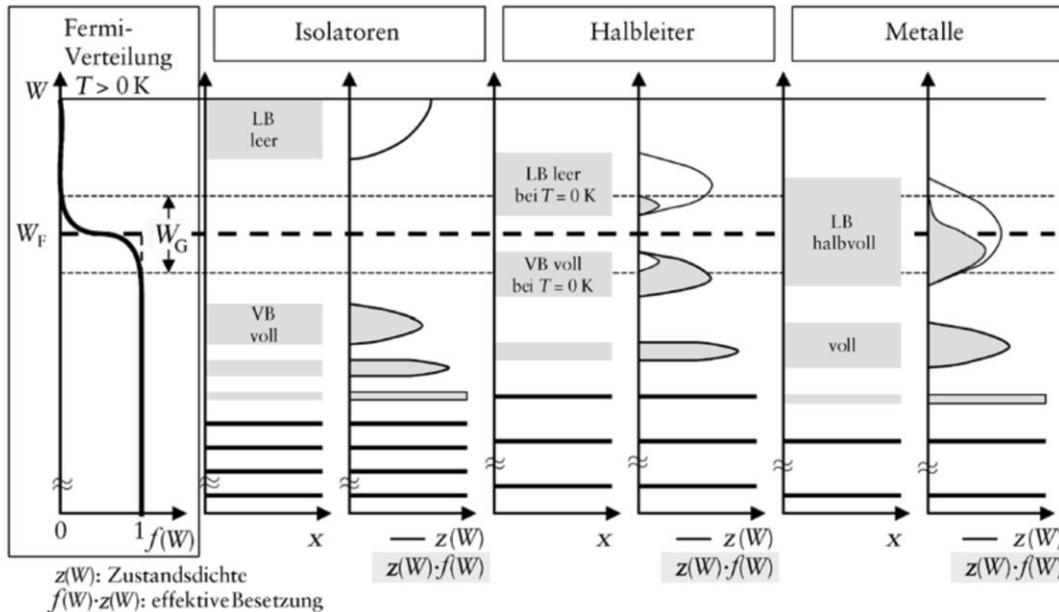
[Wikipedia]

Einsatzbereich von Dielektrika

- **Isolation** für Kabel/Bauelemente/Platinen (Substrate)
- **Kondensatoren**
- **Dielektrika** in Halbleiter-Bauelementen, z.B. Gate-Elektrode bei Feldeffekttransistoren



[Wikipedia]



Merke:

- **Metalle** leiten e^- aufgrund niedrigem oder mit Valenzband (VB) überlappendem Leitungsband (LB)
- **Halbleiter** leiten e^- aufgrund teilbesetzter VB und LB
- **Dielektrika** (inkl. Isolatoren) leiten keine e^- aufgrund vollem VB, leerem LB und großem Bandabstand

Lehrveranstaltung Optik und Festkörperelektronik

Dielektrika – typische Materialien

Beispiele von Materialien

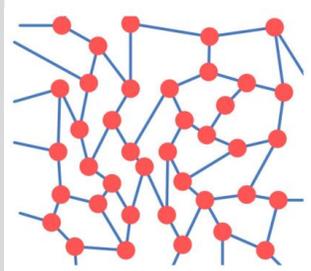
- Gase
- Flüssigkeiten
- Kunststoffe
- Keramiken und Gläser



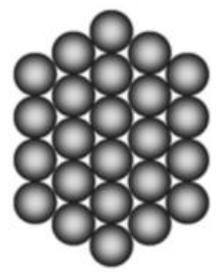
[Wikipedia]



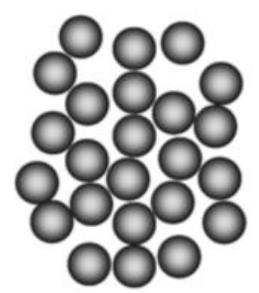
[Kunststoffe.de]



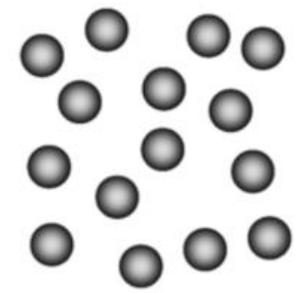
amorph



Kristall

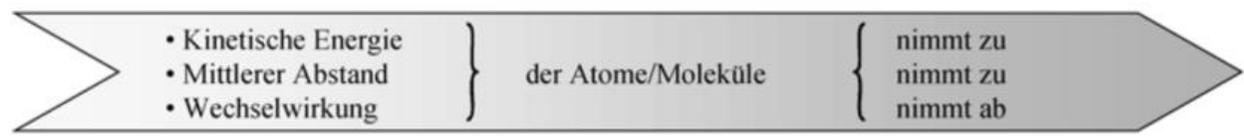


Schmelze



Gas

Temperatur:	(T_1)	<	(T_2)	<	(T_3)
Zustand:	fest		flüssig		gasförmig
Ordnung:	Fernordnung		Nahordnung		Unordnung

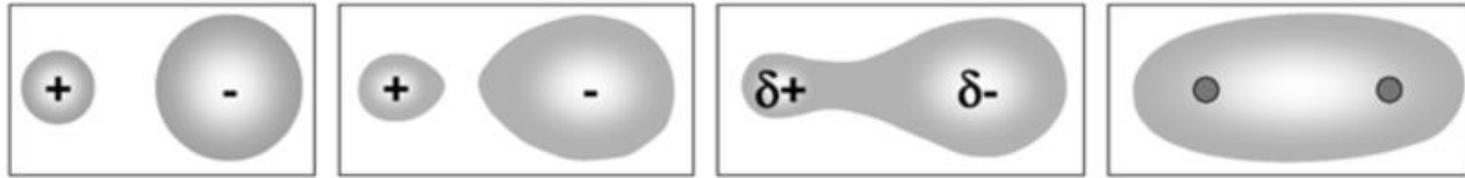


Keramik [Brevier]



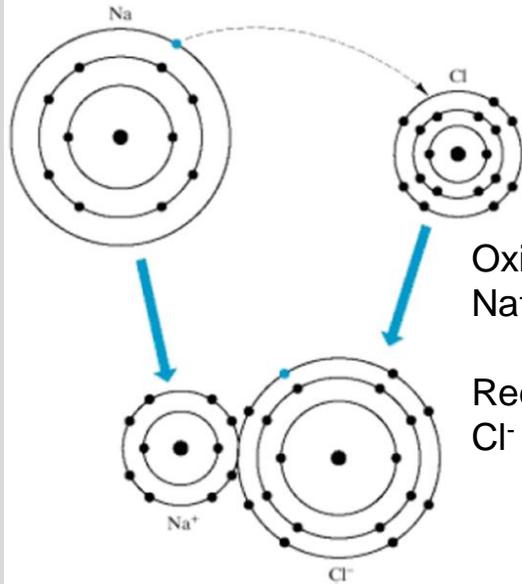
[Dachauer Spezialglas]

Wiederholung: Unterschied ionische und kovalente Bindung



ionische Bindung
nicht gerichtet

Bsp. NaCl: Na^+ , Cl^-

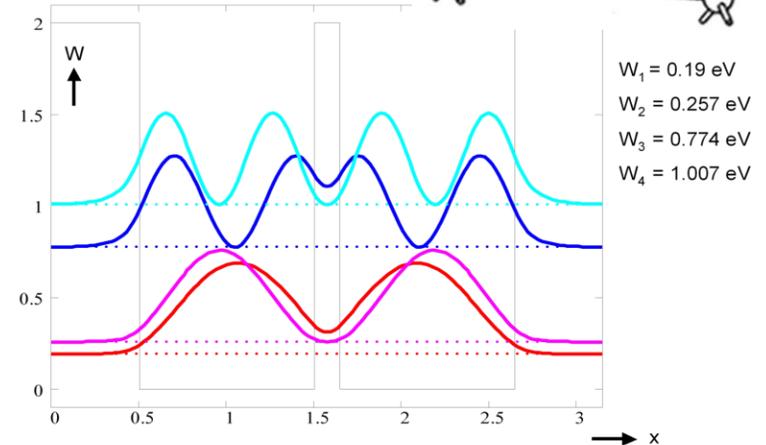
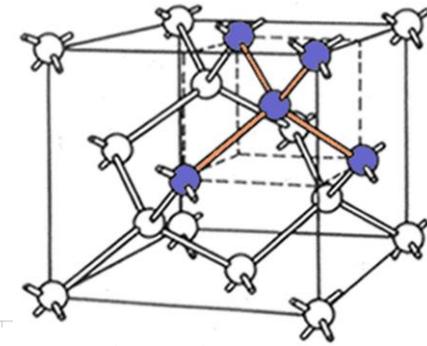


Oxidation (e^- Abgabe) von Na:
 $\text{Na}^+ + e^-$

Reduktion (e^- Aufnahme) von Cl:
 Cl^-

kovalente Bindung
gerichtet

Bsp.: Fester
Si-Kristall

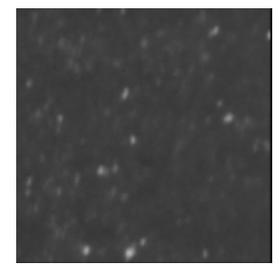


Lehrveranstaltung Optik und Festkörperelektronik

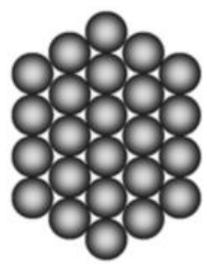
Spezifika von Gasen

Beispiele von Materialien

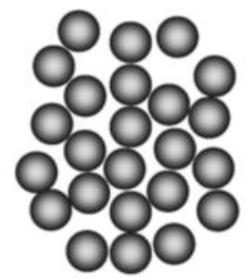
- **Gase**
- Flüssigkeiten
- Kunststoffe
- Keramiken/Gläser
- **Ungeordnete Bewegung**
(Brownsche Bewegung: $\overline{E_{kin}} = \frac{1}{2}k_bT$)
- **Hoher Abstand ermöglicht keinen e⁻ Transport** zwischen Molekülen
- Anziehende Wechselwirkung vernachlässigbar



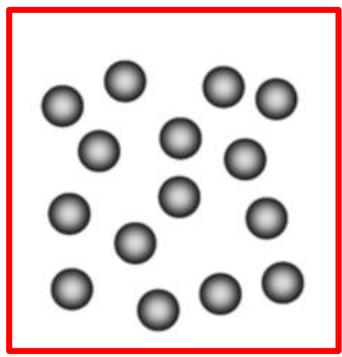
20 nm Latex-Kugeln in Wasser
[J Krieger, DKI]



Kristall

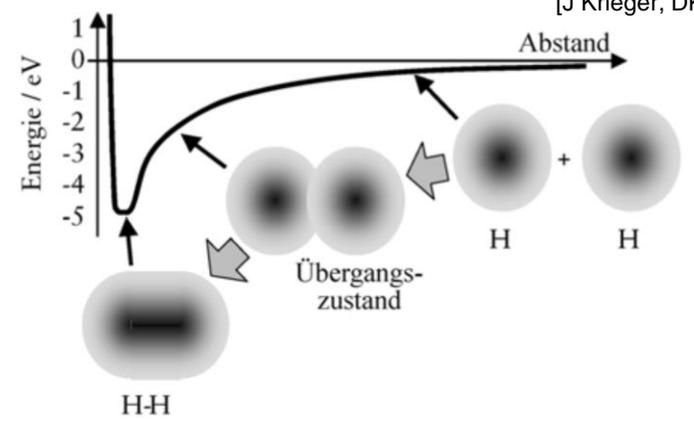
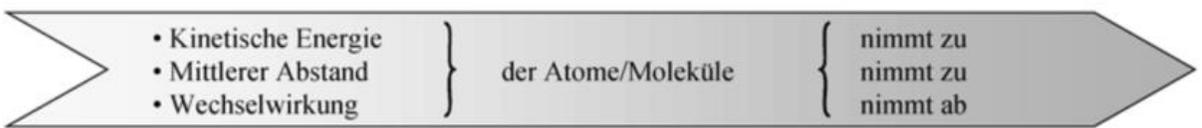


Schmelze



Gas

Temperatur: $(T_1) < (T_2) < (T_3)$
 Zustand: fest < flüssig < gasförmig
 Ordnung: Fernordnung < Nahordnung < Unordnung

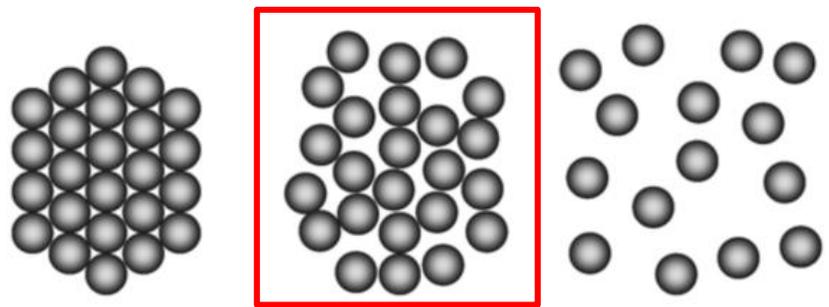


Kovalente Bindung im gasförmigen Wasserstoffmolekül

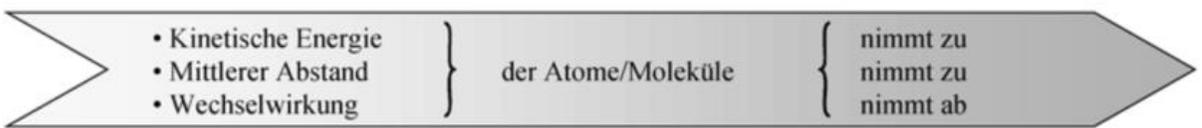
Auch Gasmoleküle können Dipole haben! Bsp.: CO₂

Beispiele von Materialien

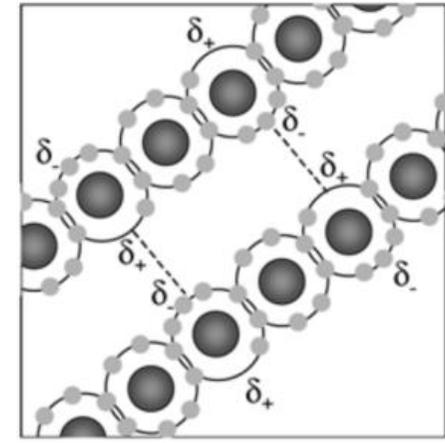
- Gase
- **Flüssigkeiten**
- Kunststoffe
- Keramiken/Gläser
- Ungeordnete Bewegung (Brown)
- **Hoher Abstand ermöglicht keinen e⁻-Transport** zwischen Molekülen; ggf. Ionenleitung
- **Geringe anziehende Wechselwirkung** durch van-der-Waals-Kräfte oder Wasserstoffbrückenbindung



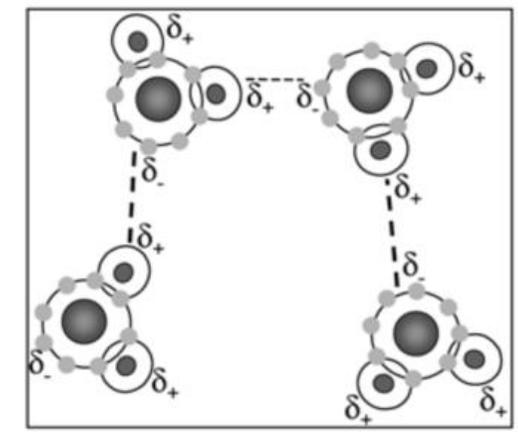
	<u>Kristall</u>	<	<u>Schmelze</u>	<	<u>Gas</u>
Temperatur:	(T_1)		(T_2)		(T_3)
Zustand:	fest		flüssig		gasförmig
Ordnung:	Fernordnung		Nahordnung		Unordnung



• Van der Waals



• Wasserstoffbrücke

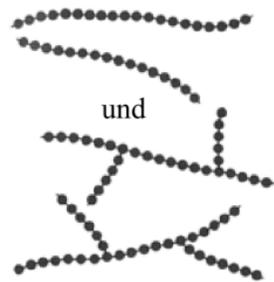


Bsp. Wasser (H₂O)

Beispiele von Materialien

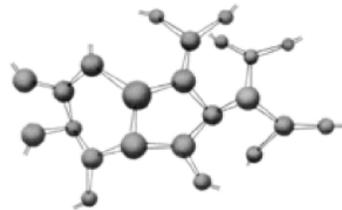
- Gase
- Flüssigkeiten
- **Kunststoffe**
- Keramiken und Gläser
- **Organische Feststoffe** (organisch: auf Kohlenstoffbasis) mit langen Molekülketten
- Polymer (=Makromolekül) enthält 10^3 - 10^5 Grundeinheiten (Monomere) aus C, H, O, N, S, P und Halogenen (Cl, F)
- Molekülketten unterschiedlich lang und verzweigt; oft amorphe Struktur
- **Starke kovalente Bindung in Kette, schwache Bindung zwischen Ketten** (van-der-Waals, Dipole, Wasserstoffbrücken)
- **Meist vernachlässigbare Leitfähigkeit** durch große Bandlücke
- Verbesserte Leitfähigkeit durch Dotierung oder in speziellen Kohlenstoffketten

Thermoplaste



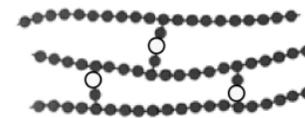
- lineare Ketten
- elastisch/plastisch verformbar bei 100...300 °C

Duroplaste



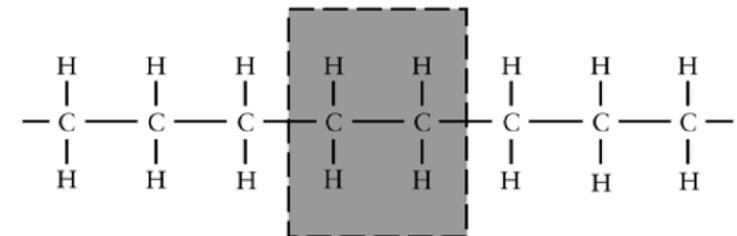
- räumlich vernetzte Ketten
- große Festigkeit formstabil, temperaturbeständig

Elastomere



○ O- oder S-Atom

- schwach vernetzte Ketten, über O- oder S-Atome Modifikation der Thermoplaste
- weichelastisch (gummiartig) bis zur Zersetzung



Polymer: räumliche Molekülstruktur aus Monomeren



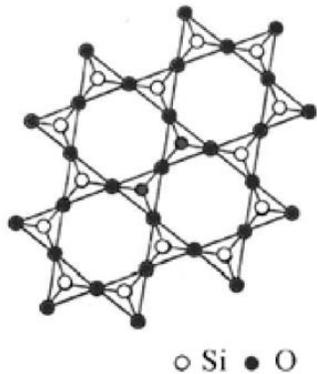
Bild 1.50 Polyethylen (PE) [Callister2000]

Bild 1.48 Kunststoffe: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere [Callister2000]

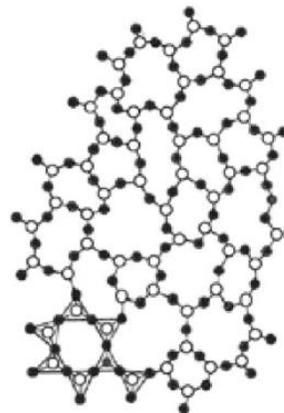
Beispiele von Materialien

- Gase
- Flüssigkeiten
- Kunststoffe
- **Keramiken und Gläser**
 - **Anorganische nichtmetallische Feststoffe**, oft Metall-Oxide/Carbide/Nitride
 - **Keramik**: kristallin; **Glas**: amorph; **Glaskeramik**: partiell kristallin
 - Verbindungen kovalent (z.B. SiC), gemischt (SiO_2) bis ionisch (z.B. CaO)
 - **Gläser: amorph, kovalente oder ionische Verbindungen**
 - Meist geringe elektrische Leitfähigkeit aufgrund großer Bandlücke
 - Spezialkeramiken bei hohen Temperaturen Ionen-leitend

Kristallines SiO_2 (z.B. Quarz)

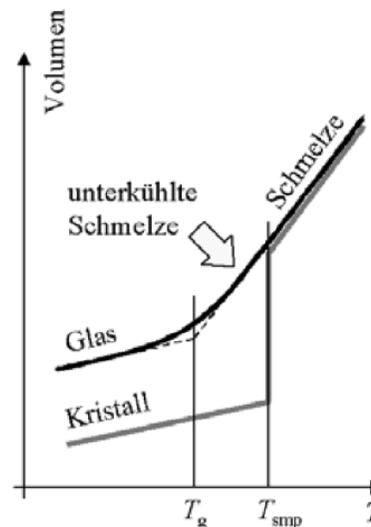


Amorphes SiO_2 (Glas)



- Geordnete Vernetzung von SiO_4 -Tetraedern
- Nahordnung
- streng periodische Fernordnung

- Ungeordnete Vernetzung von SiO_4 -Tetraedern
- weitgehend feste Nahordnung
- keine Fernordnung



Amorpher Festkörper (Glas)

Übergang: Schmelze \rightarrow unterkühlte Flüssigkeit \rightarrow Glas
 T_g : Glastransformationstemperatur, Viskosität: 10^{12} Pa·s
 $T > T_g$: unterkühlte Flüssigkeit, d.h. Schmelze
 $T < T_g$: Glas, d.h. amorpher Festkörper
 kontinuierliche Volumenänderung, $V_{\text{Glas}} > V_{\text{Kristall}}$

Kristalliner Festkörper

Übergang: Schmelze \rightarrow Kristall
 T_{smp} : Schmelzpunkt
 diskontinuierliche Volumenänderung

Im physikalischen Sinn ist Glas eine eingefrorene, unterkühlte Flüssigkeit

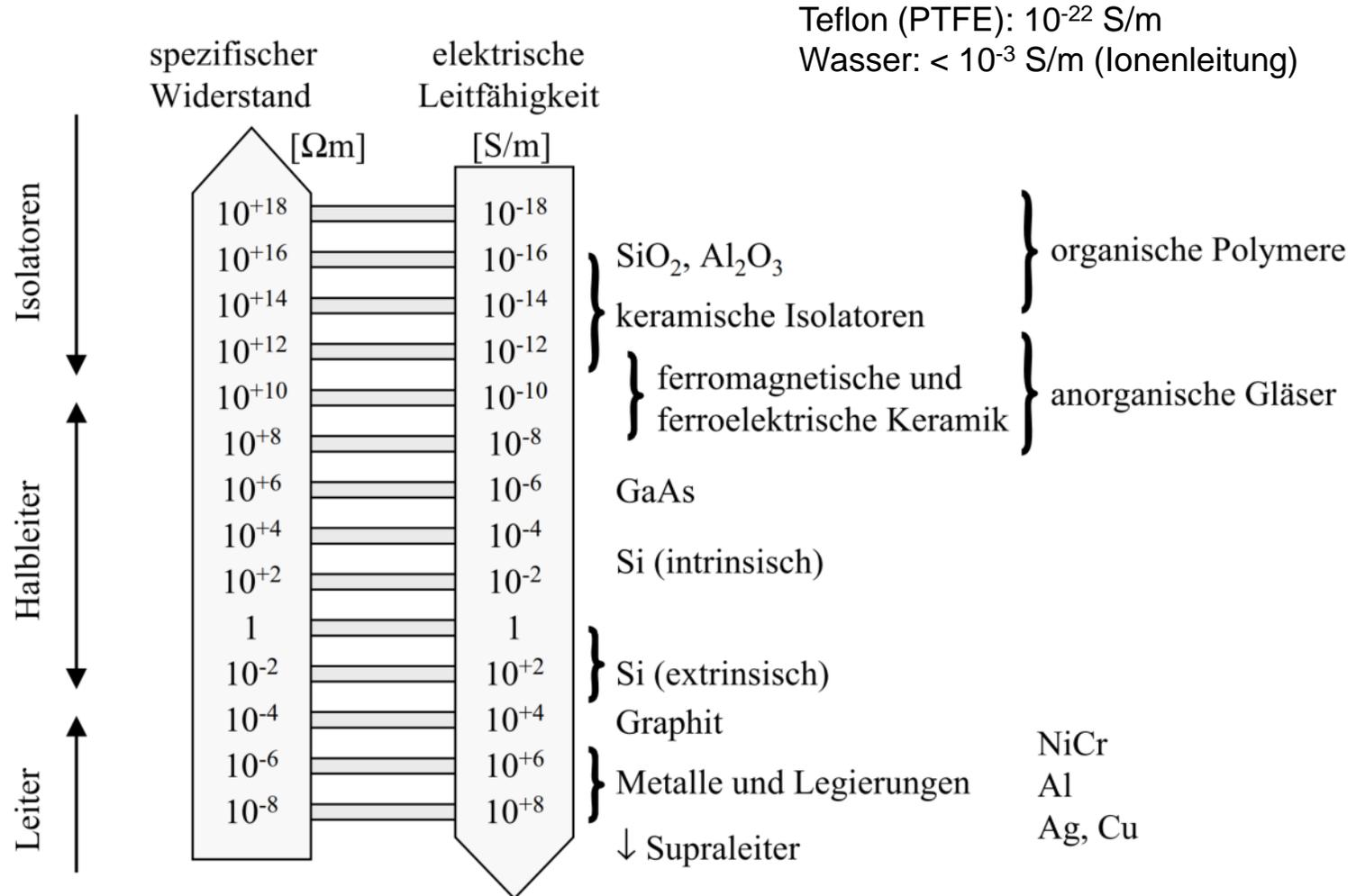
Bild 1.44 Abkühlkurve: amorpher und kristalliner Festkörper [Scholze1988]

Dielektrika

- Gase
- Flüssigkeiten
- Kunststoffe
- Keramiken & Gläser

El. Leitfähigkeit
↓
 $j = \sigma E = \frac{1}{\rho} E$
↑
Spez. Widerstand

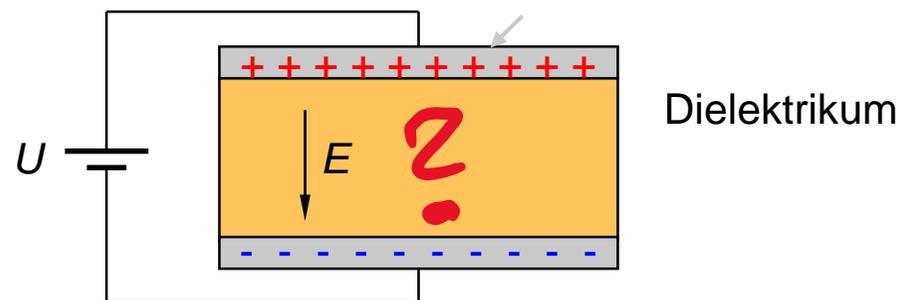
Merksenswert!
Freie e⁻ pro cm³:
- Isolator: ~1
- Metall: ~10²³





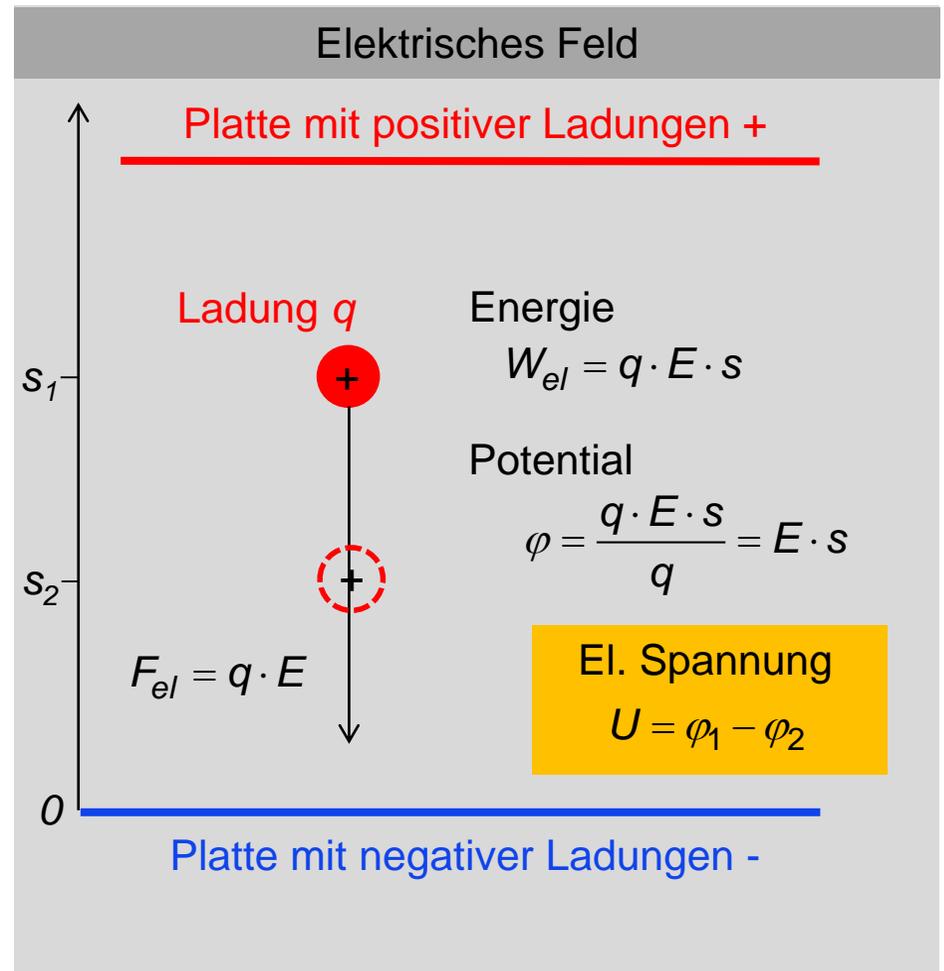
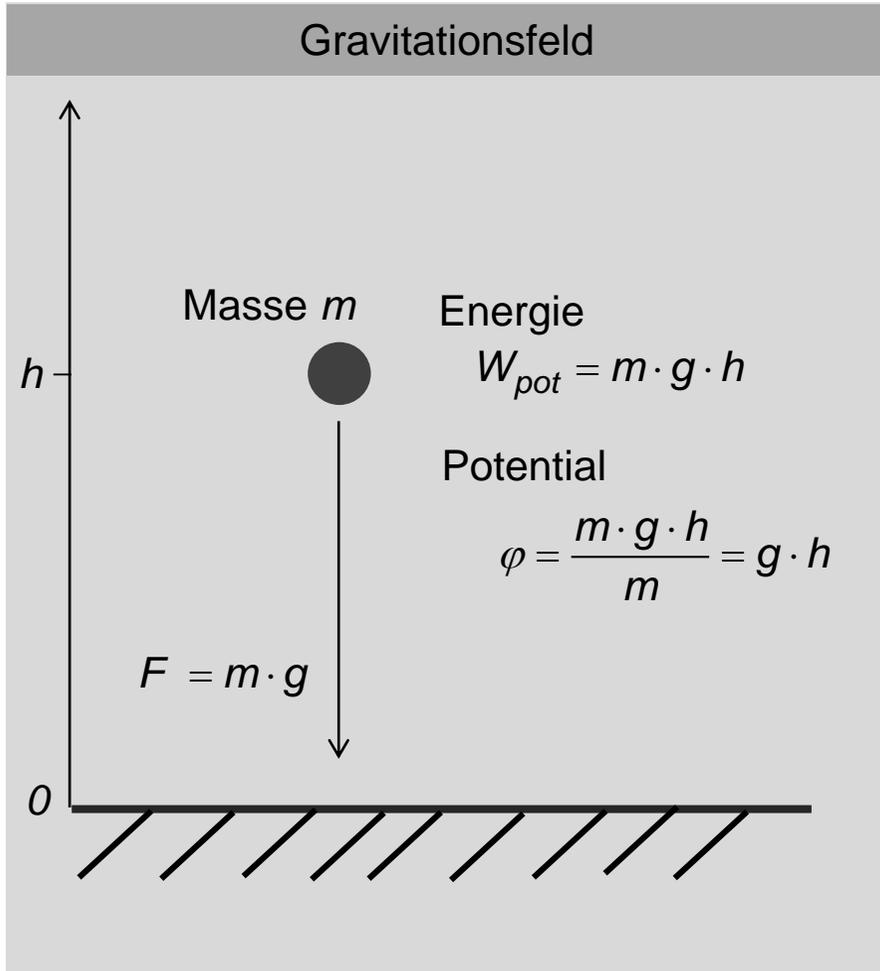
Dielektrika

Was passiert mit Dielektrika im elektrischen Feld?



Gravitationsfeld – Elektrisches Feld

Elektrische Spannung U

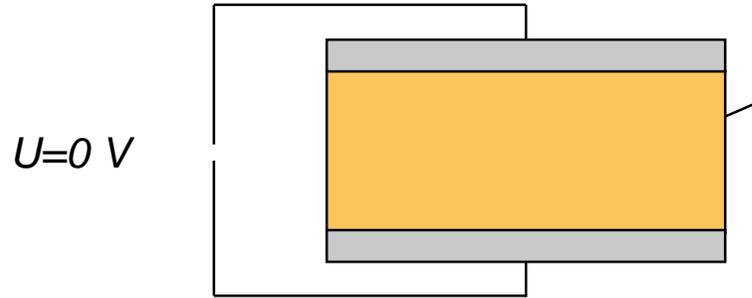


Potential: „Fähigkeit eines Feldes an Ort x (h, s), eine Arbeit zu verrichten“.

Gedankenexperiment

Dielektrikum zwischen zwei Platten

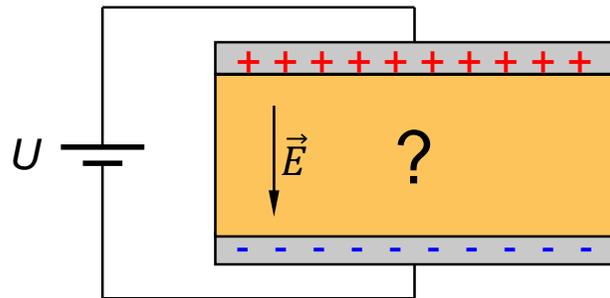
Schritt 1: der Aufbau



Dielektrikum
• elektrisch isolierend

zwischen zwei elektrisch leitenden Platten

Schritt 2: Dielektrikum unter Spannung



Anlegen einer Spannung zwischen den Platten führt zu einem elektrischen Feld E im Dielektrikum

Frage: Wie reagiert das Dielektrikum?

Antwort: Kompensation der Plattenladung durch entgegengesetzte Ladungen im Dielektrikum

-> elektr. Flussdichte

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E}$$

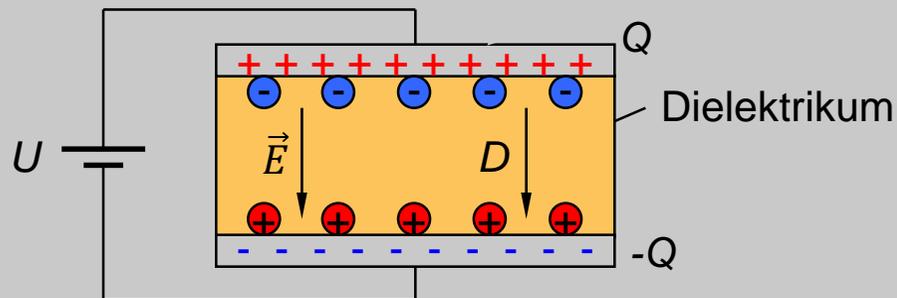
Noch offen: Woher kommen die Ladungen im Dielektrikum, wenn es nicht e⁻ leitfähig ist? Was ist ϵ_r ?

Definitionen

Makroskopische Größen für Dielektrika

Feldstärke und elektr. Flussdichte

Die elektr. Flussdichte D ist die Ladung pro Fläche, die nach Anlegen eines elektrischen Felds E auf die Platten verschoben wird.



Dielektrizitätszahl

In linearer, isotroper Materie ist die angelegte Feldstärke E proportional zur elektrischen Flussdichte D :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E}$$

ϵ_r : relative Dielektrizitätszahl des Materials [-]

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante
= $8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm

Doppelschichtkapazität C

- Die auf den Platten gespeicherte Ladung Q ist proportional zur angelegten Spannung:

$$Q = C U$$

-> Doppelschichtkapazität $C \sim \epsilon_r$

$$Q = C U$$

$$Q = D A$$

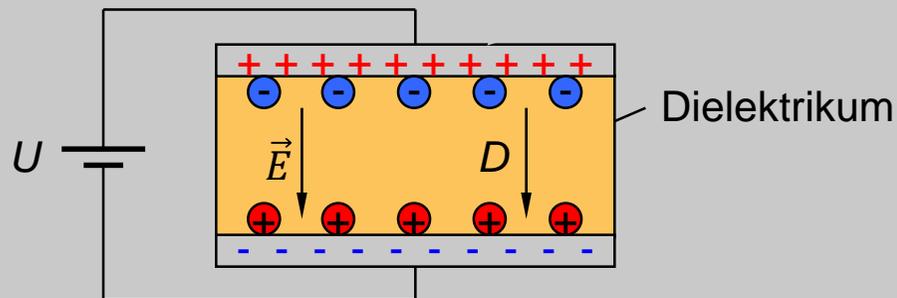
$$U = E d$$

$$C = \frac{D A}{U} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Kapazität C [As/V]
Plattenfläche A [m²]
Plattenabstand d [m]

Feldstärke und elektr. Flussdichte

Die elektr. Flussdichte D ist die Ladung pro Fläche, die nach Anlegen eines elektrischen Felds E auf die Platten verschoben wird.



Dielektrizitätszahl

In linearer, isotroper Materie ist die angelegte Feldstärke E proportional zur elektrischen Flussdichte D .

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E}$$

ε_r : relative Dielektrizitätszahl des Dielektr. [-]

ε_0 : elektrische Feldkonstante

$$= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$$

Fragen, die wir beantworten werden im Folgenden:

- Woher kommen die Ladungen im Dielektrikum? Was passiert mit dem Dielektrikum im Feld?
- Wie lässt sich daraus die rel. Dielektrizitätszahl bestimmen?
- Lässt sich das dielektrische Verhalten eines Materials beeinflussen? Lässt es sich messen?
- Ist das dielektrische Verhalten technisch nutzbar?

Ist dielektrisches Verhalten messbar und reversibel?

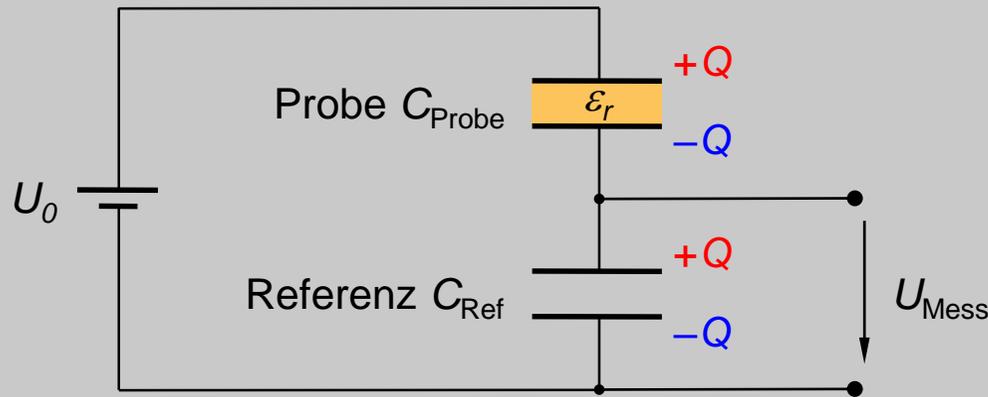


https://www.youtube.com/watch?v=XYOUWp9i_-4&feature=youtu.be

Zeit: 13:18-16:12

Wie kann die Dielektrizitätszahl/Kapazität gemessen werden?

Sawyer-Tower-Schaltung



Probe: Plattenkondensator mit dünnem Dielektrikum

$$C_{\text{Probe}} = \frac{Q}{U} = \frac{D \cdot A}{E \cdot d} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Aufgrund der Serienschaltung ist die Ladung Q auf Referenz- und Probekondensator gleich groß.

$$Q = C_{\text{Ref}} \cdot U_{\text{Mess}}$$

$$Q = C_{\text{Probe}} \cdot (U_0 - U_{\text{Mess}})$$

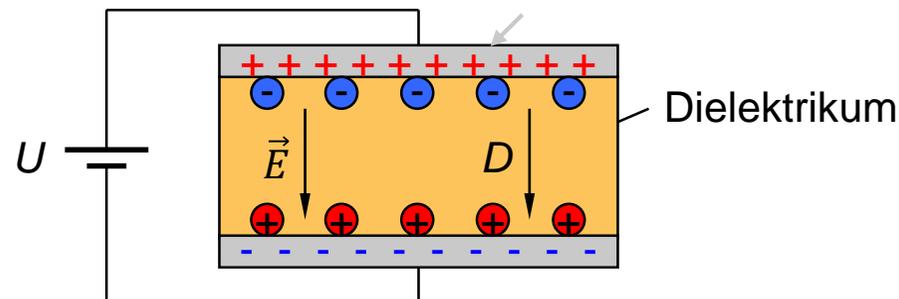
Damit gilt für die relative Dielektrizitätszahl des Dielektrikums:

$$\epsilon_r = \frac{d}{\epsilon_0 \cdot A} \cdot C_{\text{Ref}} \cdot \frac{U_{\text{Mess}}}{U_0 - U_{\text{Mess}}}$$



Dielektrika

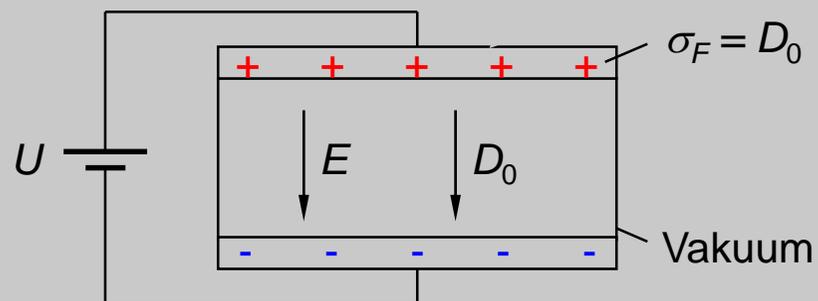
**Woher kommen die Ladungen?
= Was ist Polarisation?**



Plattenkondensator bei konstantem elektrischen Feld

Polarisation im Plattenkondensator

El. Flussdichte im Vakuum

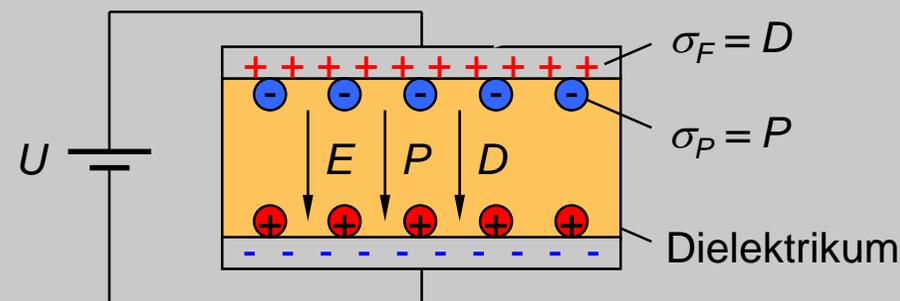


D_0 : El. Flussdichte im Vakuum

σ_F : freie, flächenbezogene Ladung auf den Kondensatorplatten

[Ivers-Tiffée 2007]

El. Flussdichte im Dielektrikum



P : **Polarisation**

σ_P : gebundene, flächenbezogene Polarisationsladung auf der Außenseite des Dielektrikums

$$\vec{D}_0 = \epsilon_0 \cdot \vec{E}$$

elektrische Feldkonstante
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}$$

Merke: Dielektrika erzeugen eine Polarisation, die die el. Flussdichte erhöht!

Was heisst nun Polarisierung?

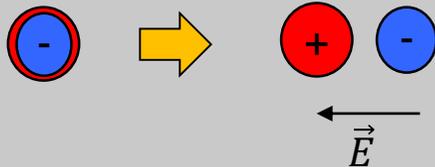
Wo finden wir Polarisierung in Materie?

Polarisation: eine Bestandsaufnahme

- Wir unterscheiden positive Ladung (+) und negative Ladungen (-)
- Entgegengesetzte Ladungen ziehen sich an, gleiche Ladungen stoßen sich ab (Coulomb-Kräfte)
- Liegen positive und negative Ladung aufeinander, so herrscht Neutralität
- Ausbildung von Polen, wenn + und - örtlich getrennt



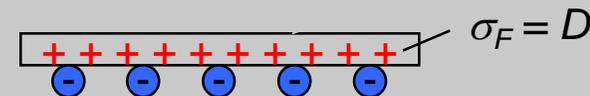
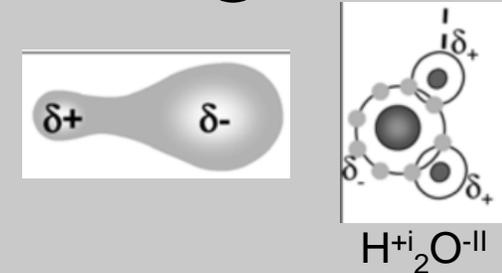
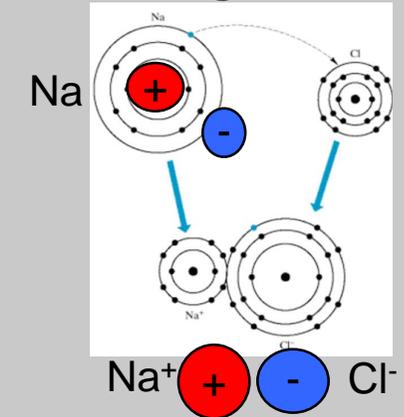
- Polarisation = Ausbildung von Polen



- Anlegen von el. Feld E führt zur Polarisation!

Wo finden wir getrennte Ladungen?

- Im Atom
- Bei Ionen
- In Molekülen (Dipole)
- An Grenzflächen



Merke: Es gibt Ladungstrennungen auf untersch. Skalen! \vec{E} verursacht Polarisation!

Polarisationsmechanismen

Grundtypen der dielektrischen Polarisation

Grundtypen

Elektronenpolarisation

Auslenkung von Atomkern und -hülle
(induzierte Dipole)

Ionenpolarisation

Auslenkung von Kationen und Anionen
(induzierte Dipole)

Orientierungspolarisation

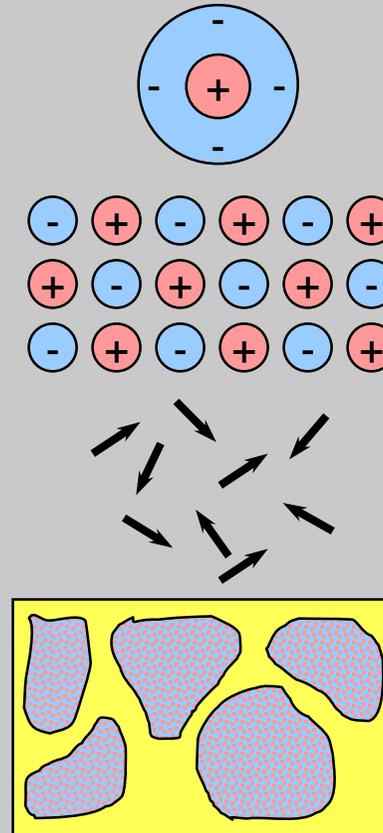
Ausrichtung permanent vorhandener
Dipole

Raumladungspolarisation

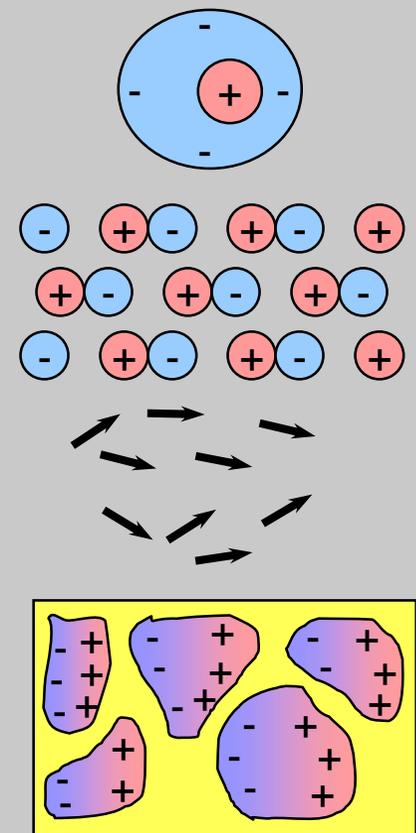
Ansammlung freier Ladungsträgern
an isolierenden Korngrenzen

[Schaumburg 1994]

$E = 0$



$E > 0$



El. Flussdichte in Materie (allg.)

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P$$

In linearer Materie sind **Feldstärke und Polarisation proportional**

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot E$$

χ_e : elektrische Suszeptibilität [-]

Daher gilt $D = \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi_e) \cdot E$

Definition: relative Dielektrizitätszahl

$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e$$



$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E}$$

in linearer Materie

Da sich Polarisation der unterschiedlichen Ebenen summiert:

$$P = \sum P_i$$

können wir auch elektrische Suszeptibilität addieren:

$$\chi_e = \underbrace{\chi_{el} + \chi_{ion}}_{\text{unpolare/ polare Dielektrika}} + \chi_{or} + \chi_{RL}$$



unpolare/ polare Dielektrika

χ_{el} : Elektronenpolarisation

χ_{ion} : Ionenpolarisation

χ_{or} : Orientierungspolarisation

χ_{RL} : Raumladungspolarisation

Merke: Über die Suszeptibilität lassen sich versch. Polarisationsbeiträge addieren!

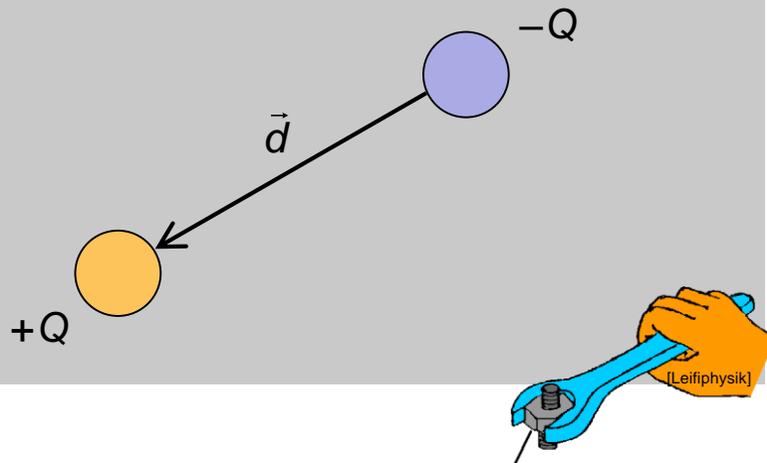
Noch ein paar Grundlagen: In welche Richtung weist P ? Wie kommen wir vom mikroskopischen Verständnis zum makroskopischen P ?

Elektrisches Dipolmoment \vec{p}

(mikroskopisch, z.B. einzelnes Molekül/Atom)

Das Moment eines elektrischen Dipols \vec{p} ist definiert als Produkt aus Ladung und Abstand d , um den die Ladungen Q verschoben sind.

$$\vec{p} = |Q| \cdot \vec{d} \quad [p] = \text{As m}$$



Analogie Mechanik: Drehmoment = Länge x Kraft

Polarisierbarkeit α

(mikroskopisch)

In einfachen Fällen ist das Dipolmoment proportional zur Feldstärke, die am Ort des Dipols wirkt. (analog zu $P = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot E$)

$$\vec{p} = \alpha \cdot \vec{E} \quad [\alpha] = \text{As m}^2 \text{V}^{-1}$$

Polarisation P

(makroskopisch)

Die **Polarisation P** ist definiert als **Summe der Dipolmomente** pro Volumen.

$$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i = \frac{N}{V} \cdot \vec{p} = n \cdot \vec{p} \quad [P] = \text{As m}^{-2}$$

\vec{p} : mittleres Dipolmoment pro Volumen V
 n : Konzentration der Dipole [m^{-3}]