

# Werkstoffe der Elektrotechnik

von Gerald Meier

## 1 Überblick

$j = \sigma \cdot E$	j: Stromdichte	[A/m <sup>2</sup> ]
	$\sigma$ : Tensor der elektrischen Leitfähigkeit	[S/m]
	E: elektrische Feldstärke	[V/m]
$B = \mu_0 H + J(H)$	B: magnetische Felddichte	[Vs/m <sup>2</sup> ]
	H: magnetische Feldstärke	[A/m]
	J: magnetische Polarisierung	
$D = \epsilon_0 E + P(E)$	D: elektrische Verschiebungsdichte	
	E: elektrische Feldstärke	[V/m]
	P: elektrische Polarisierung	

## 2 Elektrische Leitfähigkeit

### 2.1 elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand

$j = \sigma \cdot E$	j: Stromdichte	[A/m <sup>2</sup> ]
	$\sigma$ : Tensor der elektrischen Leitfähigkeit	[S/m]
	E: elektrische Feldstärke	[V/m]
$1/\sigma = \rho$	$\rho$ : spezifischer Widerstand	[ $\Omega$ m]
$\sigma = \sum_i n_i \cdot q_i \cdot \mu_i$	$\sigma$ : Leitfähigkeit	[S/m]
	$n_i$ : Ladungsträgerdichte	[1/m <sup>3</sup> ]
	$q_i$ : Ladung	[C]
	$\mu_i$ : Beweglichkeit	[m <sup>2</sup> /Vs]
$\mu = v/E$	$\mu$ : Beweglichkeit	[m <sup>2</sup> /Vs]
	v: Geschwindigkeit	[m/s]
	E: Feldstärke	[V/m]
MATTHIESEN-Regel:	$\rho$ : spezifischer Widerstand	[ $\Omega$ m]
$\rho = \rho_T(T) + \rho_S + \rho_M$	$\rho_T$ : Beitrag der Gitterschwingungen	[ $\Omega$ m]
	$\rho_S$ : Beitrag der Gitterfehler	[ $\Omega$ m]
	$\rho_T$ : Beitrag der magnetischen Unordnung	[ $\Omega$ m]

### 2.2 Hall-Effekt

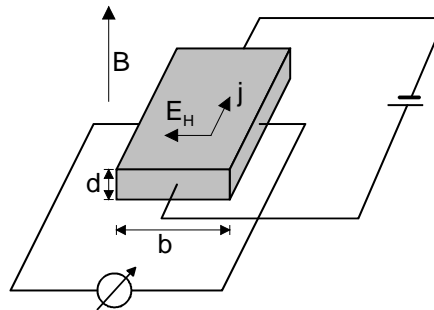
$$E_H = R_H (j \times B)$$

$$U_H = \frac{R_H}{d} (I \times B)$$

$$\text{Hallkonstante } R_H = \frac{1}{q_0 \cdot n}$$

$$\sigma = q_0 \cdot n \cdot \mu \quad \rightarrow \quad \mu = R_H \cdot \sigma$$

$$\text{Lorentzkraft } F = q(v \times B)$$



### 2.3 Wärmeleitfähigkeit $\kappa$

WIEDEMANN-FRANZ'sches Gesetz

$$\kappa = \kappa_{\text{elektr.}} + \kappa_{\text{Gitter}}$$

$$\kappa_{\text{elektr.}} = \text{const.} \cdot \sigma_{\text{elektr.}} \cdot T$$

$\kappa_{\text{Gitter}}$  besonders groß in perfekten Kristallen niedriger Ordnungszahl

→ Diamant ist bester Wärmeleiter

### 3 Halbleiter

#### 3.1 Kennlinie eines p-n-Übergangs

$$J = J_S \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

$J_S$ : Sättigungssperrstrom

$$J_S = \sqrt{\frac{ekT\mu_p}{\tau_p} p_0^{(n)}} + \sqrt{\frac{ekT\mu_n}{\tau_n} n_0^{(p)}}$$

$p_0^{(n)}$ : Gleichgewichtskonzentration der Löcher im n-Gebiet

$\mu_p$ : Beweglichkeit der Löcher

$\tau_p$ : Lebensdauer bezüglich Rekombination

#### 3.2 Lebensdauer der Löcher in n-Si

Rekombinationsrate  $\frac{d(p-p_0)}{dt} = -\frac{p-p_0}{\tau_p}$

$\tau_p$ : Lebensdauer bezüglich Rekombination

$p_0$ : Gleichgewichtsdichte der Löcher ( $p_0 = n_0 = n_i^2$ )

Lebensdauer  $\tau_p = \frac{1}{\sigma_p \cdot v_{th} \cdot N_t}$

$\sigma_p$ : Einfangquerschnitt

$v_{th}$ : thermische Geschwindigkeit  $v_{th} = \sqrt{3kT/m}$

$N_t$ : Dichte der Rekombinationszentren in der Mitte der Bandlücke

### 4 Halbleiter-Technik

#### Einkristallherstellung

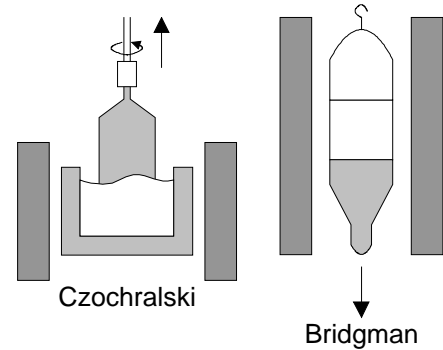
- Bridgman-Methode
- Czochralski-Methode

Wichtig: genaue Einstellung des Temperaturgradienten  
Züchtung erfolgt unter Schutzgas

#### Zonenziehen

Energie wird durch Hf übertragen. Keine Berührung mit Gefäßwänden.

Reinigungseffekt, da viele Verunreinigungen in der Schmelzzone bleiben.



#### Silizium-Planar-Technologie

- Oxidieren des n-Siliziums (ca. 1000°C) und Auftragen von Photolack
- Belichtung und Herauslösen belichteter Stellen
- Wegätzen des SiO<sub>2</sub> an den belichteten Stellen durch Flußsäure
- Beseitigung des Photolacks
- Eindiffundieren von Bor bei hoher Temperatur (verbleibendes SiO<sub>2</sub> wirkt als Diffusionssperre)

### 5 Dielektrische Erscheinungen

Elektrisches Dipolmoment  $\underline{p} = Q \cdot d$  [Cm=Asm]

Polarisation  $\underline{P} = n \cdot \underline{p}$  [As/m<sup>2</sup>] n: Dipoldichte

Polarisierbarkeit  $\underline{p} = \alpha \cdot \underline{E}$   $\alpha$ : Polarisierbarkeit

$\underline{P} = \chi \cdot E$   $\chi$ : Suszeptibilität

In Gasen gilt  $\chi = n \cdot \alpha$

#### 5.1 Kondensator

Kondensator im Vakuum  
 $\text{div} D = \text{div} \epsilon_0 E = \rho$

$\Rightarrow \oint D_1 - D_2 = \sigma = \frac{Q}{A}$   $\sigma$ : Flächenladung

$\Rightarrow \frac{Q}{A} = \epsilon_0 E = \epsilon_0 \frac{U}{d}$

Kondensator mit Dielektrikum

$P \cdot A \cdot d = \sigma_{\text{eff}} \cdot A \cdot d$

$\sigma_{\text{eff}} = P = \chi E$

$= \chi_r \epsilon_0 E$

$$\Rightarrow Q = \underbrace{\epsilon_0 \frac{A}{d}}_C U$$

$$Q_{\text{tot}} = \frac{\epsilon_0 A}{d} U + P \cdot A$$

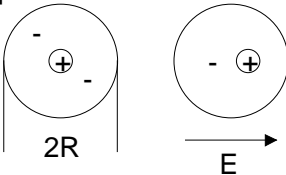
$$= A(\epsilon_0 + \chi)E$$

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

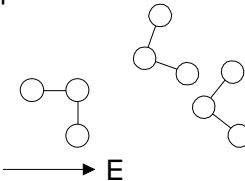
$$\epsilon_r = 1 + \frac{\chi}{\epsilon_0} = 1 + \chi_r$$

## 5.2 Gase

Elektronenpolarisierbarkeit

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 R^3$$


Orientierungspolarisierbarkeit

$$\alpha_{\text{or}} \cong \frac{p^2}{3kT}$$


## 5.3 Festkörper

Wechselwirkung der Dipole

$$E_{\text{Dipol}} = \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r^3} (3\cos^2 \theta - 1)$$

Wirksames Feld am Ort des Dipols

$$E_i = E_a + \underbrace{\sum_i \frac{p(3\cos\theta_i - 1)}{4\pi\epsilon_0 r^3}}_{\text{Summe aller anderen Dipole}}$$

Ergebnisse der Rechnung für kubische Kristalle (Lorentz):

$$E_i = E_a + \frac{P}{3\epsilon_0}$$

Andererseits:  $P = n \cdot \alpha \cdot E_i$

$$\Rightarrow P = \frac{n\alpha E_a}{1 - \frac{n\alpha}{3\epsilon_0}} = \chi \cdot E_a$$

oder

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n\alpha}{3\epsilon_0} \quad (\text{Clausius-Mosotti})$$

## 5.4 Relaxation der Orientierungspolarisation

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} (P_0 - P(t)) \quad P = (1 - e^{-t/\tau}) P_0$$

E periodisch:  $E = E_0 e^{j\omega t}$

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r^{(0)} - 1) E_0 e^{j\omega t}$$

$$P = B \cdot e^{j\omega t}$$

$$\Rightarrow j\omega B e^{j\omega t} = \frac{1}{\tau} [\epsilon_0 (\epsilon_r^{(0)} - 1) E_0 - B] e^{j\omega t}$$

$$\Rightarrow B = E_0 \frac{\epsilon_0 (\epsilon_r^{(0)} - 1)}{1 + j\omega\tau}$$

$$\Rightarrow \chi_r = \epsilon_r - 1 = \frac{\epsilon_r^{(0)} - 1}{1 + j\omega\tau}$$

## 6 Isolierstoffe

Klassifikation

### Gasförmige Isolierstoffe

(Druckluft, SF<sub>6</sub>)

### Flüssige Isolierstoffe

(Isolieröle)

### Feste Isolierstoffe

- *anorganische*

natürliche (Glimmer, Asbest)

synthetische (Porzellan, Glas, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Silikone)

- *organische*

natürliche (Holz, Papier, Harze, Kautschuk)

synthetische (Kunststoffe, Lacke)

## 7 Dielektrika und Ferroelektrika

### 7.1 Bauformen von Kondensatoren

- Wickelkondensator

Nachteile: - hohe Induktivität

- hoher Widerstand

- kein sauberer Aufbau (unterschiedliche Abstände)

- Vielschicht-Kondensator

- Masse-Kondensator

### 7.2 Kondensator-Werkstoffe

#### 7.2.1 Folien- und Papier-Kondensatoren

MP	Papier	Metallisierter Papierkondensator	
MKS	Polystyrol	Metallisierter Kunststoffkondensator aus Poly-Styrol	
MKP	Polypropylen	Metallisierter Kunststoffkondensator aus Poly-Propylen	
MKC	Polycarbonat	Metallisierter Kunststoffkondensator aus Poly-Carbonat	*
MKT	Polyethylenterephthalat	Metallisierter Kunststoffkondensator aus Polyethylen-Terephthalat	*

\*) Selbstheilfähig

#### 7.2.2 Keramik-Kondensatoren

Typ I: (NDK)		Typ II: (HDK)		Typ III: (Sperrschicht)
Mischungen aus		Ferroelektrika		Dotierte Ferroelektrika
	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MgTiO <sub>3</sub>	BaTiO <sub>3</sub> (Sb)
ε	120	6	14	ε=1000 - 10000
tanδ	5 · 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	2 · 10 <sup>-4</sup>	

#### 7.2.3 Elektrolyt-Kondensatoren

	Al-Elko			Ta-Elko	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	naß	Zitronensäure	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	naß	Schwefelsäure
ε=7	trocken	MnO <sub>2</sub> Braunstein	ε=27	trocken	MnO <sub>2</sub> Braunstein

### 7.3 Piezoelektrischer Effekt

Direkter Effekt: Mechanischer Druck → elektrische Polarisation

Indirekter Effekt: Elektrische Spannung → mechanische Deformation

Werkstoffe	Deutung
1) Quarz-Einkristalle SiO <sub>2</sub>	Unsymmetrie des Gitteraufbaus unsymmetrische Struktur durch Polung in einem starken elektrischen Feld (Ausrichtung der ferroelektrischen Polarisation). Scheinladungen werden durch Kompensationsladungen auf der Metallisierung neutralisiert. Äußerer Druck verändert die Polarisation und stört Ladungskompensation.
2) Ferroelektrische Keramik	
BaTiO <sub>3</sub> T <sub>C</sub> = 110°C Pb(ZrTi)O <sub>3</sub> (PZT)      T <sub>C</sub> = 320°C	

## 8 Magnetische Erscheinungen

MAXWELLSche Gleichungen

Standard-Darstellung	Alternativ-Darstellung
$\text{rot}H = j + \dot{D}$	$\frac{1}{\mu_0} \text{rot}B = j_{\text{tot}} + \epsilon_0 \dot{E}$
$\text{rot}E = -\dot{B}$	$\text{rot}E = -\dot{B}$
$\text{div}D = \rho$	$\epsilon_0 \text{div}E = \rho_{\text{tot}}$
$\text{div}B = 0$	$\text{div}B = 0$
$D = \epsilon_0 E + P(E)$	$j_{\text{tot}} = j + j_{\text{mag}} + j_{\text{pol}}$
$B = \mu_0 H + J(H)$	$j_{\text{mag}} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}J$
$j = \sigma \cdot E$	$g_{\text{mag}} = \frac{1}{\mu_0} (J \cdot n) \quad (*)$
	$j_{\text{pol}} = \dot{P}$
	$\rho_{\text{tot}} = \rho + \rho_{\text{pol}}$
	$\rho_{\text{pol}} = \text{div}P$
	$\sigma_{\text{pol}} = P \cdot n \quad (*)$

(\*) an der Oberfläche

<b>Diamagnetismus</b>	<b>Paramagnetismus</b>	<b>Ferro- und Ferrimagnetismus</b>
<i>Induktion</i> molekularer, also verlustloser Ströme in den Atomen und Molekülen. Ein Diamagnet verdrängt die magnetischen Feldlinien und wird selbst aus dem Feld verdrängt.	Auch ohne Feld sind <i>magnetische Momente</i> vorhanden. Diese richten sich in einem Magnetfeld aus.	Die in den Elektronenschalen der Atome gebundenen <i>magnetische Momente richten sich durch eine quantenmechanische Wechselwirkung gegenseitig aus</i> . Der Begriff magnetischer Werkstoff bezieht sich auf ferro- und ferrimagnetische Werkstoffe.

### Magnetische Momente

Die mit nicht gepaarten Elektronenspins verbundenen Momente sind in der Praxis am wichtigsten. Jeder Spin trägt ein BOHR'sches Magneton  $\mu_B$  zum Gesamtmoment bei.

### Magnetostriktion

Verzerrung des Gitters abhängig von der Magnetisierungsrichtung. Die Magnetostriktion ist ein relativ schwacher Effekt (relative Dehnung  $10^{-5}$ ), der aber technisch recht bedeutend ist (→ Trafobrummen).

### Magnetischer Kreis

$$\begin{array}{llll}
 \text{magnetische Spannung} & H_i I_i & \text{rotH} = 0 & \oint H ds = 0 & H_M \cdot I_M + H_L \cdot I_L = 0 \\
 \text{magnetischer Strom} & B_i F_i & \text{divB} = 0 & \int B df = 0 & B_M \cdot F_M = B_L \cdot F_L \\
 & & & & B_L = \mu_0 H_L \\
 & & & & B_M = \mu_0 H_M + J_M \\
 & & & & H_M = - \frac{1}{1 + \frac{I_M F_L}{I_L F_M}} \cdot \frac{J_M}{\mu_0}
 \end{array}$$

### Deutung der Hysteresephänomene

Die Blochwand ist ein schmaler, aber endlich dicker, kontinuierlicher Übergangsbereich zwischen zwei homogenen, bis zur Sättigung magnetisierten Domänen. Die Sättigung ist von der Temperaturabhängig. Ein unmagnetischer Zustand ist durch sich nach außen kompensierende Bereiche gekennzeichnet. Ein angelegtes Feld verschiebt die Grenzen zwischen den Domänen, ändert aber nicht die Magnetisierung innerhalb der Domänen, die stets der Sättigung entspricht.

## 9 Weichmagnetische Werkstoffe

### weichmagnetische Werkstoffe

Fe	Fe 3% Si	Ni <sub>81</sub> Fe <sub>14</sub> Mo <sub>5</sub>	Mn <sub>0,5</sub> Zn <sub>0,5</sub> O · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> B <sub>20</sub>
		μ-Metall	Mn-Zn-Ferrit	Manganferrit	(amorph)

### (Massive) weichmagnetische Werkstoffe

- Anwendung z.B. Joch von Elektromagneten
- Wichtig: mit einem Feld maximal erreichbare Magnetisierung

### Siliziumeisen-Bleche (Fe mit ca. 3 Gew.% Si)

Siliziumeisen-Bleche werden mit ausgeprägter Textur in Transformatoren verwendet. Die Textur wird durch Walz- und Rekristallisationsprozesse erzielt. Durch Vorzugsorientierung der Kristallkörner erreicht man leichte Magnetisierbarkeit des Blechs parallel zur Walzrichtung.

### magnetische Verluste

Magnetische Verluste werden in Watt/kg gemessen, wobei Induktionsamplitude und Frequenz anzugeben sind. Von geringerer Bedeutung ist die Permeabilität, die z.B. mit Hilfe der bei 8 A/cm erreichbaren Induktion gemessen wird.

### hochpermeable Nichteisenlegierungen

in den kfz-Legierungsbereichen von 30% bis 100% Ni. Die Legierung um 80% Ni zeichnet sich durch das Zusammentreffen des Nulldurchgangs der Kristallanisotropie und der Magnetostriktion aus. Dies trifft jedoch nur für ungeordnete, schnell abgeschreckte Materialien zu. Langsam abgekühlte geordnete Legierungen besitzen den Nulldurchgang der Kristallanisotropie woanders.

### Permalloyeffekt - Permalloylegierungen

Schnell abgeschreckte Legierungen mit ca. 80% Ni zeigen eine höhere Permeabilität, da durch die Vermeidung des Ordnungsprozesses der Nulldurchgang der Kristallanisotropie erhalten bleibt, sodaß die Magnetisierung leicht zu drehen ist. Zu erwarten wäre, daß eine langsame Abkühlung vorteilhaft ist, um innere Spannungen zu vermeiden.

Durch den Zusatz weiterer Legierungspartner (z.B. Mo oder Cu) kann man die Bedingung minimaler Kristallenergie und Magnetostriktion optimal eingestellt werden, wobei die Einstellung geordneter Kristallstrukturen durch die Legierungspartner verzögert und technisch besser kontrollierbar wird.

→ Permeabilität maximal 10<sup>5</sup>

### **Weichmagnetische Ferrite**

Anordnung im Spinellgitter

Magnetisch sind die Ionen in den Oktaederlücken antiparallel zu denjenigen in den Tetraederlücken orientiert. Da doppelt so viele Oktaederplätze besetzt sind ergibt sich resultierende Magnetisierung.

→ Ferrite sind ferrimagnetisch

Ähnlich wie bei Permalloylegierungen läßt sich hier im Dreistoffsystem Manganferrit-Zinkferrit-Magnetit ein gemeinsamer Nulldurchgang der Kristallenergie und der Megnetostraktion antreffen. Da jedoch noch Poren enthalten sind (keramischer Werkstoff) können Maximalwerte der Permalloylegierungen nicht erreicht werden.

→ Permeabilität maximal  $10^4$

### **Kubisch weichmagnetische Ferrite**

Formel:  $MO \cdot Fe_2O_3$  M: zweiwertiges Metall (Fe, Mn, Ni, ...)

- Sättigungsmagnetisierung deutlich geringer als bei Metallegierungen
- Curiepunkt relativ niedrig
- elektrisch isolierend ( $10^4 \Omega\text{cm}$ )

### **Selten-Erd-Granate**

komplizierte magnetische Oxide, die außer Eisen Seltene Erden enthalten

- relative kleine Sättigungspolarisation
- Anwendung im Mikrowellen- und optischen Bereich und bei Magnetblasenspeichern
- komplizierte Mischkristalle können entsprechend den Anforderungen konstruiert werden

## **10 Dauermagnete**

### **Kenngößen**

- maximale Feldstärke in einem gegebenen Volumen mit Hilfe eines magnetischen Kreises
- Maß ist maximal erreichbare Rechtecksfläche in der Hysteresekurve (→ möglichst rechteckige Hystereseschleife) **statisches Energieprodukt  $(BH)_{\text{max}}$**
- maximal zu verrichtende Arbeit beim Schließen eines Magnetkreises
- Maß ist Dreiecksfläche **dynamisches Energieprodukt  $(BH)_p$**

### **Dauermagnete**

- hohe Koerzitivfeldstärke  $H_c$  (1000-2000 A/cm)
- hohe Remanenz  $J_R$  (1 T)
- geringe Temperaturabhängigkeit ( $<-0,2 \text{ %/K}$ )

### **Alnico-Legierungen**

magnetischen Fäden aus Eisenkobalt eingebettet in eine unmagnetische Matrix aus Nickelaluminium

→ keine Blochwände

→ gute hartmagnetische Eigenschaften

### **Hexagonale Ferrite**

- preisgünstige Dauermagnete
- $BaO \cdot 6(Fe_2O_3)$
- ferrimagnetische Ordnung (ähnlich Spinell)
- keramischer Herstellungsprozeß ausgehend von Pulver

### **Selten-Erd-Magnete**

- stärkste im Handel erhältliche Dauermagnete
- geordnete Kristallstruktur
- hohe einachsige Kristallanisotropien
- Herstellung durch Sinterung

## 11 Magnetspeicher

### magnetische Aufzeichnung

- Kopf aus weichmagnetischem Kern
- Informationsträger: mit magnetischen Partikeln gefüllte Kunststoffschicht
- magnetomotorisches Speichern

### Speicherschichten

- Nadeln aus  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
- $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  mit Co-Überzug
- Chromdioxid
- NEU: Reineisen-Partikel und Co(Ni)-P-Schichten

### Ringkernspeicher

- besteht aus winzigen Ferritringen
- sehr schnell und zuverlässig

### Magnetblasen- / Bubble-Speicher

Bewegung spezieller zylinderförmiger Domänen durch aufgedampfte Magnetschichten (Permalloy) gesteuert.