

ET+V

Elektrotechnik Vertiefung

HSLU T&A

Strömungsfeld

13.7.2013

Lernziele

- Sie kennen den Begriff el. Strömungsfeld und seine Kenngrössen

Leitungsmechanismen – 1

- Um den **Atomkern** aus **Protonen** und **Neutronen** kreisen die **Elektronen** auf bestimmten Bahnen, die diskreten Energiestufen entsprechen.
- Die Elektronen der unvollständig besetzten äussersten Schale sind die **Valenzelektronen**.
- Die **Rumpfelektronen** sind diejenigen der darunter liegenden Schalen.
- Durch die Wechselwirkung mehrerer Atome entstehen **Energiebänder**, welche durch **verbotene Zonen** getrennt werden. Das höchste Band ist das **Valenzband**. Darüber befindet sich das **Leitungsband**, in dem sich die Elektronen frei bewegen können.
- Voraussetzung el. Leitung: freie Ladungsträger
 - Elektronen: $-e = -1,602 \cdot 10^{-19} C$ (Coulomb, $1C = 1As$)
 - Protonen: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$
 - Ionen:
 - entfernen von Elektronen aus der Atomhülle \Rightarrow positives Ion
 - hinzufügen von Elektronen in die Atomhülle \Rightarrow negatives Ion

Leitungsmechanismen – 2: Isolatoren

- Beispiele:
 - Vakuum, Luft
 - Gase (keine freien Elektronen): SF₆
 - Flüssigkeiten: Transformatorenöl
 - Festkörper: Glas, Keramik, Quarz, Glimmer, Bernstein, Papier, Kunststoffe
- Zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband befindet sich eine Energielücke (verbotene Zone): $\Delta W > 5eV$
 $1eV = 1.602 \cdot 10^{-19} J$
- Nur wenige Valenzelektronen besitzen genug Energie um ins Leitungsband zu gelangen.

Leitungsmechanismen – 3: Halbleiter

- Beispiele:
 - Elemente: Kohlenstoff (C), Selen (Se), Germanium (Ge), Silizium (Si)
 - Verbindungen: Galliumarsenid (GaAs), Indiumantimonid (InSb), Zinkoxid (ZnO)
- Die Energielücke ist kleiner als bei den Isolatoren $\Delta W < 5eV$
- Ladungsträger können Elektronen (n-Leiter) oder Defektelektronen (p-Leiter, Löcher) sein.
- Anwendungen: Diode, Transistor, Thyristor, Photozellen

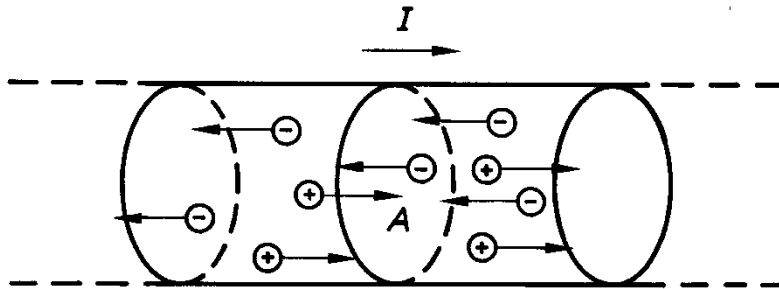
Leitungsmechanismen – 4: Leiter

- Beispiele:
 - Metalle (freie Elektronen):
Silber (Ag), Kupfer (Cu), Gold (Au),
Aluminium (Al)
 - Gase (bei hohen Temperaturen ionisiert):
Plasma
 - Flüssigkeiten (positive und negative Ionen):
verdünnte Säuren und Basen,
wässrige Salzlösungen und Salzschnmelzen
- Bei Metallen überschneiden sich das Valenz- und das Leitungsband, so dass Elektronen ungehindert vom Valenz- ins Leitungsband gelangen können, d.h. sie können sich frei zwischen den ortsfesten Atomrümpfen des Kristallgitters bewegen.

Strom und Stromdichte - 1

Strom I:

$$I = \frac{\text{Ladungsmenge durch Kontroll-Querschnitt } A}{\text{Zeiteinheit}} \quad [I] = \frac{A \cdot s}{s} = A$$



Stromdichte J im homogenen Feld: $J = \frac{I}{A} \left[\frac{A}{mm^2} \right]$

Stromdichte im inhomogenen Feld: $|\vec{J}| = \frac{dI}{dA} \left[\frac{A}{mm^2} \right]$

Stromdichte hängt von
Ort und Richtung ab
(→ vektorielle Grösse)

Strom und Stromdichte - 2

Stromdichte im inhomogenen Feld: $|\vec{J}| = \frac{dI}{dA} \left[\frac{A}{mm^2} \right]$ Stromdichte hängt von Ort und Richtung ab (→ vektorielle Grösse)

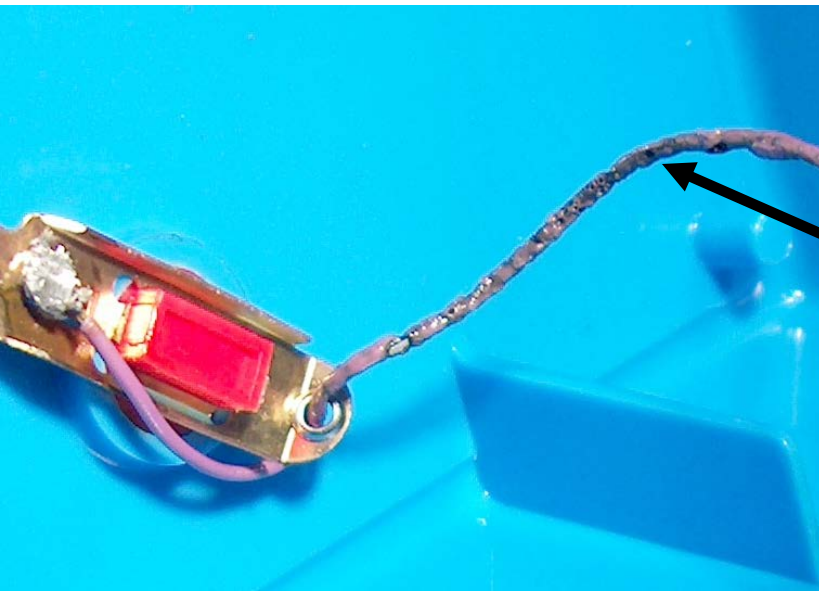
Über Fläche A,
nach dem Strom aufgelöst:

$$I = \int_A \vec{J} d\vec{A} [A]$$

Strom durch Fläche A

Vergl. PV-Generator Einstrahlung, Ausrichtung PV-Modul

Typische Stromdichten: **Niederspannungsverteilung 2..10 A/mm²**
Begrenzt durch Maximaltemperatur der Isolation



Auswirkung auf PVC-Isolation
Bei Stromdichte $J = 120 A/mm^2$

Elektrisches Strömungsfeld

- Das Feld erstreckt sich zwischen 2 Elektroden, die an einer Spannungsquelle angeschlossen sind.
- **Ursache** der Ladungsbewegung: el. Spannung zwischen den Elektroden, im Feld drinnen ist es die elektrische Feldstärke
- Feld beschreibt Ladungsbewegung in elektrischem Leiter. Ladungsträger folgen der elektrischen Feldstärke \vec{E} , d.h. den Feldlinien
- **Wirkung** ist die Ladungsbewegung, gemessen mit der Stromdichte \vec{j}

Ohmsches Gesetz im elektrischen Strömungsfeld

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J}$$

Das ohmsche Gesetz gilt auch „lokal“ :

Elektrische Feldstärke

$$[\vec{E}] = \frac{V}{m}$$

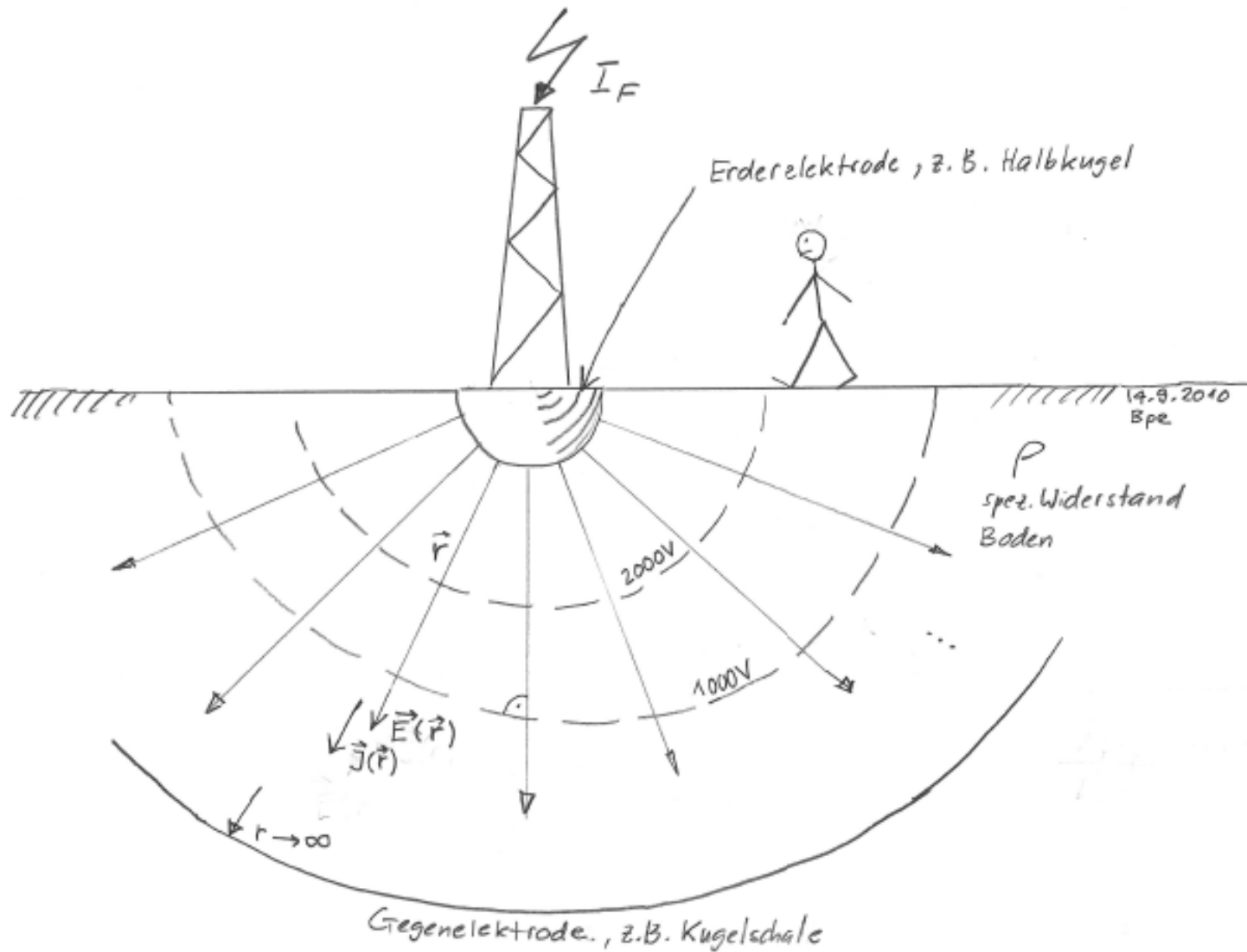
Stromdichte

$$[\vec{J}] = \frac{A}{mm^2}$$

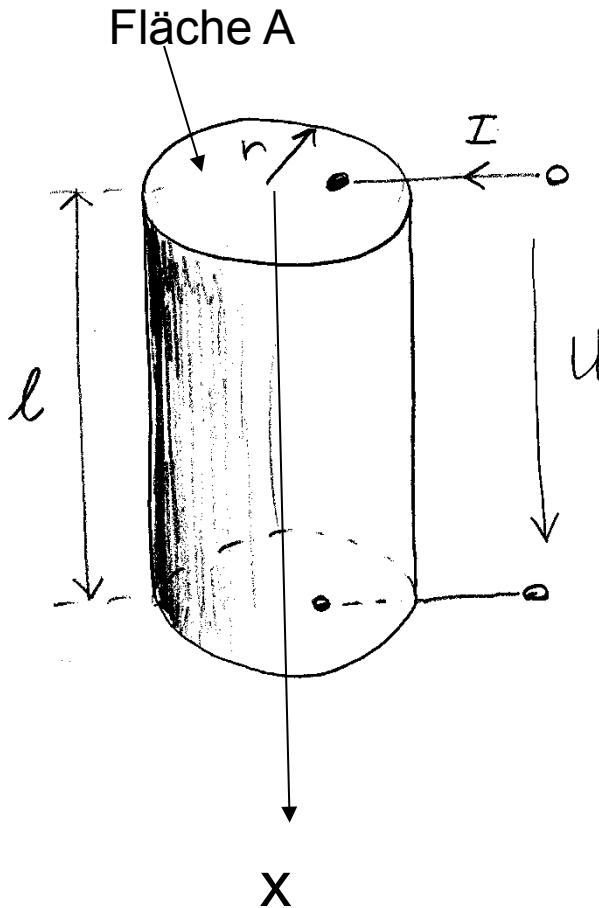
Spezifischer Widerstand

$$[\rho] = \frac{\Omega mm^2}{m} = 10^{-6} \Omega m$$

Strömungsfeld Beispiel-1



Strömungsfeld Beispiel-2



Konstanter spezifischer Widerstand ρ
Ideale „Elektrodenflächen“: Parallele kreisrunde Flächen, homogenes Feld

$$I = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = J \int_A dA = J \cdot \pi \cdot r^2$$

$$\Rightarrow J = \frac{I}{\pi \cdot r^2} \Rightarrow E(x, r) = E = \rho \cdot J = \frac{I \cdot \rho}{\pi \cdot r^2}$$

$$U = \int_0^l E \cdot dx = \frac{I \cdot \rho}{\pi \cdot r^2} \int_0^l dx = \frac{I \cdot \rho \cdot l}{\pi \cdot r^2}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\frac{I \cdot \rho \cdot l}{\pi \cdot r^2}}{I} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot r^2} = \frac{\rho \cdot l}{A} [\Omega]$$

Strömungsgeschwindigkeit v der Ladungsträger - 1

Abschätzung in geradem Kupferleiter mit Querschnitt A
(Homogenes Strömungsfeld)

Beispiel: $I = 4\text{A}$, Kupferleiter 1.5mm^2

n = Anzahl freie Elektronen pro Volumeneinheit = $8.47 \cdot 10^{19} \text{ mm}^{-3}$

Anzahl Ladungen in Leiterlänge dl :

$$dQ = n \cdot e \cdot A \cdot dl, \quad [A] = \text{mm}^2, [dl] = \text{mm}$$

Strömungsgeschwindigkeit v , bei einem Strom I

$$I = \frac{dQ}{dt} = n \cdot e \cdot A \cdot \frac{dl}{dt} = n \cdot e \cdot A \cdot v, \quad [A] = \text{mm}^2, [dl] = \text{mm}, [v] = \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow v = \frac{I}{n \cdot e \cdot A} = 0.2 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Aber: Signalgeschwindigkeit ist ca.
300'000 km/s !

Skript G2,S3

Repetition

- Wie lautet das ohmsche Gesetz mit den lokalen Grössen (Vektoren)?
- Was versteht man unter Stromdichte? Welche Einheit hat sie? Grössenordnung für Niederspannungsverteilung?