

# Grundlagen der Elektrotechnik I

Vorlesung an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe

Kurs: Tel17B

5. Januar 2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Erwartungen</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Relevante Physikalische Größen und Einheiten</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Potenzial und Spannung</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Mechanismen der Stromleitung</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>21</b>

# 1 Erwartungen

---

## Was wir hier machen

- Legen der Grundlagen der Elektrotechnik
    - Kleinhirn des Elektroingenieurs
    - Braucht jeder Elektroingenieur, auch später, auch nach Karriere, vorausgesetzt er wird kein Softwerker
    - Kann auch jeder Ingenieur
  - Einige grundlegende Konzepte
  - Verständnis zu den Themen
    - Größen und Einheiten
    - Strom, Spannung, Widerstand, etwas Materie und deren Verhalten bei Strom
    - Gleichstromkreise und Berechnungsverfahren dafür
    - Strom und Stromdichte
    - Ladung und Ladungsspeicherung (Kondensator)
    - Viel Übung
- 

## Was Sie erwarten können

- Vermittlung brauchbaren Wissens
  - Eingehen auf Fragen und Bedürfnisse
  - Orientierung an Ihnen
  - Die Vorlesung und den Stoff als solchen
  - Übungen
- 
- Unterlagen (pdf, Informationen) auf WEB-DAV-Laufwerk, alternativ (auf Ihren Wunsch hin) auch auf Moodle
-

## Was ich von Ihnen erwarte

- Sie sind motiviert
  - Sie versuchen ernsthaft dem Stoff zu folgen, wenn nötig auch durch Nacharbeit
  - Sie bringen sich aktiv ein (die Vorlesung ist für Sie), ich erwarte also (konstruktiv, wenn möglich) Kritik und Fragen
- 

## Was ich von Ihnen erwarte

Drei Tipps für diese Vorlesung:

- Üben
  - Üben
  - Üben
- 

## Inhalt erstes Semester

1. Einführungen
2. Einheiten und physikalische Größen
3. Gleichstromkreise
  - (a) Elektrischer Strom
  - (b) Stromdichte und Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen
  - (c) Elektrische Spannung
  - (d) Ohmsches Gesetz, Widerstand, Temperaturabhängigkeit
  - (e) Arbeit und Leistung in Gleichstromkreisen
  - (f) Kirchhoff'sche Gesetze
  - (g) Spannungs- und Stromquellen
4. Berechnung von Gleichstromkreisen
  - (a) Reihenschaltung und Parallelschaltung
  - (b) Belasteter Spannungs- und Stromteiler
  - (c) Stern-Dreiecksumwandlung, Wheatstone'sche Brückenschaltung
  - (d) Sätze zur Netzwerkberechnung: Vereinfachung, Überlagerungssatz, Direkte Anwendung der Kirchhoff'schen Sätze
  - (e) Maschenstromverfahren

- (f) Knotenpotenzialverfahren
- (g) Leistungsanpassung
- (h) Ersatzquellen/ Zweipoltheorie

5. Nichtlineare Elemente, Bestimmung des Arbeitspunktes

6. Induktivität und Kapazität

- (a) Anfangs- und Endbedingungen
- (b) Differentialgleichungen und Schaltvorgänge

## 2 Relevante Physikalische Größen und Einheiten

---

### Einführung in das Thema

- Sinn: Beschreibung von physikalischen Phänomenen
  - Ziel: Diskussion und Berechnung physikalischer Zusammenhänge
  - System: Globale, einfache Kommunikation, einfache, konsistenten Berechnungen
- 

### Das SI-System

- SI steht für **Système international d'unités**
  - Sieben Baseinheiten und daraus abgeleitete Einheiten
  - Kohärentes System: Dimension abgeleiteter Einheiten ist mit dem Vorfaktor eins zu beschreiben
- 

### SI-Basiseinheiten

Größe	Symbol	Dimensions-symbol	Einheit	Einheitenzeichen
Länge	$\ell$	L	Meter	m
Masse	$m$	M	Kilogramm	kg
Zeit	$t$	T	Sekunde	s
Stromstärke	$I, i$	I	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	$T$	$\Theta$	Kelvin	K
Stoffmenge	$n$	N	Mol	mol
Lichtstärke	$I_v$	J	Kandela	cd

- Abgeleitete Einheiten:  $[Q] = 10^\nu \cdot m^\alpha \cdot kg^\beta \cdot s^\gamma \cdot A^\delta \cdot K^\epsilon \cdot mol^\zeta \cdot cd^\eta$  Wobei nun  $[Q]$  die Einheit einer Größe  $Q$  sein soll und  $\{\}$  wäre der Wert.
  - Oder die Dimension einer Größe  $Q$  ist  $[Q] = L^\alpha \cdot M^\beta \cdot T^\gamma \cdot I^\delta \cdot \epsilon \cdot n^\zeta \cdot J^\eta$
- 

### Was fällt auf?

- Im Alltag gebräuchliche Einheiten sind recht gut vertreten
- Energie und Leistung haben keine Vertretung
- Einzige Elektrische Einheit ist das Ampere

---

### Ableitung von Einheiten

Größe	Einheit	Name
Fläche	$m^2$	Quadratmeter
Volumen	$m^3$	Kubikmeter
Geschwindigkeit	$m/s$	Meter pro Sekunde
Beschleunigung	$m/s^2$	Meter pro Sekunde zum Quadrat
Kraft	$kg\ m/s^2 = N$	Newton
Energie=Kraft*Länge	$J = N\ m = \frac{kg\ m^2}{s^2}$	Joule
Leistung=Energie/Zeit	$W = \frac{J}{s} = \frac{kg\ m^2}{s^3}$	Watt
Ladung=Stromstärke*Zeit	$C = A\ s$	Coulomb

---

### Herleitungen zu den abgeleiteten Einheiten

- **Ladung** ist die Stromstärke, die eine Zeit (in etwas hinein) fließt, also  $q = I \cdot t$
- **Kraft** wird aufgewandt wenn eine Masse beschleunigt wird, also  $F = m \cdot a$  (Grundgleichung der Mechanik)
- **Energie** ist eine Mass dafür, über welche Strecke (Weg) eine Kraft wirkt, also  $W = F \cdot \ell$ .
- **Leistung** ist ein Mass dafür, welche Arbeit (Energie) in einer Zeiteinheit umgesetzt wird, also  $P = W/t$

Immer noch sehr wenige elektrische Einheiten.

---

### Seit 2019: SI-System Definition aus Naturkonstanten

Das Neue SI-System (tritt am 20.5.2019 offiziell in Kraft), definiert nicht mehr die Einheit, z.B. das Ampere, sondern eine Naturkonstante (hier: Elementarladung), aus der man dann das Ampere ableiten kann. Warum? Weil die Naturkonstante sich ja eigentlich nicht ändern kann. In der Vergangenheit war es anders herum: Die Einheit (Ampere) war definiert, immer wenn sich die Messtechnik verbesserte, gab es daher einen neuen Wert für die Elementarladung. Das kann ja nicht sein.

---

### Sekunde und Hyperfeinstrukturübergang

- Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im  $^{133}\text{Cs}$ -Atom  $\Delta\nu = 9\,192\,631\,770\ \text{s}^{-1}$
  - Sekunde (s)  $1\ \text{s} = 9\,192\,631\,770/\Delta\nu$
-

## Meter und Lichtgeschwindigkeit

- Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$
  - Meter (m)  $1\text{ m} = (c/299\,792\,458)\text{ s} = 30,663\,318 \dots c/\Delta\nu$
- 

## Planck-Konstante und Kilogramm

- Planck-Konstante  $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\text{ Js}$  ( $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ )
  - Kilogramm (kg)  $1\text{ kg} = (h/6,626\,070,15 \cdot 10^{-34})\text{ m}^{-2}\text{s} = 1,475\,521 \dots \cdot 10^{40} h\Delta\nu/c^2$
- 

## Elementarladung und Ampere

- Elementarladung  $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\text{ C}$  ( $\text{C} = \text{As}$ )
  - Ampere (A)  $1\text{ A} = e/(1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19})\text{ s}^{-1} = 6,789\,686 \dots \cdot 10^8 \Delta\nu e$
- 

## Menschen hinter der Technik

André-Marie Ampère

- 1775 - 1836
- „Zwei stromdurchflossene Leiter ziehen sich an, wenn sie die gleiche Stromrichtung haben und stoßen sich ab, wenn die Ströme entgegengesetzt sind.“
- Fließende Elektrizität erzeugt Magnetische Felder, Ampèresches Gesetz ist Teil der Maxwell'schen Gleichungen:

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{s} = I$$

Das Integral der magnetischen Feldstärke auf einem geschlossenen Weg ist gleich dem Strom, den dieser Weg umschließt.

---

## Boltzmann-Konstante und Kelvin

- Boltzmann-Konstante  $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ JK}^{-1}$  ( $\text{JK}^{-1} = \text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
  - Kelvin (K)  $1\text{ K} = (1,380\,649 \cdot 10^{-23}/k)\text{ kgm}^2\text{s}^{-2} = 2,266\,665 \dots \Delta\nu h/k$
-

## Avogadro-Konstante und Mol

- Avogadro-Konstante  $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
  - Mol (mol)  $1 \text{ mol} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} / N_A$
- 

## Strahlungsäquivalent und Candela

- Das Photometrische Strahlungsäquivalent  $K_{cd}$  einer monochromatischen Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  ist genau gleich 683 Lumen durch Watt.
  - Candela (cd)  $1 \text{ cd} = (K_{cd}/683) \text{ kgm}^2\text{s}^{-3}\text{sr}^{-1} = 2,614\,830 \dots \cdot 10^{10} (\Delta\nu) 2hK_{cd}$
- 

## Alternativen zum SI-System?

Gibt es nicht wirklich, früher (bis 40er, 50er Jahre) war unter Physikern das Gaußsche System sehr verbreitet. Schönheit: Ausgangspunkt ist die Kraft zwischen Ladungen:

- SI-System:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$
- Gauß-System:  $F^* = \frac{q_1 q_2}{r^2}$

Hier ist  $r$  der Abstand zwischen den Ladungen  $q_1, q_2$ .

---

## Wenn die Werte zu groß werden?

Vorsatz	Zeichen	Wert	Beispiel
Yotta	Y	$10^{24}$	
Zetta	Z	$10^{21}$	
Exa	E	$10^{18}$	
Peta	P	$10^{15}$	Energieverbrauch
Tera	T	$10^{12}$	Byte, Energieverbrauch, Hertz
Giga	G	$10^9$	Byte, Bit, Hertz
Mega	M	$10^6$	Hertz, Bit
Kilo	k	$10^3$	Gramm, Meter
Hekto	h	$10^2$	Liter (Bier), Ar
Deka	da	$10^1$	

---

**Wenn die Werte zu klein werden?**

Vorsatz	Zeichen	Wert	Beispiel
Yokto	y	$10^{-24}$	
Zepto	z	$10^{-21}$	
Atto	a	$10^{-18}$	
Femto	f	$10^{-15}$	Meter oder Farad
Pico	p	$10^{-12}$	Sekunde, Farad
Nano	n	$10^{-9}$	Meter, Henry, Farad
Mikro	$\mu$	$10^{-6}$	Sekunde, Watt
Milli	m	$10^{-3}$	Meter, Gramm
Centi	c	$10^{-2}$	Meter, Liter (Schnaps)
Dezi	d	$10^{-1}$	Liter, Meter

### 3 Potenzial und Spannung

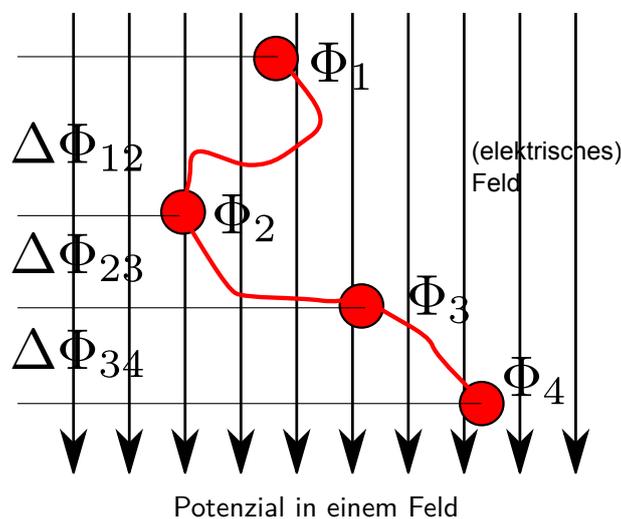
---

#### Wie groß ist die potenzielle Energie einer Ladung?

Bild und bildliche Darstellung der potenziellen Energie

- (hinkender) Vergleich: Potenzielle Energie einer Masse ist  $W_{pot} = mgh$ ,  $m$  ist die Masse,  $g = 9,80665 \frac{m}{s^2}$  die Erdbeschleunigung, bzw. des Gravitationsfeldes und  $h$  die (Fall)höhe, also die Strecke, die die Masse in dem Feld zurücklegen kann, bis das (willkürlich) festzulegenden Nullniveau erreicht wird.
  - Interessant ist immer nur der Übergang von einem Energieniveau (Höhe) zu einem anderen (einer anderen Höhe), also  $\Delta W = W_{pot1} - W_{pot2} = mg(h_1 - h_2)$
  - Und wie ist das nun im Fall der Ladung...
  - Wir verkürzen hier erheblich!! Das meiste wird erst sinnvoll, wenn Feldbegriffe eingeführt werden, also im dritten/ vierten Semester.
  - Wir setzen hier nun, dass  $W_{pot} = q\Phi$  ist, wobei  $\Phi$  das Potenzial bezeichnet. Die Differenz ist nun  $\Delta W = W_{pot1} - W_{pot2} = q(\Phi_1 - \Phi_2)$
- 

#### Bild zum Potenzial



#### Einheit des Potentials?

- Über die Energie :

$$1 \text{ J} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ A s}[\Phi]$$
$$\Leftrightarrow [\Phi] = \frac{\text{kg m}^2}{\text{A s}^3} = \text{V} = \frac{\text{W}}{\text{A}}$$

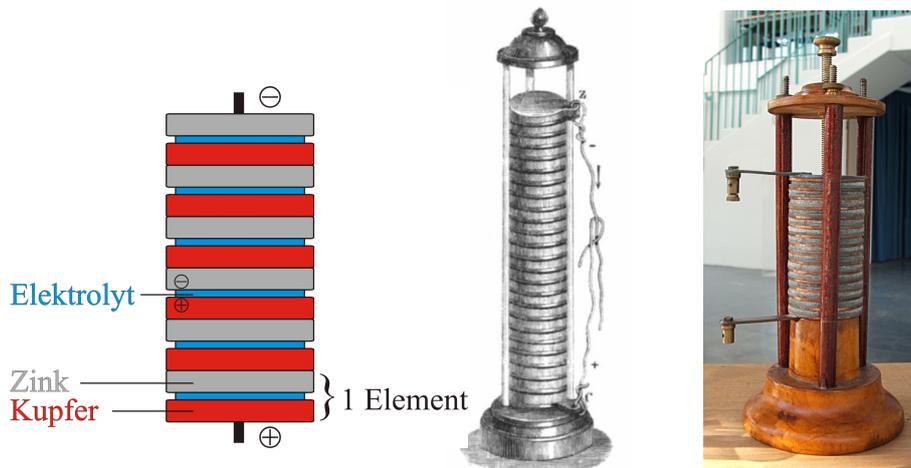
- Benannt nach Alessandro Volta, dem Erfinder der Batterie...
- 

## Menschen hinter der Technik

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Graf von Volta

- 1745 - 1827
  - "Der mit den Froschschenkeln", Volta erkannte, dass sich Muskeln zusammenziehen, wenn man einen Spannung anlegt. Mehr noch, daher erkannte er, dass es so etwas wie Kontaktelektrizität gibt, also es eine Spannung zwischen den Grenzflächen verschiedener Metalle gibt.
  - "Voltasche Säule", also ein Stapel von Kupfer-Elektrolyt-Zink (Volta-Elementen). Die erste Batterie, Reihenschaltung von Spannungsquellen.
- 

## Die erste Batterie



Volta'sche Säule, Alle Bilder nach Wikipedia

## 4 Mechanismen der Stromleitung

---

### Einführung in das Thema

- Sinn: Verstehen, warum es überhaupt Stromleitung gibt und was die Voraussetzung dafür ist
  - Ziel: Grundsätzliche Voraussetzungen der Materie für Stromleitung nennen können, verschiedenen Verhaltensweisen bei Änderung der Randbedingungen (Temperatur) kennen.
  - Rechnungen: Einfache Rechnungen durchführen können
- 

### Grundsätzliches zu Ladungsträgern

- Elektronen (negativ geladen)
- Protonen (Teil des Atomkerns)
- Ionen, also die Kerne des Atoms, bzw. Atome, denen ein oder mehrere Elektronen fehlen

**Bild eines Atoms mit den verschiedenen Bahnen, Bohr'sche Atommodell, Ringe mit Anzahl von 2-8-18... Elektronen auf den Bahnen**

---

### Verschiedene Arten von Atomen

- Atome (Elemente) unterscheiden sich in Anzahl von Protonen (Neutronen → Isotopen) und gemäß der Anzahl der Protonen auch der Anzahl der Elektronen
- Elektronen "kreisen" in festgelegten Bahnen um den Atomkern. Jede Bahn hat eine bestimmte, maximale Anzahl von Plätzen für Elektronen zur Verfügung.
- Für Bindungen/ chemische Reaktion und den Kristallaufbau sind nur die Elektronen auf der äußersten Bahn **Valenzelektronen** verantwortlich.

- Je nach Konfiguration der Valenzelektronen können sich für Atome im Kristallverbund unterschiedliche elektrische Eigenschaften ergeben (⇒ Bänder, Valenzband, freie Elektronen ⇒ Leistungsband)
- Anzahl der freien Ladungsträger (Leistungsband) bestimmt maßgeblich die Leitungseigenschaften des Materials:
  - Viele freie Ladungsträger auch bei niedrigen Temperaturen ⇒ (metallische) Leiter
  - Freie Ladungsträger (auch bei Raumtemperatur) vorhanden, bei steigender Temperatur mehr werdend, je nach Verunreinigung ebenso mehr werdend ⇒ Halbleiter. An der Leistung können auch “Fehlstellen” (Löcher) Beteiligt sein. Verhalten sich wie positive Teilchen, sind aber eigentlich nur fehlende Elektronen (im Valenzband)
  - Bei Raumtemperatur quasi keine freien Ladungsträger vorhanden ⇒ Nichtleiter.

### Ein Gefühl für die Werte

Hier sollten noch ein paar Werte über Ladungsträgerdichten eingefügt werden.

Element	Atome ( $1/m^3 \times 10^{28}$ )	Elektronend ( $1/m^3$ )
Fe	8,5	$17 \cdot 10^{28}$
Ag	5,7	$5,86 \cdot 10^{28}$
Au	5,9	$5,9 \cdot 10^{28}$
Al	6,0	$18,1 \cdot 10^{28}$
Cu	8,5	$8,47 \cdot 10^{28}$
Ge	4,4	$2,4 \cdot 10^{28}$
Si	5,0	$1,45 \cdot 10^{28}$
Ga As	4,4	$1,79 \cdot 10^{28}$

Nach [2, 11] und Wikipedia (<http://de.wikipedia.org/wiki/>), speziell Beweglichkeit\_(Physik), Kupfer, Eisen, Aluminium, Gold [28.12.2010].

### Die eine Zahl alleine macht es nicht

- Neben der Anzahl der Ladungsträger spielt deren Geschwindigkeit, vielmehr “Beweglichkeit” eine große Rolle.
- Kurz: Je mehr Ladungsträger, die auch noch schnell sind, desto besser leitet der Stoff:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

wobei nun  $\sigma$  die Leitfähigkeit in  $\frac{S}{m} = \frac{1}{\Omega m}$ ,  $\rho$  der spezifische Widerstand in  $\Omega m$ ,  $e = 1,602 \text{ As}$ ,  $n, p$  die Anzahlen der Ladungsträger in  $1/m^3$ , und  $\mu_n, \mu_p$  die Beweglichkeiten in  $\frac{m}{s} \cdot \frac{m}{V}$  **Kontrollieren Sie doch mal die Dimensionen und Einheiten**

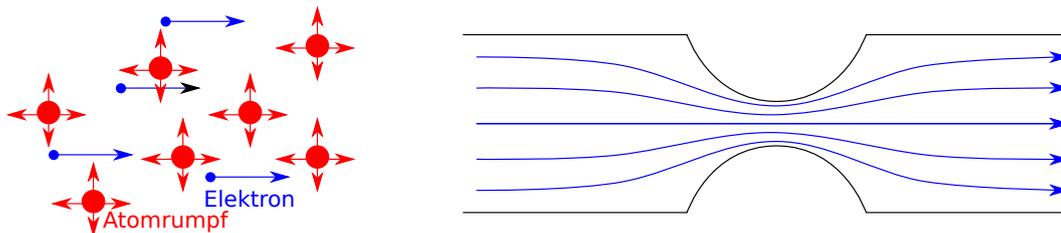
## Strömungsfeld



Stau wegen Unfall... Auch den Elektronen geht es so..

---

## Strömungsfeld II



Beschleunigung und Abbremsung der Elektronen bei thermisch bewegten Atomrümpfen. Verdichtung von „Stromlinien“ an Engstellen.

---

## Der elektrische Strom

- Ladung, die in einer Zeit  $t$  durch einen Leiter fließt:  $Q = I \cdot t$ , Einheit ist natürlich  $[Q] = \text{As} = \text{C}$ , Coulomb. [Benannt nach Charles Augustin de Coulomb, 14.6.1736 - 23.8.1806 in Paris, vor allem sein Kraftgesetz (Coulomb-Kraft) ist bekannt]
- Und da Ladung nur in Vielfachen der Elektronenladung fließen kann ist das dann auch  $Q = n \times V \times e$ ,  $e = 1,602 \text{ As}$ . Wobei wieder  $n$  die Dichte (also Anzahl pro Volumen) und  $V$  das Volumen ist.
- Elektronen sind negativ geladen, werden also vom PLUS-Pol angezogen.
- Die **technische Stromrichtung** ist allerdings genau anders herum definiert: Also wie würden positive Ladungsträger fließen? und das wäre vom PLUS zum MINUS-Pol

## Gefühl für Strom

Einige Stromstärken

Beispiel	Strom
Strom im Blitz	10...100kA
Strom in einer Sammelschiene (Kraftwerk)	0,1...100 kA
Autoanlasser	20...100 A
Straßenbahn	100 A
Kochplatte	5...10 A
Steckdosensicherung	16...32 A
Glühlampe (100W)	0,1 A
Strom in empfindlichen Meßgeräten	$\mu$ ...mA
Stromempfindlichkeit des Menschen	einige mA
kleinste messbare Ströme	f...nA

## Stromdichte

- Strom, der durch eine bestimmte Fläche fließt wird Stromdichte genannt:  $J = I/A$ ,  $[J] = \frac{A}{m^2}$
- Das ist nun das was heizt...
- Beispiel 10 A in 2,5mm<sup>2</sup> sind dann  $J = 6,4 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$

Größenvorstellung Stromstärke

Vorkommen	Stärke in A/mm <sup>2</sup>
Elektrische Freileitung	1
Elektrogeräte/ Motoren	3...8
Halbleiterbauelemente	10...100
Elektronenröhren	0,1

Strom und Stromdichte in Leitern nach VDE0100

Leiterquerschnitt	Max. zul. Strom.	Stromdichte
0,75 mm <sup>2</sup>	13 A	17,3 A/mm <sup>2</sup>
1,0 mm <sup>2</sup>	16 A	16,0 A/mm <sup>2</sup>
1,5 mm <sup>2</sup>	20 A	13,33 A/mm <sup>2</sup>
2,5 mm <sup>2</sup>	27 A	10,8 A/mm <sup>2</sup>
4,0 mm <sup>2</sup>	36 A	9,0 A/mm <sup>2</sup>

## Fließgeschwindigkeit der Elektronen

Und wie schnell sind die Dinger nun?

- Protonen: Fließen nicht!
- Elektronen: Die fließen und zwar ergibt sich aus dem obigen  $Q = It$ ,  $\Leftrightarrow I = Q/t = nVe/t$ , Geometrisch ist  $V = A \times s$ ,  $A$  die Querschnittsfläche und  $s$  die Strecke in dem Leiter, die wir betrachten.

- Dann ist nun  $I = nAes/t$  und  $s/t = v$  ist die Geschwindigkeit der Elektronen. Und dann natürlich  $v = s/t = \frac{I}{neA}$
- Beispiel aus Hagmann S.11 ( $n_{Cu} = 8.47 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{mm}^3}$ )
- Jedenfalls saulahn....

Zeichnung zu fließenden Elektronen

---

### Nochmal zu Potenzial und Spannung

- Bislang nur die Potenzialdifferenz (in einem angenommenen Feld) erläutert.
- Gleiches gilt für Elektronen im Leiter, nur dass die eben nicht so einfach irgendwie laufen können, sondern im Leiter bleiben müssen.
- Spannungsquelle
- Energie der Ladung am PLUS-Pol der Batterie:  $W_+ = U \cdot Q$  oder auch  $W_+ = \Phi_+ \cdot Q$  und  $W_- = 0$ , mehr oder weniger willkürlich gewählt.
- Dann ist  $U$  mit  $[U] = \frac{\text{kg m}^2}{\text{A s}^3} = \text{V}$  eben die Spannung am PLUS-Pol
- Richtungspfeil wird angegeben, so wie POSITIVE Ladungsträger fließen würden....

Zeichnung der Spannungsquelle, Messung der Spannung, Voltmeter

---

## Ohmsches Gesetz

- Ohm erkannte, dass - jedenfalls in den bei ihm betrachteten Metallen und bei einigermaßen konstanten Umgebungsbedingungen (Temperatur)  $U \propto I$  gilt, also ist  $\frac{U}{I} = \text{const}$
- Diese Konstante ist Material und Geometrie-Spezifisch und wird **Widerstand** genannt.
- Damit ist  $U = R \times I$
- Die Einheit ist also  $[R] = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$  Ohm genannt
- Ein Leiter besitzt einen Widerstand von  $1\Omega$ , wenn bei einer Potenzial(Spannungs)differenz zwischen den Leiterenden von  $1\text{V}$  ein Strom von  $1\text{A}$  fließt.
- Entsprechend ist die Leitfähigkeit  $G = \frac{1}{R}$  und das ohmsche Gesetz ändert seine Form in  $I = G \times U$ .  
Einheit von  $[G] = \frac{\text{A}}{\text{V}} = \frac{1}{\Omega} = \text{S} = \text{Mho}$  Siemens

Bild von Widerstandskennlinien (Strom über Spannung auftragen), ggf auch schon die Kennlinie/  
Arbeitskennlinie eines Widerstandes mit Spannungsquelle...., also Strom über der Spannung

---

## Menschen hinter der Technik

Georg Simon Ohm

- 1789 - 1854
- (frustrierter) Gymnasiallehrer, später Professor für Physik
- Aufsätze von ihm <http://www.ohm-hochschule.de/index.php?id=1731>
- Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contactelectricität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplicators. (1826)
- "Leiter von einerlei Art und verschiedenem Durchmesser haben denselben Leitungswerth, wenn sich Ihre Länge wie ihre Querschnitte verhalten."
- und später (1827) "Die galvanische Kette mathematisch Bearbeitet" legt den Grundstein zur Bearbeitung elektrischer Ketten (Kreise) mit den Mitteln der Mathematik.

---

## Menschen hinter der Technik

Ernst Werner (von) Siemens

- 1816 - 1892
  - Erfinder und Industrieller
  - Vor allem bekannt für die Siemens AG und das "Dynamoelektrische Prinzip"
- 

## Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit

- Schon Ohm stellte fest, dass der Widerstand (eines Metalls) abhängt von
    - Querschnitt(sfläche)
    - Länge
    - Material
  - Nehmen wir Ohms Satz von oben, dann folgt  $R = \text{const}$ , wenn (a) gleiches Material und (b)  $\frac{l}{A} = \text{const}$ .
  - Oder zusammen in einer Formel  $R = \rho \frac{l}{A}$
  - $\rho$  ist eine Materialkonstante mit der Einheit  $[\rho] = \Omega \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \text{m}$  und wird **spezifischer Widerstand** genannt.
  - Wie auch beim "großen"(Ohmschen) Widerstand gibt es hier den Kehrwert  $\kappa = \frac{1}{\rho}$ , die (spezifische) Leitfähigkeit in  $[\kappa] = \frac{1}{\Omega \text{m}} = \frac{\text{S}}{\text{m}}$
  - Von beiden werden gerne auch Einheiten mit 10er-Potenzen verwendet.
- 

## Temperaturabhängigkeit

Zwei Bilder: Einmal eine gerade Widerstandskennlinie  $R$  über  $\theta$  und dann noch eine (sehr) nichtlineare über einen weiteren Bereich.

- Entwicklung in eine Taylorreihe, also nach

$$f(x) \approx f(x_0) + \left. \frac{d}{dx} f(x) \right|_{x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2}{dx^2} f(x) \right|_{x_0} (x - x_0)^2$$

- Und wenn man das nun auch die Temperatur, z.B. um 20°C und den Widerstand ümdichtet", dann kommt das dabei raus

$$\begin{aligned} R(\theta) &\approx R(\theta_0) + \left. \frac{d}{d\theta} f(\theta) \right|_{\theta_0} (\theta - \theta_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2}{d\theta^2} f(\theta) \right|_{\theta_0} (\theta - \theta_0)^2 \\ &= R(\theta_0) \left( 1 + \alpha_{\theta_0} (\theta - \theta_0) + \beta_{\theta_0} (\theta - \theta_0)^2 \right) \end{aligned}$$

- Und damit kann man nun etwas rumrechnen... erstmal kann man für gewisse Bereiche den quadratischen Anteil vernachlässigen, dann bleibt eben noch (z.B. um 20°C herum), siehe nächste Seite.

### Linearer Teil der Temperaturabhängigkeit

- Schon Ohm erkannte "dass der 8. und 11. Januar (1826?) sehr kalte Tage waren". Seine Messungen der Leitfähigkeit liefert nämlich an diesen Tagen sehr abweichende Ergebnisse.
- Daher muss man (eigentlich) immer zum Leitwert auch die Temperatur angeben, an der er bestimmt wurde.
- Oft nimmt man hier natürlich die Raumtemperatur (20°C).
- Die Veränderung des (spezifischen) Widerstandes mit der Temperatur, um eine fest gewählte Temperatur gibt man bspw. mit einem Faktor an.  $\alpha_{20}, [\alpha_{20}] = \frac{1}{K}$ . Am Index steht dann die Bezugstemperatur.
- Der Widerstand berechnet sich dann zu  $R = R_0 \times (1 + \alpha_{\theta_0} (\theta - \theta_0))$ ,  $\alpha$  kann größer oder kleiner Null sein, je nach Material.
- Bei Metallen (normalerweise)  $>0$ , bei Halbleitern  $<0$ .
- Der Gültigkeitsbereich von  $\alpha$  kann größer oder kleiner sein, ebenfalls materialabhängig, siehe Maßgabe von  $\beta$ .

### Temperaturabhängigkeit

Ausgewählte Werte für (spezifischen) Widerstand und Temperaturabhängigkeit

Material	$\rho$ $\mu\Omega$	$\alpha_{20^\circ C}$ $10^{-3}/K$	$\beta$ 1
Silber	0,016	3,8	0
Kupfer	0,01786	3,93	0
Gold	0,023	4,0	0
Aluminium	0,02857	3,77	1
Eisen	0,1 - 0,15	4,5-6	9
Platin	0,11-0,14	2-3	0
Konstantan	0,5	-0,0035	-

---

## Bestimmung der Temperatur

- Kann man damit die Temperatur messen? ja!

$$\begin{aligned}R_1 &= R_0 \times (1 + \alpha(\theta_1 - \theta_0)), \text{ und} \\R_2 &= R_0 \times (1 + \alpha(\theta_2 - \theta_0)), \\ \rightarrow \frac{R_2}{R_1} &= \frac{1 + \alpha(\theta_2 - \theta_0)}{1 + \alpha(\theta_1 - \theta_0)} \\ \Leftrightarrow \theta_2 &= \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{R_2}{R_1} (1 + \alpha(\theta_1 - \theta_0)) - 1 \right] + \theta_0\end{aligned}$$

- und damit kann man nun wild rumrechnen

## 5 Literatur

---

### Allgemeine Literatur

Allgemeine Literatur zum Thema Elektroingenieur:

- [10] Eine - teilweise flache - kurzweilige Darstellung, warum das Ingenieursein toll ist, und warum Ingenieure toll sind
  - [8] Humoristische und zeitweise (selbst)kritische Auseinandersetzung mit dem Fach Elektrotechnik und den Menschen darin. Der Fokus liegt auf dem US-Amerikanischen Raum und dem Wandel, der insbesondere in den 90er Jahren Einzug gehalten hat. Immer noch aktuell.
  - [1] So sind sie, die Elektrotechniker, das machen sie, so leiden sie im Büroalltag und interagieren sie mit anderen Gruppe, wie z.B. Bossen, BWLern, Marketing, etc.
- 

### Literatur zum Fach

- [6] sehr eng an diesem Buch werde ich die Vorlesung gestalten. Lohnt sich absolut, ist aus meiner Sicht eine sehr gute und ballastfreie Einführung in die Elektrotechnik.
  - [5] Übungsaufgaben, die Sie über die Vorlesung und eine Aufgaben hinaus rechnen können.
  - [7] Wer tiefer graben mag findet hier Stoff und viel mehr theoretischen Hintergrund, als ich ihn liefern werde.
- 

### Literatur zum Fach

- [12] Eine andere, auch gute, Einführung in die Elektrotechnik. Als Alternative mit reichlich mehr Tiefgang zu sehen, aber redundant zur ersten Empfehlung.
- [3] Eine andere, auch gute, Einführung in die Elektrotechnik. Als Alternative mit etwas mehr Tiefgang zu sehen, aber redundant zur ersten Empfehlung.
- [4] Aufgabensammlung dazu
- [9] Ein Klassiker, gut, umfassend, verständlich

---

## Literatur

## Literatur

- [1] Scott Adams. *Dilbert Comic Strip*. 2012. URL: <http://dilbert.com/> (besucht am 28. 12. 2012).
- [2] Neil W. Ashcroft und N. David Mermin. *Solid State Physics*. Saunders College Publishing, 1975.
- [3] Horst Clausert u. a. *Grundgebiete der Elektrotechnik*. 11. Aufl. 2 Bde. Oldenbourg Verlag, 2011.
- [4] Oliver Haase und Christian Spieker. *Aufgaben zur Elektrotechnik*. Bd. 1. Oldenbourg Verlag, 2012.
- [5] Gert Hagemann. *Aufgabensammlung zu den Grundlagen der Elektrotechnik*. 14. Aufl. Aula Verlag GmbH, 2010.
- [6] Gert Hagemann. *Grundlagen der Elektrotechnik*. 15. Aufl. Aula Verlag GmbH, 2011.
- [7] Karl Küpfmüller, Wolfgang Mathis und Albrecht Reibiger. *Theoretische Elektrotechnik*. 18. Aufl. Springer Verlag, 2008.
- [8] Robert W. Lucky. *Lucky Strikes...Again: (Feats and Foibles of Engineers)*. IEEE Press, 1993.
- [9] Eugen Philippow. *Grundlagen der Elektrotechnik*. 8. Aufl. VEB Verlag Technik Berlin, 1988.
- [10] Ekkehard D. Schulz. *55 Gründe, Ingenieur zu werden: Über den schönsten Beruf der Welt*. Goldmann Verlag, 2012.
- [11] S. M Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons, 1981.
- [12] Rolf Unbehauen. *Grundlagen der Elektrotechnik*. 5. Aufl. 2 Bde. Springer Verlag, 1999.