

Grundlagen der Elektrotechnik

Handreichung zur Präsentation

Michael Dienert

25. April 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Strom und Spannung	1
1.1	Elektrischer Strom in metalischen Leitern	1
1.2	Elektrischer Strom	1
1.3	Elektrische Spannung	2
1.4	Definitionen	3
1.5	Elektrischer Stromkreis	3
2	Der elektrische Widerstand	4
2.1	Ohmsches Gesetz	5
3	Knoten- und Maschenregel	6
3.1	Maschenregel	6
3.1.1	Beispiel Maschenregel	6
3.2	Knotenregel	7
3.2.1	Beispiel Knotenregel	7
4	Reihen- und Parallelschaltung	7
4.1	Reihenschaltung	7
4.2	Parallelschaltung	8
5	Elektrisches Potential	8
6	Schutz vor den Gefahren des elektrischen Stroms	9
6.1	Physiologische Wirkung des elektrischen Stroms	9
6.2	Beispielrechnungen	9
6.3	Hautwiderstand	10
6.4	Schutzmassnahmen	10
6.5	article	11

1 Strom und Spannung

1.1 Elektrischer Strom in metallischen Leitern

- Metalische Leiter: überwiegend Kupferdrähte, Kupferlitze (viele dünne, zusammengefasste Drähte), Leiterbahnen aus Kupfer.
- Bei Energieübertragung: sehr dicke Drähte aus Aluminium.
- *Fahrdraht* bei Eisenbahnen: Kupferdraht, ca. 12.4mm Durchmesser.
- Warum Metalle: bei Metallen sind Atome regelmässig in einem Raumgitter angeordnet.
- Jedes Atom ist *kugelförmig*
- Die Kugeln ordnen sich in einer *dichtest möglichen* Packung an:



Abbildung 1: Trüffel-Metallgitter

Ein Bild, das nicht exakt die dichteste Kugelpackung zeigt:

- Die äusseren *Elektronen* der Metallatome sind nur schwach an ihr Atom gebunden
- Sie können sich frei zwischen den Atomen in der Kugelpackung bewegen
- Man kann sich diese freien Elektronen wie ein Gas → sog. *Elektronengas*, vorstellen

1.2 Elektrischer Strom

- Bei Metallen besteht der elektrische Strom aus einer *Wanderung* der freien Elektronen in eine Richtung.
- D.h. man kann sich den elektrischen Strom wie eine Strömung des Elektronengases vorstellen

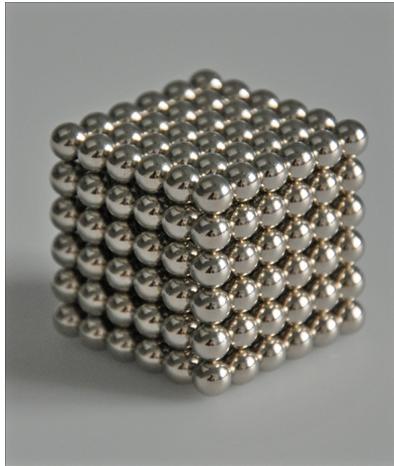


Abbildung 2: Modell eines Metallgitters mit Neodym-Magnetkugeln

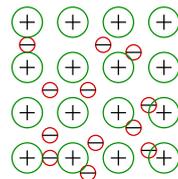


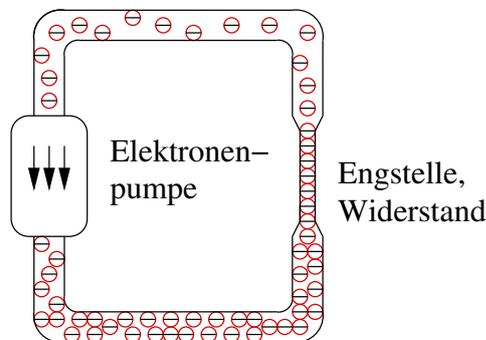
Abbildung 3: Metallgitter mit freien Elektronen

- Die Stromstärke hängt davon ab, wie stark diese *Elektronenströmung* ist.
- Möchte man ständig einen Strom fließen lassen, muss man einen *Stromkreis* aufbauen:

1.3 Elektrische Spannung

- Die elektrische Spannung kann man sich als *Druckdifferenz* des Elektronengases vorstellen.
- In unserem Modell erzeugt die Pumpe einen Elektronendruck gegen den Widerstand der Verengung.
- Vor der Verengung ist der Druck grösser als nach der Verengung
- Wichtig: im Stromkreis gehen keine Elektronen verloren, sie werden nur im Kreis herumgepumpt.
- An Stellen mit hohem Druck ist die Fließgeschwindigkeit kleiner als an Stellen mit niedrigem Druck.

niedriger Druck, hohe Fließgeschwindigkeit



hoher Druck, langsame Fließgeschwindigkeit

Abbildung 4: Modell eines Stromkreises

1.4 Definitionen

- Wenn pro Sekunde $6.24 \cdot 10^{18}$ Elektronen durch den Leiterquerschnitt fließen, beträgt die *Stromstärke* 1 A (Ampère).
- Für den elektrischen Strom wird das *Formelzeichen* I verwendet. Die *Einheit* des elektrischen Stroms ist das Ampère.
- An der Verengung, am Widerstand wird z.B. Wärme erzeugt. Die *Leistung* die dabei umgesetzt wird hängt von der elektrischen Spannung und der Stromstärke ab.
- Formelzeichen der Leistung: P (Power), Einheit der Leistung 1W (Watt)
- Die elektrische Spannung (Druckdifferenz) hat das Formelzeichen U und die Einheit 1V (Volt).

- | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Wenn an einem beliebigen Widerstand (Engstelle) der von einem Strom der Stärke 1A durchflossen wird, eine Leistung von 1W umgesetzt wird, beträgt die elektrische Spannung (Druckdifferenz) 1V. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

1.5 Elektrischer Stromkreis

- Das Modellbild des Stromkreises mit Pumpe, Elektronengas und Engstelle wird ab jetzt wie in Abb. 6 dargestellt.
- Die Pumpe wird zu *Spannungsquelle*
- Die Engstelle, an der Wärmeenergie umgesetzt wird, wird durch das Schaltzeichen eines *elektrischen Widerstands* dargestellt.
- Die Rohrleitungen für das Elektronengas werden durch Linien dargestellt.

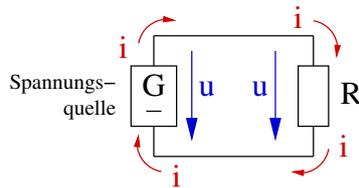


Abbildung 5: Elektrischer Stromkreis

- entlang der Linien findet keinerlei “Druckverlust” statt, d.h. die Spannung in der Nähe der Quelle ist genauso hoch wie in der Nähe des Widerstands.
- Die Spannungen werden durch blaue Pfeile repräsentiert. Die Pfeilrichtung zeigt dabei von Bereichen mit mehr positiven Ladungen zu Bereichen mit mehr negativen Ladungen.
- Die Spannungsquelle “pumpt” die Elektronen an ihrem unteren Ende heraus. D.h. unten sind mehr negative Ladungen als oben. \Rightarrow die Spannungspfeile zeigen von oben nach unten.

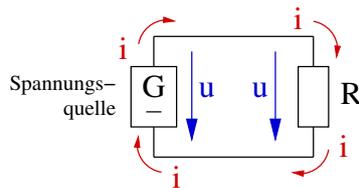


Abbildung 6: Elektrischer Stromkreis

- Der elektrische Strom wird durch rote Pfeile symbolisiert.
- Die Pfeilrichtung zeigt *gegen* die Wanderungsrichtung der Elektronen!

2 Der elektrische Widerstand

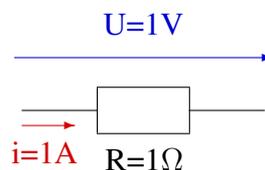


Abbildung 7: Strom und Spannung am 1Ω Widerstand

- Der elektrische Widerstand hat das Formelzeichen **R** und die Einheit 1Ω (Ω steht für *Ohm*).

- Durch einen Widerstand von 1Ω fließt ein Strom von 1 A , wenn die am Widerstand anliegende Spannung 1 V beträgt.

2.1 Ohmsches Gesetz

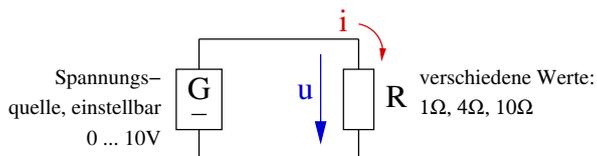


Abbildung 8: Elektrischer Stromkreis mit variabler Spannung und verschiedenen Widerständen

- Der elektrische Strom wird in einer Grafik über der Spannung aufgetragen.
- Bei sog. *ohmschen Widerständen* ergibt sich dabei eine Gerade als Schaubild:

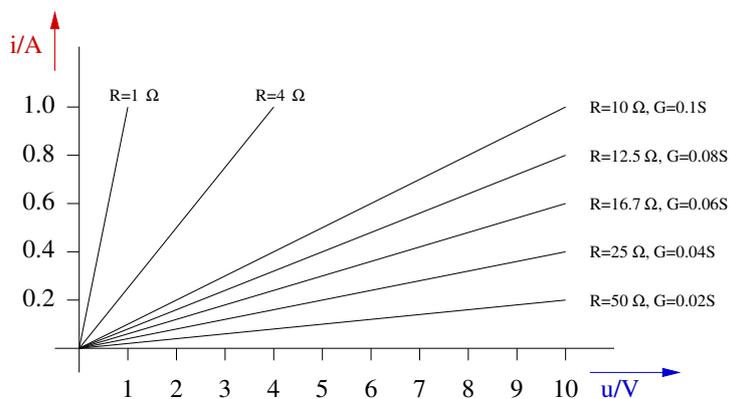


Abbildung 9: Widerstandsgeraden

- Die Stromstärke i ist *proportional* zur Spannung u : $i \sim u$

- Die Stromstärke ist *proportional* zum *Kehrwert* des Widerstands: $i \sim \frac{1}{R}$

- Den Kehrwert des Widerstands nennt man *Leitwert* **G**: $G = \frac{1}{R}$
- Die Stromstärke ist also proportional zum Leitwert **G**.
- Das ohmsche Gesetz gilt nur für *ohmsche Widerstände*.

- Ein Beispiel für Bauteile bei dem es nicht gilt, sind Dioden.
- Bei einer Diode ändert sich der Strom *exponentiell* mit der Spannung:

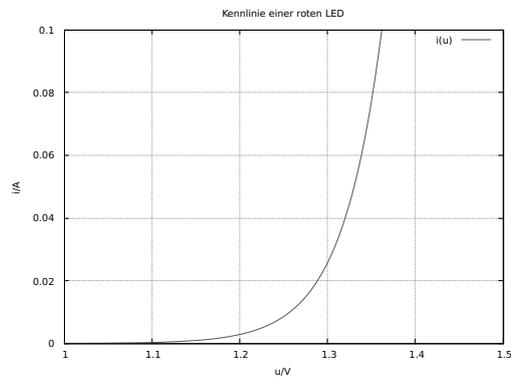


Abbildung 10: Kennlinie einer roten LED

3 Knoten- und Maschenregel

3.1 Maschenregel

- Eine Masche ist ein geschlossener Weg innerhalb einer beliebigen elektronischen Schaltung.
- Definition der Maschenregel:

Geht man in einer Masche einmal komplett im Kreis herum, ist die Summe aller Spannungen **Null!**

- Beim Aufsummieren der Spannungen muss man die Pfeilrichtungen beachten: Spannungspfeile, die gegen die Laufrichtung zeigen werden negativ gezählt.
- Die Maschenregel ist ein Spezialfall des *Energieerhaltungssatzes*.

3.1.1 Beispiel Maschenregel

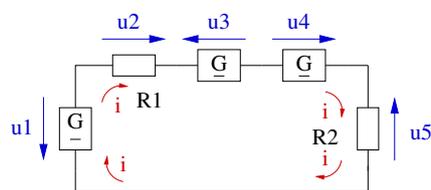


Abbildung 11: Beispiel zur Maschenregel

$$-u_1 + u_2 - u_3 + u_4 - u_5 = 0$$

3.2 Knotenregel

- Ein Knoten ist ein Punkt, an dem mehrere elektrische Leiter miteinander verbunden sind.
- Definition der Knotenregel:

Die Summe aller Ströme, die auf einen Knoten zufließen ist genauso gross wie die Summe aller Ströme, die von diesem Knoten wegfließen!

- Die Knotenregel ist ein Spezialfall des *Ladungserhaltungssatzes*.
- Im Knoten geht keine Ladung verloren: soviel Elektronen wie hineinfließen, fließen auch wieder hinaus.

3.2.1 Beispiel Knotenregel

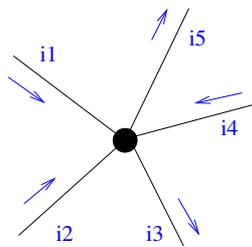


Abbildung 12: Beispiel zur Maschenregel

$$i_1 + i_2 + i_4 = i_3 + i_5$$

4 Reihen- und Parallelschaltung

4.1 Reihenschaltung

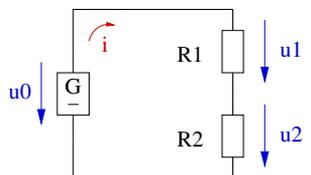


Abbildung 13: Reihenschaltung

$$\begin{aligned}
 \text{Maschenregel : } u_0 &= u_1 + u_2 \\
 u_1 &= R_1 \cdot i \\
 u_2 &= R_2 \cdot i \\
 u_0 &= R_1 \cdot i + R_2 \cdot i \\
 \frac{u_0}{i} &= R_1 + R_2 = R_{ges}
 \end{aligned}$$

4.2 Parallelschaltung

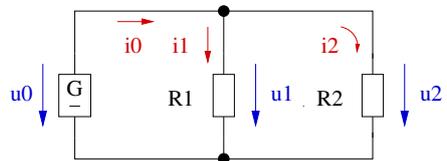


Abbildung 14: Parallelschaltung

$$\begin{aligned}
 \text{Maschenregel : } u_0 &= u_1 = u_2 \\
 \text{Knotenregel : } i_0 &= i_1 + i_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_1 &= \frac{u_0}{R_1} \quad i_2 = \frac{u_0}{R_2} \\
 i_0 &= \frac{u_0}{R_1} + \frac{u_0}{R_2} \\
 \frac{i_0}{u_0} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{ges}}
 \end{aligned}$$

5 Elektrisches Potential

Das *Potential* eines beliebigen Punkts in einem Stromkreis ist die Spannung zwischen diesem Punkt und einem beliebigen *Referenzpunkt*. Der Referenzpunkt bekommt dabei das Potential 0V zugeordnet

- In der Geodäsie (Vermessungskunde) entspricht die absolute Höhe eines Punkts auf der Erde dem Potential in einem Stromkreis. Das Nullpotential der Elektrotechnik entspricht dabei dem mittleren Meeresspiegel.

Die Spannung zwischen zwei Punkten in einem Stromkreis ist der *Potentialunterschied* dieser Punkte. Der Potentialunterschied ist die Differenz der Potentiale

- Die Spannung entspricht damit dem Höhenunterschied in der Vermessungskunde.
- Im Gegensatz zur Vermessungskunde, wo es nur einen Referenzpunkt (das Normal-Null) gibt, kann man in der Elektrotechnik den Referenzpunkt bei jedem Stromkreis selbst festlegen.

6 Schutz vor den Gefahren des elektrischen Stroms

6.1 Physiologische Wirkung des elektrischen Stroms

- Der menschliche Körper leitet den elektrischen Strom. Dabei ist der Widerstand des Körpers ungefähr 1000Ω
- Gefährlich ist dabei nicht die elektrische Spannung, sondern ausschliesslich der Strom, der durch den Körper fliesst und die Dauer des Stromflusses.
- Als Faustregel gilt: Ist das Produkt aus Strom und Zeit (die elektrische Ladung) grösser als $50\mu As$ oder die Energie grösser als $350mJ$, wird es gefährlich.
- Wechselstrom ist gefährlicher als Gleichstrom, da er den Herzrhythmus stört.

6.2 Beispielrechnungen

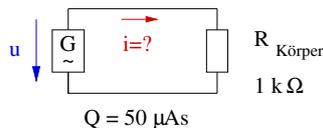


Abbildung 15: Der menschliche Körper hat ca. $1k\Omega$ Innenwiderstand

Wir nehmen an: der Strom fliesst eine Millisekunde lang durch den menschlichen Körper. Bei welchem Strom werden $Q = 50\mu As$ erreicht?

$$\begin{aligned}
 Q &= I \cdot t \\
 t &= 0.001s \\
 i &= 50mA
 \end{aligned}$$

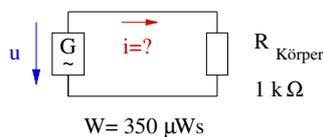


Abbildung 16: Wirkung der elektrischen Energie

$350mJ = 350mWs$. Damit diese Energie übertragen wird, müssen eine Sekunde lang $350mW$ erreicht werden:

$$\begin{aligned}
 P &= u \cdot i \\
 u &= R \cdot i \\
 \Rightarrow P &= i^2 \cdot R \\
 i &= \sqrt{P/R} = 18.7mA
 \end{aligned}$$

6.3 Hautwiderstand

- Die oben genannten $1k\Omega$ bezeichnen den *Innenwiderstand* des menschlichen Körpers.
- Der Hautwiderstand ist jedoch viel höher und hängt von vielen Faktoren ab:
 - Kontaktfläche
 - Feuchtigkeit
 - Anpressdruck (wie stark packt man zu)
 - uvm.
- Der Hautwiderstand hat ca. $1M\Omega$
- Bei schweren Stromunfällen wird die Haut vom Strom durchschlagen und es wirkt nur noch der Körperinnenwiderstand von $1k\Omega$

Folgende Werte beziehen sich auf Wechselstrom mit einer Frequenz von 50Hz:

$i < 10mA$ spürbar, ungefährlich, keine Muskelkrämpfe

10 - 25mA nicht tödlich, Krämpfe setzen ein. 25mA ist die Grenze des erträglichen.
Zum Vergleich: hell leuchtende LED benötigt ca. 25mA.

25 - 80mA falls der Strom über das Herz fließt (linke Körperhälfte) und länger als 30s dauert, kann *Herzkammerflimmern* einsetzen. Durch die Muskelverkrampfung kann es sein, dass man den unter Spannung stehenden Gegenstand nicht mehr loslassen kann.

80mA - 5A bei 80mA setzt bereits ab 0.3s Herzkammerflimmern ein. Lähmung der Atemmuskulatur, Verbrennungen

mehr als 5A sofortiger Herzstillstand, starke Verbrennungen, Atemlähmung.

6.4 Schutzmassnahmen

- TN-C-S: Terre neutre combiné-séparé
- Die Metallgehäuse von elektrischen Geräten werden *immer* mit PE verbunden.
- Auf diese Weise haben die Metallgehäuse dasselbe Potential wie die Erde.
- Somit kann am Gehäuse niemals eine Spannung gegenüber Erde auftreten.

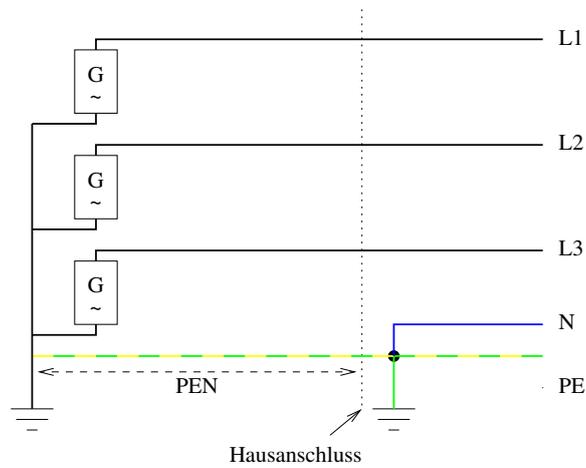


Abbildung 17: TN-C-S System

6.5 Fehlerstrom-Schutzschalter

Fehlerstrom-Schutzschalter

- Das Nullpotential am Gehäuse hätte man auch alleine mit dem Leiter N erreichen können.
- Die Trennung von N und PE erlaubt aber eine sehr sichere Schutzschaltung:.
- Man summiert die Ströme, die auf L1, L2, L3 und N fließen.
- Nach Knotenregel muss die Summe 0 ergeben!
- Weicht die Summe um mehr als z.B. 30mA von Null ab, schaltet die Schutzrichtung alle vier Leitungen (L1, L2, L3, N) ab.