

Skript zur Vorlesung

# Elektrizität und Magnetismus

(Sommersemester 2013)

Dieses Geheft enthält in kompakter, manchmal nur stichpunktartig aufzählender Form, die wesentlichen fachlichen und experimentellen Grundlagen, wie sie in der Vorlesung „Elektrizität und Magnetismus“ vorgestellt werden.

Es ist zum Gebrauch neben der Vorlesung gedacht und erhebt nicht den Anspruch, „in sich selbst verständlich“ oder vollständig zu sein.

S. Hilger

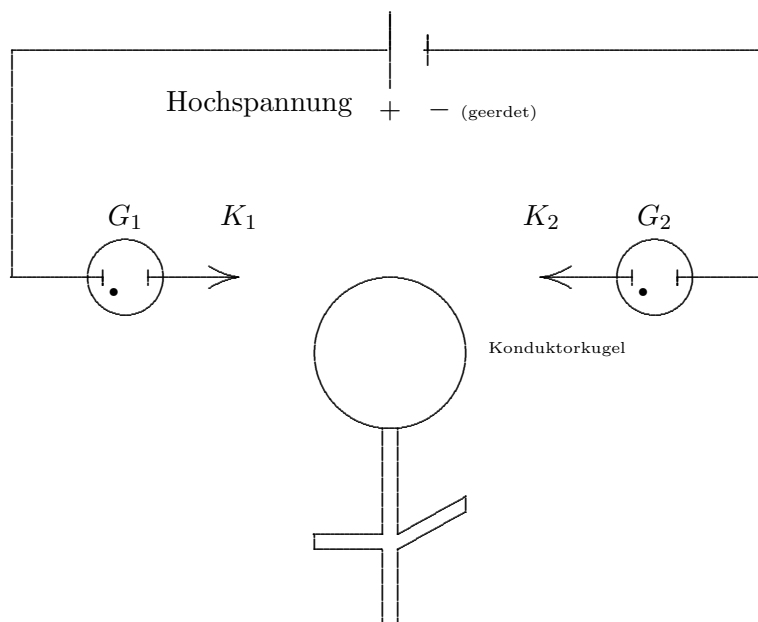
# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundgrößen der Elektrizitätslehre</b>	<b>4</b>
1.1	Die elektrische Ladung . . . . .	4
1.1.1	Reibungselektrizität $\ominus$ . . . . .	6
1.2	Die elektrische Stromstärke $\oplus$ . . . . .	7
1.3	Die elektrische Spannung $\oplus$ . . . . .	9
1.3.1	Die Analogie zwischen el. Stromkreisen und Wasserstromkreisen . . . . .	10
1.4	Der elektrische Widerstand $\oplus$ . . . . .	12
1.4.1	Der Begriff . . . . .	12
1.4.2	Messung . . . . .	12
1.4.3	Kennlinie . . . . .	13
1.5	Das Ohm'sche Gesetz $\oplus$ . . . . .	14
1.5.1	Messung $\ominus$ . . . . .	14
1.5.2	Der Farbcode . . . . .	15
1.6	Der spezifische el. Widerstand $\ominus$ . . . . .	16

# 1 Grundgrößen der Elektrizitätslehre

## 1.1 Die elektrische Ladung

V „Ladungen löffeln“ (Lehrplan 7.3 (202))



Mit der Konduktorkugel werden abwechselnd die Kontakte  $K_1$  oder  $K_2$  neben den *Glimmlampen*  $G_1$  bzw.  $G_2$  berührt.

- Kurze Berührung von  $K_1$ :  $G_1$  blitzt auf.
- Dauernde Berührung von  $K_1$ :  $G_1$  blitzt nur auf.
- Mehrmalige Berührung von  $K_1$ :  $G_1$  blitzt nur beim ersten Mal auf.
- Abwechselnde Berührung von  $K_1$  und  $K_2$ :  $G_1$  und  $G_2$  blitzen jedesmal auf.

Deutung: Es wird *elektrische Ladung* gelöffelt. Der *Konduktor* (= Löffel) nimmt eine bestimmte *Menge* Ladung bei  $K_1$  auf und gibt sie bei  $K_2$  wieder ab.

Besonderheiten:

- Symbol und Einheit:

$$[Q] = 1 \text{ C} \quad \text{Coulomb}$$

(Charles Augustine de Coulomb, 1736 – 1806), Messung: „Ballistisches Amperemeter“

- Satz von der Ladungserhaltung: El. Ladung kann nicht erzeugt oder vernichtet werden. Ihre Gesamtmenge bleibt stets gleich. (→ Arbeiten mit „Bilanzen“: Knotenregel in el. Stromkreisen).
- Es gibt eine „kleinste Portion el. Ladung“. Sie ist gegeben durch die Naturkonstante:

$$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Dies wird mit dem Millikan-Versuch (1911) aufgezeigt: Schwebende el. geladene Öltröpfchen im el. Feld eines Kondensators werden unter dem Mikroskop beobachtet.

- Die Ladung kann positive oder negative Werte annehmen.
- Mikroskopisch: Die Ladung ist in Elementarteilchen lokalisiert: *Elektronen, Protonen, Positronen*. Ein el. geladenes Atom wird als *Ion* bezeichnet.
- Coulomb'sches Kraftgesetz (= Grundgesetz der Elektrostatik): Zwischen zwei el. geladenen Körpern wirkt die Kraft:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon_r r^2}.$$

$Q_1, Q_2$ : El. Ladungen,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{V/m}}$ : Absolute Dielektrizitätskonstante,  $\epsilon_r$ : Relative Dielektrizitätskonstante (Im Vakuum  $\epsilon_r = 1$ ),  $r$ : Abstand der „Ladungsschwerpunkte“. Das Gesetz hat die gleiche mathematische Struktur wie das Newton'sche Gravitationsgesetz.

Konvention im Kraftgesetz: Eine positive Kraft ist abstoßend. Das heisst:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ungleichnamig} \\ \text{Gleichnamig} \end{array} \right. \text{ geladene Körper } \left\{ \begin{array}{l} \text{ziehen einander an} \\ \text{stoßen einander ab} \end{array} \right.$$

V Ein mit Aluminium überzogener Tischtennisball pendelt in einem Platten-Kondensator (Aufgeladen mit Hochspannungsnetzteil) ständig hin und her.

Erklärung: Bei Berührung einer der Platten lädt sich der Ball entsprechend auf und wird dann von dieser Platte abgestoßen und zur anderen Platte hingezogen.

V Verschiedene Versuche zur Elektrostatik.

Anwendung: Xerokopie (xero: (gr) trocken).

- Eine Metallwalze mit Anthrazen- oder Selen-schicht wird im Dunkeln positiv geladen.
- Das Farbpulver wird negativ geladen.
- Das „Weiß“ einer Vorlage führt über optische Anordnungen und Photoeffekt zu einem Verschwinden der Aufladung der Metallwalze. (→ Das schwarze Farbpulver haftet an den geladenen Stellen.)
- Das Papier läuft an der Metallwalze vorbei. Infolge einer dabei erfolgenden Entladung der Metallwalze und einem positiven Pol hinter dem Papier wird das Farbpulver auf das Papier gezogen.
- Durch Schmelz- oder Lösungsverfahren wird das Farbpulver auf dem Papier fixiert.

Anwendung: Pulverbeschichtungsverfahren für Lackschichten auf Metallen. (→ Exkursion Fa. Bittl, Dollnstein).

### 1.1.1 Reibungselektrizität $\ominus$

#### Aufladung

- Reibe verschiedenen Gegenstände aneinander: Luftballons, Mülltüten, Seide, Wolle, Leder, Katzenfell, Gummistab, Hartplastikstab, Kämmе.
- Klebe einen Klebefilm auf diese Materialien und reiße ihn ab!

#### Kraftwirkung

- Bringt man anschließend diese Gegenstände nahe aneinander, so ist evtl. eine anziehende oder abstoßende Kraftwirkung zu beobachten.
- Die Aufladung kann auch durch die Kraftwirkung auf Haare oder einen Wasserstrahl nachgewiesen werden.
- Mit Hilfe eines *Elektroskops* kann die Aufladung eines Körpers nachgewiesen werden: Zwei Metallblätter oder Alustreifen sind beweglich zueinander befestigt. Bringt man auf beide Teile eine Ladung, so führt die Abstoßung zu einer Drehung, die als Zeigerausschlag gemessen werden kann.
  - Einfaches Ringlektroskop oder hochempfindliches Wulf-Elektroskop
  - Selbstgebautes Dosenelektroskop: Zwei Aluminium-Streifen werden in den Schlitz eines Schraubdeckels eines Konservenglases geklebt. (Abbildung in ZA(Krümpel), S. 81.

#### Entladung

- Entladung durch eine Kerzenflamme in der Nähe
- Entladung durch UV-Licht (Hg-Dampflampe mit Dampflampen-Netzgerät)
- Entladung durch Wassernebel
- Die Entladung kann auch als Hinweise oder Nachweis von radioaktiver Strahlung benutzt werden.

#### Phänomene

- Durch die Reibung von Schuhsohlen beim Gehen auf Teppichböden kommt es zur Aufladung durch Ladungstrennung. Es treten dabei Spannungen von einigen Tausend Volt auf. Beim Entladen kommt es zu einem „elektrischen Schlag“, der wegen der geringen Stromstärken i.a. ungefährlich ist.
- Bewegte Wolken reiben aneinander oder gegenüber dem Erdboden und laden sich dabei auf. Die Entladung äußert sich dann in Gewitterblitzen. (Das ist grob vereinfacht ausgedrückt, siehe  W).

## 1.2 Die elektrische Stromstärke $\oplus$

**Der elektrischer Strom** *Elektrischer Strom* kommt zustande, wenn sich el. Ladungen (auf freien Ladungsträgern) bewegen.

Beispiele:

Medium	Ladungsträger	Beispiel
Metall	Elektronen	Kabel, Elektrotechnik
Vakuum	Elektronen	Röhren (Fernsehen),
Luft	Elektronen, Ionen	Überschlag, Blitz, (Gaszünder)
Gase	Elektronen, Ionen	Glimmlampen, Leuchtstoffröhren
Lösungen, Laugen, Säuren	Ionen	Elektrolyse, chem. Prozesse
Halbleiter, n-dotiert	Elektronen	Elektronik
Halbleiter, p-dotiert	Löcher	Elektronik
Plasma	Protonen, Elektronen	
Supra-Leiter	Cooper-Paare aus Elektronen	

**Elektrischer Strom und elektrische Ladung** Fließt in einem Medium ein konstanter Strom  $I$ , so tritt durch einen Leiterquerschnitt in der Zeitspanne  $t$  die Ladung

$$Q = I \cdot t, \quad \text{oder umgekehrt: } I = \frac{Q}{t}$$



Die el. Stromstärke ist der Quotient aus der durch einen Leiterquerschnitt hindurchtretenden Ladung  $Q$  und der dabei verstrichenen Zeitspanne.

(Aufgrund der Ladungserhaltung ist die Stromstärke durch jeden Leiterquerschnitt gleich groß.)

**Die elektrische Stromstärke als Basisgröße** Die Stromstärke  $I$  in zwei parallelen Leitern vom Abstand 1 m beträgt dann 1 A (André Marie Ampère, 1775 – 1836), wenn diese Leiter im Vakuum aufeinander die Kraft  $F = 2 \cdot 10^{-7}$  N je Meter Leiterlänge ausüben.

**Messung** Konkret gemessen wird die el. Stromstärke durch einen Leiterquerschnitt dadurch, dass der Leiter aufgetrennt wird und die beiden Enden mit den beiden Eingängen eines Amperemeters verbunden werden, das heißt, das Amperemeter wird in Reihe geschaltet. Damit die Schaltung durch den Meßvorgang wenig beeinflusst wird, muss der Innenwiderstand des Amperemeters möglichst gering sein. Das bedeutet große Leiterquerschnitte und damit hohe (Gewichts-Kräfte). Damit wird die Mechanik (bei höherer Empfindlichkeit) teuer.

Meßgeräte:

- Dreheisen-Amperemeter: Hier wird die oben angegebene Eichung direkt angewandt: Zwei Metallstäbe werden bei Stromfluss auseinandergedrückt, an Zeiger gekoppelte Rückstellfedern üben Gegenkräfte aus. Diese Meßgeräte sind ohne weitere Vorrichtung auch für Wechselströme geeignet.

- Hitzdrahtamperemeter: Über die Messung der Ausdehnung bei Erwärmung.
- Drehspul-Amperemeter: Vergleiche später.
- Stromzange.

Damit ist die el. Ladung eine abgeleitete Größe:

$$1 \text{ C} = 1 \text{ As}, \quad 1 \text{ Ah} = 1 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ As}, \quad 1 \text{ mAh} = \frac{1}{1000} \text{ Ah} = 3,6 \text{ As}.$$

Beispiel: Ein Akku hat eine „Kapazität“ von einigen Hundert mAh.

**Die technische Stromrichtung** An den äußeren Wirkungen eines el. Stromes ist nicht erkennbar, ob sich positive Ladungen oder negative Ladungen (in Gegenrichtung) bewegen. Als *Technische Richtung* eines el. Stromes wird die Richtung definiert, in die sich positive Ladungen bewegen (würden), die genau die Wirkungen dieses el. Stromes hervorrufen. Die technische Stromrichtung ist also unabhängig von dem Vorzeichen der tatsächlich beteiligten Ladungen.

Die Bewegung von Elektronen ist (leider) der technischen Stromrichtung immer gerade entgegengesetzt. Das hier die Konvention über die Stromrichtungen ungünstig ist, hat historische Gründe, die Konvention geht auf Michael Faraday zurück.

### 1.3 Die elektrische Spannung $\oplus$

Fließt zwischen zwei Punkten  $A$  und  $B$  (in einem Stromkreis oder Medium) ein el. Strom, so liegt als Ursache eine *elektrische Spannung*  $U$  zwischen  $A$  und  $B$  vor. Diese Spannung besteht auch, wenn keine leitende Verbindung zwischen  $A$  und  $B$  besteht.

Für die Einführung dieser Größe gibt es verschiedene methodische Wege:

- Phänomen: Eine „gegebene“ Eigenschaft von Stromquellen.
- Analogie Wasserstromkreis: Siehe unten.
- Fachlich: Ist zum Transport der el. Ladung  $Q = +1 \text{ As}$  von einem Punkt  $A$  zu einem Punkt  $B$  (in einem Stromkreis oder Medium) die (el.) Arbeit  $W_{el} = 1 \text{ J}$  nötig, so liegt zwischen diesen Punkten eine Spannung von  $U = 1 \text{ V}$ .

$$U := \frac{W_{el}}{Q}, \quad \text{Einheit: } 1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{As}} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{A s}^3}$$

Der Punkt  $A$  heißt dann auch Pluspol (höheres Potential), der Punkt  $B$  Minuspol bzgl. dieser Spannung.

Umgekehrt wird bei der Bewegung der Ladung  $1 \text{ As}$  vom Pluspol zum Minuspol bei einer Spannung von  $1 \text{ V}$  die Arbeit  $1 \text{ J}$  „frei“.

Bei technischen Stromquellen wird der Pluspol i.a. rot, der Minuspol i.a. blau oder dunkel gekennzeichnet.

Beispiele für Spannungswerte:

Öffentl. Netz	230 V
Trockenbatterien(galv. Elemente)	1 ... 10 V
Fahrraddynamo	$\approx 6 \text{ V}$
Netzteile, Spieltrafos	... 30 V
Blitzauslösung	$\approx 1 \text{ GV}$
Thermospannung (Thermoelement)	1 ... 10 mV

Umgekehrt gilt:

$$W_{el} = U \cdot Q, \quad 1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ As} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}.$$

Weiter gilt für die el. Leistung

$$P_{el} = \frac{W_{el}}{t} = \frac{U \cdot Q}{t} = U \cdot I, \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 1 \text{ VA}.$$

Damit kann man die für die Stromabrechnung übliche Einheit umwandeln:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \cdot 1 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3600000 \text{ J}.$$

(Vgl. später: El. Arbeit).

**Messung** Konkret gemessen wird die Spannung zwischen zwei Punkten dadurch, dass diese beiden Punkte mit den beiden Eingängen eines Voltmeters verbunden werden, das heißt, das Voltmeter wird parallel geschaltet. Damit die Schaltung durch den Meßvorgang wenig beeinflusst wird, muss der Innenwiderstand des Voltmeters möglichst hoch sein.

Meßgeräte:

- Amperemeter mit bekannten Innenwiderstand (vgl. später: Messbereichserweiterung),
- Oszilloskop: Es kann stromlos gemessen werden.



### 1.3.1 Die Analogie zwischen el. Stromkreisen und Wasserstromkreisen

Zwischen den physikalischen Größen und Gesetzen, die der Bewegung von Wasser(-teilchen) bzw. der Bewegung von el. Ladungsträgern zugrundeliegen, können weitreichende Analogien hergestellt werden, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind:

El. Stromkreis	Wasserstromkreis
Stromquelle: Sie erzeugt eine Spannung im Stromkreis.	Pumpe: Sie erzeugt eine Druckdifferenz im Stromkreis
Kabel, Drähte (el. Leiter)	Wasserrohre
Nichtleitendes Material	Dichtes Material
Schalter	Absperrhahn
Widerstand, „Verbraucher“ (E.–Motor)	wasserstromgetriebenes Gerät (Wasserrad, Mühle)
Voltmeter	Manometer*
Amperemeter	„Durchflussmessgerät“
„Ladungsmengenzähler“	Wasseruhr
„Stromzähler“	„Strömungsarbeitszähler“
Kondensator	Querliegende Membran
Spule	$\approx$ Trägheit des Wassers
Diode	Rückschlagventil
Elektronenaustritt (in Röhren)	Wasserhahn
El. Ladung $Q$	WasserVolumen $V$
El. Stromstärke $I = \frac{Q}{t}$	Wasserstromstärke $\frac{V}{t}$
El. Spannung $U$ (zwischen zwei Punkten)	Druckdifferenz $p$ (zwischen zwei Punkten)
El. Widerstand $R = \frac{U}{I}$	Strömungswiderstand
Spezifischer Widerstand	„Porösität“ bzw. Viskosität
El. Arbeit $W = Q \cdot U$	Strömungsarbeit $W = p \cdot V$
El. Leistung $P = \frac{Q \cdot U}{t} = I \cdot U$	Strömungsleistung $P = \frac{p \cdot V}{t}$
Potential „Erde“	Luftdruck

\* Ein Manometer mißt genau genommen die Druckdifferenz zwischen dem Wasserdruck und dem äußeren Luftdruck.

Da das Strömen von Wasser direkt beobachtbar, das heißt: unmittelbar den Sinnesorganen zugänglich, ist, im Vergleich zur Bewegung von Ladungsträgern, kann man diese Analogie nutzen,

die nur abstrakt fassbaren Größen der Elektrizitätslehre anschaulicher–konkreter werden zu lassen.

Dazu noch einige Anmerkungen:

- Oft begegnet man (in Schulbüchern beispielsweise) auch der Idee, die el. Spannung in Analogie zur „Höhe“ (des Wasser) zu setzen.

Dies ist günstig im Hinblick darauf, dass die Höhe eine leichter mit den Sinnesorganen zu erfassende physikalische Größe darstellt als der Druck.

Als ungünstig erweist sich aber die Tatsache, dass dann der Wasserstromkreis nicht mehr so sehr als „Kreislauf“ empfunden werden kann und dass die Definition der Arbeit nicht mehr direkt übersetzt werden kann.

- Die Analogie kann — naturgemäß — nicht umfassend alle Facetten hervorbringen. Wesentliche Unterschiede bestehen in ...

Zweck: Energie- oder Signaltransport	Zweck: Wassertransport
Positive und negative Ladung	Nur Wasser (Luftbläschen)
Elektromagnetische Erscheinungen	—
—	Verdunstung
Wechselstrom/–spannung	

## 1.4 Der elektrische Widerstand $\oplus$

### 1.4.1 Der Begriff

Der Begriff „elektrischer Widerstand“ ist in der deutschen Sprache zweideutig. Er bedeutet ...

- die physikalische Größe (genauer könnte man sagen: Widerstandswert, engl. resistance)
- eine Art Oberbegriff für alle Elemente eines Schaltkreises, an denen der Widerstandswert gemessen werden kann (Geräte, Bauteile, Medien (Drähte), engl. resistor).



Definition: Fließt durch ein Medium (Draht, Schaltelement, el. Gerät, ...)

- bei angelegter Spannung  $U$  (zwischen  $A$  und  $B$ ) (INPUT)
- ein elektrischer Strom der Stärke  $I$  (OUTPUT),
- so liegt ein elektrischer Widerstand vor von

$$R := \frac{U}{I} \quad \text{Einheit: } [R] = \frac{1\text{V}}{1\text{A}} = 1\Omega \text{ (Ohm)}$$

(Georg Simon Ohm, 1789 – 1854)

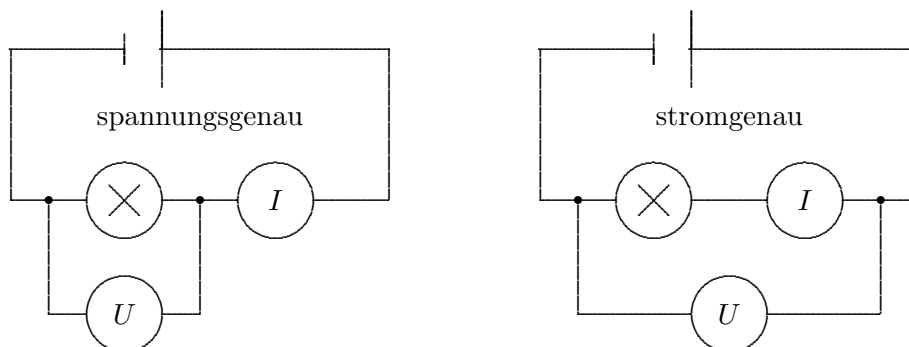
Der el. Widerstand kann allgemein abhängen von

- der Temperatur,
- und damit von der angelegten Spannung bzw. Stromstärke.
- Druck, mechanischer Spannung,
- Lichteinwirkung,
- Stromrichtung.

Der el. Widerstand muss keineswegs eine Konstante für ein bestimmtes „Bauteil“ sein. Er ist vielmehr einer ganz bestimmten Betriebsituation zugeordnet.

### 1.4.2 Messung

Die Messung erfolgt gemäß Definition durch simultane Messung von Spannung und Stromstärke. (Beachte, dass Kabel i.a. einen sehr geringen el. Widerstand haben).



### 1.4.3 Kennlinie

Ist der el. Widerstand nur spannungsabhängig, so wird der Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke in einer  $U$ - $I$  Kennlinie angegeben. Der el. Widerstand bei einer bestimmten Spannung  $U_b$  ergibt sich dann als Kehrwert der Steigung der Sekante zum Punkt  $(U_b, I_b)$  auf der Kennlinie.

Die Kennlinie kann direkt als Kurve mit dem Oszilloskop erzeugt werden. Dazu benötigt man eine bestimmte Schaltung, die bei manchen (besseren) Oszilloskopen als „Component tester“ bereits fertig vorgegeben ist.

Auf dem Beiblatt finden sich Kennlinien von

- Ohm'schen Widerständen (Bild 3,4):
  - Die Kennlinie ist eine Ursprungs(halb-)gerade.
  - Der Widerstand bleibt konstant bei veränderlicher Spannung.
- Metallfadenlampe (herkömmliche Glühlampe, Bild 6):
  - Die Steigung der Kennlinie nimmt ab (degressiv, rechtsgekrümmt).
  - Der Widerstand steigt mit zunehmender Spannung.
- Kohlefadenlampe (Bild 7):
  - Die Steigung der Kennlinie nimmt zu (progressiv, rechtsgekrümmt).
  - Der Widerstand sinkt mit zunehmender Spannung.

## 1.5 Das Ohm'sche Gesetz $\oplus$

Bei der Kennlinie für Konstantan (Cu-Ni-Mn-Legierung) beispielsweise zeigen sich die Kennzeichen der direkten Proportionalität (vgl. Didaktik-Vorlesung: Elementarisierung). Es gilt:

$$I \sim U$$

Das ist eine Formulierung des Gesetzes von Ohm.

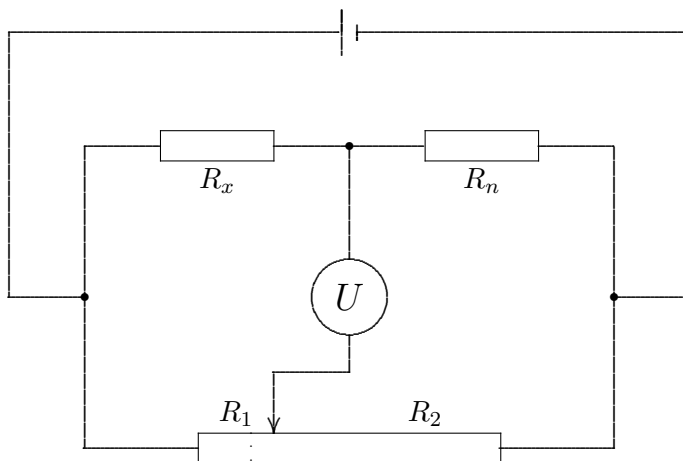
**Gesetz von Ohm** Der el. Widerstand eines metallischen Leiters bei konstanter Temperatur ist unabhängig von der angelegten Spannung:

$$R = \text{const} \quad \text{das heißt} \quad R = \frac{U}{I} = \text{const}$$

Ein solcher Widerstand heißt *Ohm'scher Widerstand*.

### 1.5.1 Messung $\ominus$

- Durch Bestimmung der Stromstärke bei bekannter angelegter Spannung (Siehe oben!)
- Viele Vielfachinstrumente (Analog oder DMM) ermöglichen die direkte Messung eines Widerstands (fast stromlos: Es fließen dabei nur kleine Ströme).
  - Ein Ohm'scher Widerstand kann so problemlos gemessen werden.
  - Ist der Widerstand spannungsabhängig, so wird mit dieser Methode der Widerstand in der Nähe von  $(U, I) = (0, 0)$  (Ursprung im Kennliniendiagramm) gemessen.
  - V Bestimme so den Widerstand einer Haushaltsglühlampe und vergleiche mit den Betriebsdaten.
- Wheatstone'sche Brücke (Kompensationsmethode).



Das Potentiometer wird so eingestellt, dass das Voltmeter Null zeigt. Es gilt dann:

$$\frac{R_x}{R_n} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\ell_1}{\ell_2}.$$

Sind der Normwiderstand  $R_n$  und das Längenverhältnis  $\frac{\ell_1}{\ell_2}$  gegeben, so kann daraus der unbekannte Widerstand  $R_x$  berechnet werden.

### 1.5.2 Der Farbcode

Bei elektronischen Bauteilen gibt es einen Farbcode, der den Widerstandswert angibt.

Ringfarbe	Ring 1	Ring 2	Ring 3	Ring 4
	Zahl 1...100		$\cdot 10^x$	Toleranz
silber	–	–	$\cdot 10^{-2}$	$\pm 10\%$
gold	–	–	$\cdot 10^{-1}$	$\pm 5\%$
schwarz	–	0	$\cdot 10^0$	
braun	1	1	$\cdot 10^1$	
rot	2	2	$\cdot 10^2$	
orange	3	3	$\cdot 10^3$	
gelb	4	4	$\cdot 10^4$	
grün	5	5	$\cdot 10^5$	
blau	6	6	$\cdot 10^6$	
violett	7	7	$\cdot 10^7$	
grau	8	8	$\cdot 10^8$	
weiß	9	9	$\cdot 10^9$	

Ü: Bestimme den Widerstand von Bauteilen nach der Tabelle. Halte dabei das Widerstandsbauteil so vor Dich, dass der silberne bzw. goldene Ring rechts ist.

Beispiel: Weist ein Widerstandsbauteil die Farbringreihenfolge

rot violett braun silbern  
 2 7  $\cdot 10^1$   $\pm 10\%$

auf, so ist der Widerstandswert  $270 \Omega \pm 10\%$ .

## 1.6 Der spezifische el. Widerstand $\varrho$

□ V Es wird der Widerstandswert von (Ohm'schem) Draht

- verschiedener Längen  $\ell$ ,
- verschiedener Querschnittsflächen  $A$ ,
- verschiedener Materialien

— bei jeweils konstant gehaltenen anderen Parametern — gemessen. Es stellt sich jeweils heraus:

$$R \sim \ell \qquad R \sim \frac{1}{A}.$$

Damit gilt insgesamt

$$R \sim \frac{\ell}{A}.$$

Die Proportionalitätskonstante  $\varrho$  ist allein vom Stoff abhängig. Sie heißt *spezifischer elektrischer Widerstand*. Es gilt also:

$$R = \varrho \cdot \frac{\ell}{A}$$

Einheit:  $[\varrho] = \Omega \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \Omega\text{m}$ .

Per Konvention (aufgrund der Drahtdimensionen) auch:  $1 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega\text{m}$ .

Der spezifische Widerstand ist die Materialgröße mit dem größten Wertebereich:

$$\varrho_{\text{Kupfer}} \approx 10^{-8} \Omega\text{m} \qquad \xrightarrow{\cdot 10^{24} \text{ (Quadrillion)}} \qquad \varrho_{\text{Bernstein}} \approx 10^{16} \Omega\text{m}$$

Die *elektrische Leitfähigkeit* eines Stoffes ist definiert als der Kehrwert des spezifischen Widerstands:

$$\sigma = \frac{1}{\varrho} \qquad \text{Einheit: } [\sigma] = \frac{1}{\Omega\text{m}}.$$

□ V Bestimme den Widerstand von Bleistiftstrichen.