

# Grundlagen der Elektrizitätslehre

(Erläuterungen)

Die Elektrizitätslehre ist das Teilgebiet der Physik, in welchem die Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten ruhender und bewegter elektrischer Ladungen sowie elektrischer und magnetischer Felder beschrieben werden.

	Seite
elektrische Felder	5
Halbleiter	10
Induktion	8
Induktivität einer Spule	9
Kondensator	6
Ladung	2
Leitungsvorgänge	10
magnetische Felder	7
OHmsches Gesetz	4
Spannung	3
Strom	2
Widerstand	4
Wirbelströme	9

# 1. Physikalische Größen der Elektrizitätslehre

## 1.1. Elektrische Ladung Q, Ladungsnachweis, Ladungstrennung, Ladungsausgleich, Ladungsübertragung, Ladungsteilung, Leiter und Isolatoren

### Elektrische Ladung Q

... ist eine physikalische Größe, ist das Produkt aus einer konstanten Stromstärke (I) und der Zeit (t) und gibt die elektrische Ladung eines Körpers an. Bei einer Stromstärke von 1 A fließt in 1 s eine Ladung von 1 C durch den Leiterquerschnitt.

1 Coulomb (sprich: kulö) (C) =  $6,2 \cdot 10^{18}$  elektrische Elementarladungen (e) = 1 Amperesekunde (A · s)

### Ladungsnachweis

... erfolgt durch den Nachweis von Kräften, die zwischen geladenen Körpern wirken. Hierzu kann ein Elektroskop benutzt werden.

### Ladungstrennung

... ist ein Vorgang, bei dem positive (Ionen) und negative (Elektronen) Ladungsträger voneinander getrennt werden. Die dabei verrichtete Arbeit wird als Energie im elektrischen Feld gespeichert.

### Ladungsausgleich

... ist ein Vorgang, bei dem positive und negative elektrische Ladungsträger (Ionen, Elektronen) zwischen unterschiedlich elektrisch geladenen Objekten ausgetauscht werden. Dabei wird elektrische Energie in andere Energiearten umgewandelt.

### Ladungsübertragung

... ist ein Vorgang, bei dem elektrische Ladungsträger von einem elektrisch geladenen Körper auf andere Körper übergehen. Dabei findet eine Ladungsteilung statt.

### Ladungsteilung

Auf alle an der Ladungsübertragung beteiligten Körper wird die vorhandene elektrische Ladung aufgeteilt. Die kleinste nicht mehr teilbare Ladung ist die Elementarladung (e).

### Leiter und Isolatoren (siehe auch Kapitel 1.8)

In Leitern ist ein Ladungstransport möglich, in Isolatoren ist ein Ladungstransport fast unmöglich.

## 1.2. Elektrischer Strom, Elektrische Stromstärke I, Wirkungen des elektrischen Stroms, Elektrischer Stromkreis

### Elektrischer Strom

... ist die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern durch einen Leiter oder im Vakuum zwischen zwei unterschiedlich geladenen Körpern.

### Elektrische Stromrichtung

... wurde vereinbart vom positiven Pol zum negativen Pol. Tatsächlich bewegen sich nur positive Ladungsträger (positive Ionen) in dieser vereinbarten Stromrichtung. Negative Ladungsträger (negative Ionen und Elektronen im Metall) bewegen sich entgegengesetzt zur vereinbarten Stromrichtung, vom negativen Pol zum positiven Pol.

### Wirkung des elektrischen Stromes

Bei einem Stromfluss wird elektrische Energie durch Energiewandler (elektrische Geräte) in andere Energiearten umgewandelt.

Man nutzt die Wärmewirkung (Kochplatte), Lichtwirkung (Glühlampe), magnetische Wirkung (Elektromagnet) und andere Wirkungen des elektrischen Stroms.

### Elektrische Stromstärke I

... ist der Quotient aus der durch einen Leiterquerschnitt fließenden elektrischen Ladung (Q) und der Zeit (t). Die elektrische Stromstärke ist eine Basiseinheit des SI-Systems (siehe: Maßeinheiten und Konstanten). 1 Ampere = 1 Coulomb je Sekunde (sprich: kulö je sekunde).

Bei einer Stromstärke von 1 A fließen etwa  $6,2 \cdot 10^{18}$  Elektronen durch den Querschnitt eines Leiters.

Die Messung des elektrischen Stromes erfolgt unter Ausnutzung der magnetischen Wirkung mit Hilfe eines Strommessers.

### Elektrischer Stromkreis

Wenn ein geschlossener Stromkreis vorliegt, fließt ein elektrischer Strom.

## **1.3. Elektrische Spannung U**

### Elektrische Spannung U

... ist eine notwendige Bedingung für den Stromfluss in einem Stromkreis. Die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes ist gleich dem Quotienten aus der zwischen diesen Punkten verrichteten Verschiebungsarbeit W und der bewegten Ladung Q.

Maßeinheit: Volt (V)

## **1.4. Elektrische Energie $W_{el}$ , Satz von der Erhaltung der Energie**

Für die Erzeugung eines elektrischen Feldes oder eines elektrischen Stromflusses, muss Arbeit verrichtet werden. Das Feld oder die Ladungsträger verrichten diese Arbeit. Diese Größe wird als elektrische Arbeit bezeichnet.

Maßeinheit: Wattsekunde (Ws)

### Satz von der Erhaltung der Energie

Bei allen Vorgängen bleibt die Summe aller Energien konstant. Energie entsteht nicht und verschwindet nicht. Die Menge der Gesamtenergie bleibt erhalten.

Elektrische Energie wird durch Umwandlung aus anderen Energiearten erzeugt und lässt sich in andere Energiearten umwandeln.

## **1.5. Elektrische Arbeit $W_{el}$**

Elektrische Arbeit wird verrichtet, wenn elektrische Energie in andere Energiearten umgewandelt wird.

elektrische Energie  $\longrightarrow$  mechanische Energie, Wärmeenergie, Lichtenergie, ...

Die elektrische Arbeit ist gleich dem Produkt aus der Spannung U, der Stromstärke I und der Zeit t. Wenn in 1 s bei einer Spannung von 1 V ein Strom von 1 A fließt, wird 1 Wattsekunde (Ws) an Arbeit verrichtet.

## 1.6. Elektrische Leistung P

$$P = U \cdot I$$

Die elektrische Leistung P ist gleich dem Produkt aus der Spannung U und der Stromstärke I. Wenn bei einer Spannung von 1 Volt ein Strom von 1 A fließt, wird eine Leistung von 1 Watt (W) abgegeben.  
Maßeinheit: Watt (W)

## 1.7. OHMSches Gesetz für den Gleichstromkreis

In einem Leiter verhalten sich die Stromstärke I und die Spannung U proportional zueinander.

$$I \sim U$$

## 1.8. Elektrischer Widerstand R, Widerstandsgesetz, Spezifischer elektr. Widerstand $\rho$

### **Elektrischer Widerstand R**

... ist eine physikalische Größe, welche die Behinderung der gerichteten Bewegung von Ladungsträgern in Leitern kennzeichnet. Der elektrische Widerstand ist gleich dem Quotienten aus Spannung U und Stromstärke I. Maßeinheit: Ohm ( $\Omega$ )

Wird in einem Leiter durch eine Spannung von 1 Volt eine Stromstärke von 1 Ampere hervorgerufen, so beträgt der Widerstand 1 Ohm.

$$R = \frac{U}{I}$$

R	elektrischer Widerstand in Ohm ( $\Omega$ )
U	elektrische Spannung in Volt (V)
I	elektrischer Strom in Ampere (A)

### **Elektrischer spezifischer Widerstand $\rho$** (sprich: rho)

... ist eine physikalische Größe, welche den elektrischen Widerstand von Stoffen kennzeichnet.

Diese Größe ist abhängig von Temperatur und Stoff.

Stoffe mit einem spezif. Widerstand größer als  $100 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$  sind Isolatoren.

Stoffe mit einem spezif. Widerstand kleiner als  $1 \mu\Omega \cdot \text{m}$  sind Leiter.

Stoffe mit einem spezif. Widerstand zwischen  $1 \mu\Omega \cdot \text{m}$  und  $100 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$  sind Halbleiter.

### **Widerstandsgesetz**

... ist ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand, den Abmessungen und der stofflichen Beschaffenheit eines Leiters.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

R	elektrischer Widerstand in Ohm ( $\Omega$ )
$\rho$	spezifischer elektrischer Widerstand in Ohmmeter ( $\Omega\text{m}$ )
l	Leiterlänge in Meter (m)
A	Leiterquerschnittsfläche in Quadratmeter ( $\text{m}^2$ )

## 2. elektrische und magnetische Felder

### 2.1. elektrische Felder

Ein elektrisches Feld existiert in einem Raum und ist an seiner Kraftwirkung auf ruhende und bewegte Ladungsträger erkennbar.

Elektrische Felder bestehen in der Umgebung elektrisch geladener Körper sowie in der Umgebung veränderlicher magnetischer Felder.

#### 2.1.1. Elektrisches Feld als Träger von Energie

Zum Aufbau elektrischer Felder muss Arbeit verrichtet werden. Die hierzu aufgewendete Energie wird im elektrischen Feld gespeichert.

Die Energie des elektrischen Feldes kann in andere Energiearten umgewandelt werden. Dabei wird das elektrische Feld abgebaut.

#### 2.1.2. Elektrische Feldstärke E

$$E = \frac{F}{Q}$$

Die elektrische Feldstärke E ist gleich dem Quotienten aus der auf einen Körper wirkenden Kraft F und der Ladung Q dieses Körpers.

Wirkt an einem Punkt des elektrischen Feldes auf einen Probekörper mit der Ladung 1 As eine Kraft von 1 N, dann beträgt die elektrische Feldstärke an diesem Punkt 1 Volt je Meter ( $V \cdot m^{-1}$ ).

#### 2.1.3. Elektrische Feldlinien

Elektrische Feldlinien sind gedachte Linien zur modellhaften Veranschaulichung für den Verlauf eines elektrischen Feldes. Experimentell kann man den Verlauf von Feldlinien in einer Ebene darstellen, indem man kleine Probekörper wie z.B. Eisenpulver oder Grießkörchen in das elektrische Feld bringt.

#### 2.1.4. COULOMBSches Gesetz (sprich: kulö-sches Gesetz)

In der Umgebung einer punktförmigen Ladung nimmt die Feldstärke mit zunehmender Entfernung ab. Verdoppelt sich die Entfernung, so sinkt die Feldstärke auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes. Im gleichen Verhältnis ändert sich auch die einwirkende Kraft in diesem Feld, auf eine weitere Punktladung. Für die Kraft (F), die zwei punktförmige Ladungen ( $Q_1$  und  $Q_2$ ) im Abstand (r) aufeinander ausüben, gilt das COULOMBSche Gesetz.

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

F Kraft

$Q_1, Q_2$  Punktförmige Ladungen

r Abstand der punktförmigen Ladungen

$\epsilon_0$  elektrische Feldkonstante

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

### 2.1.5. Kondensatoren

Kondensatoren sind elektrische Bauelemente, welche aus zwei gegeneinander isolierten Leitern bestehen und im geladenen Zustand entgegengesetzte elektrische Ladungen auf diesen Leitern tragen. Zwischen den geladenen Leitern besteht ein elektrisches Feld. Beim Laden sowie beim Entladen des Kondensators fließen elektrische Ströme. Der Ladestrom und der Entladestrom sind entgegengerichtet.

### 2.1.6. Elektrische Kapazität C

$$C = \frac{Q}{U}$$

Die elektrische Kapazität C eines Kondensators ist gleich dem Quotienten aus der Ladung Q und der Spannung U.  
Maßeinheit: Farad (F)

Ein Kondensator besitzt die Kapazität 1 F, wenn er bei einer Spannung von 1 Volt eine Ladung von 1 As aufnimmt.

Die Kapazität eines Kondensator hängt ab

- von der Größe (Fläche) der Leiter, z.B. Plattengröße beim Plattenkondensator
  - vom Abstand der Leiter (Platten)
  - vom Stoff in dem Raum zwischen den Leitern (Platten) = Dielektrikum
- > Bei einem Vakuum zwischen den Leitern (Platten) ist die Kapazität am geringsten, ggü. allen anderen Stoffen als Dielektrikum. Als Dielektrikum kommen bei Kondensatoren Papier, keramische Massen, Metalloxidschichten, Kunststofffolien oder Luft zur Anwendung.

## **2.2. Magnetisches Feld**

Ein magnetisches Feld ist ein besonderer Zustand des Raumes, der erkennbar ist, an der Kraftwirkung des magnetischen Feldes. Stromführende Leiter und Dauermagnete rufen magnetische Felder hervor und können durch andere magnetische Felder beeinflusst werden.

### **2.2.1. Magnetisches Feld als Träger von Energie**

Zum Aufbau eines magnetischen Feldes muss Arbeit verrichtet werden.

Die im magnetischen Feld gespeicherte Energie kann in andere Energiearten (z.B. mechanische Energie = Bewegung eines Stabmagneten) umgewandelt werden. Dabei wird das magnetische Feld abgebaut.

### **2.2.2. Stärke des magnetischen Feldes**

Die Stärke eines magnetischen Feldes im Innern einer länglichen Spule ist

- direkt proportional der Stromstärke und der Windungszahl, sowie
- umgekehrt proportional der Spulenlänge und ist abhängig vom
- Material des Spulenkörpers.

### **2.2.3. Elektromagnet**

Der Elektromagnet ist eine stromdurchflossene Spule, oft mit Eisenkern, deren magnetische Kraft genutzt wird.

### **2.2.4. Elektrische Ladungen im magnetischen Feld**

Auf ruhende elektrische Ladungsträger übt ein magnetisches Feld keine Wirkung aus.

Auf bewegte elektrische Ladungsträger wirkt im magnetischen Feld eine Kraft.  
Im magnetischen Feld können bewegte Ladungsträger abgelenkt werden.

### **2.2.5. Elektromotorisches Prinzip**

In einem magnetischen Feld wirkt auf einen stromführenden Leiter eine Kraft. Die Krafrichtung steht senkrecht auf der Ebene, die von der Richtung des magnetischen Feldes und der Stromrichtung aufgespannt wird.

Die Ursache dieser Erscheinung ist die Ablenkung bewegter Ladungsträger im magnetischen Feld. Dabei wird elektrische Energie in kinetische Energie umgewandelt.

In einem Gleichstrommotor dreht sich die stromdurchflossene Spule im Feld eines Elektromagneten. Ein Kollektor bewirkt das rechtzeitige ändern der Stromrichtung im Anker, so dass eine ständige Drehbewegung hervorgerufen wird.

### **3. Elektromagnetische Induktion**

Die elektromagnetische Induktion ist ein physikalischer Vorgang, bei dem durch magnetische Felder in Leitern Spannungen hervorgerufen werden.

#### **3.1. Generatorprinzip**

In einem bewegten Leiter wird durch ein magnetisches Feld eine Spannung induziert, bei geschlossenem Stromkreis fließt ein induzierter Strom. Bei diesem Vorgang wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt (Umkehrung des elektromotorischen Prinzips).

#### **3.2. MHD-Generator**

Das Generatorprinzip gilt auch für Ladungsträger die sich im magnetischen Feld außerhalb eines festen Leiters bewegen.

Dieses Prinzip wird zur Spannungserzeugung im magnetohydrodynamischen Generator (MHD-Generator) genutzt.

Funktionsweise: In einer Brennkammer wird ein Brennstoff verbrannt. Die mit hoher Geschwindigkeit austretenden Gase enthalten positive und negative Ladungsträger. Sie werden durch das magnetische Feld getrennt und laden die beiden Elektroden entgegengesetzt auf.

#### **3.3. Elektromagnetische Induktion in einer Spule**

Ändert sich das magnetische Feld welches eine Spule durchsetzt, so wird in der Spule eine Spannung induziert.

Änderungen entstehen durch:

- Bewegung des magnetischen Feldes
- Bewegung der Spule
- Ein- und Ausschalten des Stroms in der Erregerspule
- Feldänderung durch Änderung der Stromstärke in der Erregerspule
- Feldänderung durch Einführen eines Eisenkerns in die Erregerspule

#### **3.4. Induktionsspannung**

Die Induktionsspannung ist proportional

- der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes, welches die Spule durchdringt
- dem Querschnitt der Induktionsspule
- der Windungszahl der Induktionsspule

#### **3.5. LENZsches Gesetz**

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass sein Magnetfeld der Ursache des Induktionsvorgangs entgegenwirkt.



### **3.6. Selbstinduktion**

Stromstärkeänderungen in einer (Erreger-) Spule führen nicht nur in einer weiteren (Induktions-) Spule, sondern auch in der (Erreger-) Spule selbst zur Induktion einer Spannung. Dieser Vorgang heißt Selbstinduktion.

### **3.7. Induktivität L einer Spule**

... ist eine Eigenschaft einer Spule, von der die durch Selbstinduktion erzeugte Spannung abhängt.

Maßeinheit: Henry (H)

Eine Spule besitzt die Induktivität 1 Henry, wenn in ihr bei einer Stromstärkeänderung von 1 Ampere je Sekunde eine Spannung von 1 Volt induziert wird.

Als Folge der Induktivität einer Spule ergibt sich beim Schließen eines Stromkreises eine Verzögerung bis zum Erreichen des maximalen elektrischen Stroms, beim Unterbrechen eines Stromkreises kommt es zu einem allmählichen Abklingen des elektrischen Stroms.

### **3.8. Wirbelströme**

Wirbelströme treten in massiven Metallteilen auf, wenn diese in einem magnetischen Feld bewegt werden oder einem veränderlichen magnetischen Feld ausgesetzt sind.

Die Wirbelströme sind so gerichtet, dass ihre magnetischen Felder der Ursache dieser Wirbelströme entgegengerichtet sind.

Erwünschte Wirkungen von Wirbelströmen:

- Elektrizitätszähler (Stromzähler)
- Wirbelstrombremse

unerwünschte Wirbelströme können vermindert werden durch:

Austausch massiver Blechteile durch

- isolierte Blechlamellen
- Spulenkerne aus magnetischen Keramikmassen

## **4. Elektrische Leitungsvorgänge**

Elektrische Energie wird in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen sowie im Vakuum durch Ladungsträger transportiert. Dieser physikalische Vorgang wird als Leitungsvorgang bezeichnet.

### **4.1. Leitungsvorgang in Festkörpern wie Metallen, Halbleitern und Isolatoren**

Metalle sind Stoffe, die eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit besitzen.

Die Metallatome sind gitterartig angeordnet. In diesem Gitter sind sehr viele frei bewegliche Elektronen vorhanden. Diese negativ geladenen Elektronen bewegen sich zum positiven Pol hin. Zwischen diesen Elektronen und den Gitterbausteinen findet eine Wechselwirkung statt, bei der ein Teil der kinetischen Energie der Elektronen als kinetische Energie der Gitterbausteine abgegeben und in Wärmeenergie (Stromwärme) gewandelt wird.

Es gilt hier auch das OHMSche Gesetz (bei konstanter Temperatur):  $U \sim I$

Isolatoren sind Stoffe, die praktisch keine elektrische Leitfähigkeit besitzen, da nur sehr wenige frei bewegliche Elektronen vorhanden sind.

Halbleiter sind Stoffe, deren Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit wertemäßig zwischen dem von Metallen und Isolatoren liegt.

Reine Halbleiterstoffe sind bei der tiefsten Temperatur am absoluten Nullpunkt typische Isolatoren.

Eigenleitung: Durch Energiezufuhr wie Erwärmung und/oder Belichtung werden aus dem Kristallverband Elektronen herausgelöst. Die entstandenen positiven Löcher werden auch „Defektelektronen“ genannt. Elektronen und „Defektelektronen“ ermöglichen den Leitungsvorgang.  
Störstellenleitung: Durch den Einbau von Fremdatomen (Dotierung) in einen Halbleitereinkristall können zusätzliche, freie Ladungsträger erzeugt werden.

Durch den Einbau von Indium (dreiwertig) fehlt das vierte Valenzelektron, der Kristall wird p-leitend. Durch den Einbau von Arsen (fünfwertig) ist jeweils das fünfte Valenzelektron übrig als zusätzlicher Ladungsträger, der Kristall wird n-leitend.

### **4.2. Halbleiterbauelemente**

Die Funktion der Halbleiterbauelemente beruht auf den Prozessen der Eigenleitung und Störstellenleitung.

#### **4.2.1. Halbleiterdioden**

Die Diode besteht aus einem Einkristall mit einer p-leitenden Schicht (Defektelektronenüberschuss) und einer n-leitenden Schicht (Elektronenüberschuss). Je nach Richtung des angelegten elektrischen Feldes kann ein Strom fließen (Durchlaßrichtung) oder der Stromfluss wird verhindert (Sperrichtung).

In dieser Funktion werden Dioden als Gleichrichter eingesetzt.

#### **4.2.2. Transistoren**

Die Transistoren bestehen aus einem Einkristall mit drei Schichten in der Reihenfolge p-n-p oder n-p-n.

Die Anschlüsse der zweifach vorhandenen Schicht werden als Kollektor (C) und Emitter (E) bezeichnet. Der mittlere Anschluss wird als Basis (B) bezeichnet.

Bei einem Transistor kann mit einer geringen Änderung der Basisstromstärke eine große Änderung der Kollektorstromstärke erzeugt werden. Das Verhältnis zwischen Basis- und Kollektorstromstärke wird als Stromverstärkungsfaktor bezeichnet.

Im Gegensatz zu Elektronenröhren müssen Halbleiterbauelemente nicht geheizt werden, besitzen geringere Abmessungen, eine größere Lebensdauer und eine geringere Störanfälligkeit. Daher sind Elektronenröhren bis auf einige Spezialanwendungen (Bildröhren) von den Halbleiterbauelementen verdrängt worden.

### **4.3. Leitungsvorgang in Flüssigkeiten**

Elektrolyte sind Lösungen oder Schmelzen, die den elektrischen Strom leiten.

Wässrige Elektrolyte entstehen häufig durch Dissoziation beim Lösen ionenbildender Stoffe (Salze, Basen, Säuren) in Wasser. Als Folge der Dissoziation entstehen frei bewegliche Ionen mit positiver (Kationen) oder negativer Ladung (Anionen). Im elektrischen Feld wandern die Ionen entsprechend ihrer Ladung zu der jeweiligen Elektrode. Die Kationen wandern zur negativen Katode und die Anionen wandern zur positiven Anode. An den Elektroden werden die Ionen durch Aufnahme (Kationen) oder Abgabe von Elektronen (Anionen) entladen und scheiden sich an den Elektroden ab.

### **4.4. Leitungsvorgang in Gasen**

Gase bestehen aus elektrisch neutralen Teilchen wie Atome oder Moleküle.

Durch Erwärmung oder Röntgenstrahlung oder durch radioaktive Strahlung erfolgt eine Energiezufuhr, bei der sich aus den ungeladenen Gasteilchen Ionen und Elektronen bilden. Diese sind im Gas leicht beweglich und ermöglichen den elektrischen Leitungsvorgang in Gasen.

#### Stoßionisation

Die Ladungsträger eines Gases mit niedrigem Druck werden durch ein elektrisches Feld so stark beschleunigt, dass sie beim Zusammenstoß mit anderen neutralen Gasteilchen diese ionisieren.

### **4.5. Leitungsvorgang im Vakuum**

Im Vakuum ist ein elektrischer Leitungsvorgang nur möglich, wenn in das Vakuum Elektronen eingebracht und diese in einem elektrischen Feld beschleunigt werden.

Ladungsträgererzeugung

- durch Glühemission: Durch Erwärmung ...
- durch Fotoemission: Durch Belichtung ...

... eines Körpers aus Metall oder Metalloxid erhalten dessen Elektronen eine so hohe kinetische Energie, dass die Elektronen aus der Oberfläche des Körpers in das Vakuum heraustreten.