

GET it digital

# Modul 1: Elektrische Grundgrößen



Stand: 5. September 2025



Weiternutzung als OER ausdrücklich erlaubt: Dieses Werk und dessen Inhalte sind lizenziert unter CC BY 4.0. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. Nennung gemäß TULLU-Regel bitte wie folgt: „GET it digital Modul 1: Elektrische Grundgrößen“ von H. Bode Lizenz: CC BY 4.0.

Der Lizenzvertrag ist hier abrufbar:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Das Werk ist online verfügbar unter:

<https://getitdigital.uni-wuppertal.de/module/modul-1-elektrische-grundgroessen>



## Lernziele: Beschreibung physikalischer Größen

Die Studierenden können

- ▶ physikalische Größen mit Maßzahl und Maßeinheit angeben
- ▶ die sieben SI-Basiseinheiten sowie die davon abgeleiteten Einheiten nutzen sowie ihren jeweiligen Größen zuordnen
- ▶ Zahlenwerte mit Hilfe von Zehnerpotenzen sowie deren Bezeichnung angeben und ineinander umrechnen

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis

**Tabelle:** SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis
Zeit	$t$	Sekunde, s	$\Delta\nu$

Tabelle: SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

Eine Sekunde ist das 9.192.631.770-fache der Periodendauer des Hyperfeinstrukturübergangs  $\Delta\nu$  im Cäsium-Atom  $^{133}\text{Cs}$ .

$$\Delta\nu = 9.192.631.770 \text{ Hz} \quad (\text{Hyperfeinstrukturübergang } ^{133}\text{Cs})$$

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis
Zeit	$t$	Sekunde, s	$\Delta\nu$
Länge	$\ell$	Meter, m	$c, s$

Tabelle: SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

Ein Meter ist die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während der Dauer von

$t = \frac{1}{299.792.458}$  s zurücklegt.

$c = 299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (Lichtgeschwindigkeit)

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis
Zeit	$t$	Sekunde, s	$\Delta\nu$
Länge	$l$	Meter, m	$c, s$
Masse	$m$	Kilogramm, kg	$h, s, m$

Tabelle: SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

Das Kilogramm ist seit Mai 2019 vom genau definierten Planckschen Wirkungsquantum abhängig:  $1\text{kg} = \frac{h}{6,62607015 \cdot 10^{-34} \frac{\text{s}}{\text{m}^2}}$

$$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{Js} \quad (\text{Plancksches Wirkungsquantum})$$

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis
Zeit	$t$	Sekunde, s	$\Delta\nu$
Länge	$\ell$	Meter, m	$c, s$
Masse	$m$	Kilogramm, kg	$h, s, m$
Stromstärke	$I$	Ampere, A	$e, s$

**Tabelle:** SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

Das Ampere ist seit 2019 durch die Elementarladung definiert. Ein Ampere ist der Stromfluss von  $\frac{e}{1,602176634} \cdot 10^{-19} \frac{1}{s}$  Elementarladungen pro Sekunde.

$$e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{As} \quad (\text{Elementarladung})$$

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis
Zeit	$t$	Sekunde, s	$\Delta\nu$
Länge	$l$	Meter, m	$c, s$
Masse	$m$	Kilogramm, kg	$h, s, m$
Stromstärke	$I$	Ampere, A	$e, s$
Temperatur	$T$	Kelvin, K	$k_B, s, m, kg$

Tabelle: SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

Ein Kelvin entspricht einer Änderung der thermodynamischen Temperatur, die mit einer Änderung der thermischen Energie ( $kT$ ) um  $1,380649 \cdot 10^{-23}$  J einhergeht.

$$k_B = 1,38064910^{-23} \frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2\cdot\text{K}} \quad (\text{Boltzmann-Konstante})$$

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis
Zeit	$t$	Sekunde, s	$\Delta\nu$
Länge	$\ell$	Meter, m	$c, s$
Masse	$m$	Kilogramm, kg	$h, s, m$
Stromstärke	$I$	Ampere, A	$e, s$
Temperatur	$T$	Kelvin, K	$k_B, s, m, \text{kg}$
Stoffmenge	$n$	Mol, mol	$N_A$

Tabelle: SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

Ein Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das  $6,02214076 \cdot 10^{23}$  eines bestimmten Einzelteilchens enthält.

$$N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \quad (\text{Avogadro-Konstante})$$

SI-Größe	Formelzeichen	Einheit	Basis
Zeit	$t$	Sekunde, s	$\Delta\nu$
Länge	$l$	Meter, m	$c, s$
Masse	$m$	Kilogramm, kg	$h, s, m$
Stromstärke	$I$	Ampere, A	$e, s$
Temperatur	$T$	Kelvin, K	$k_B, s, m, \text{kg}$
Stoffmenge	$n$	Mol, mol	$N_A$
Lichtstärke	$I_v$	Candela, cd	$K_{\text{cd}}, s, m, \text{kg}$

Tabelle: SI-Einheiten und ihre Basisgrößen

Eine Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die mit einer Frequenz von 540 THz emittiert und die eine Strahlungsintensität in dieser Richtung von  $\frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}}$  hat. (sr = Raumwinkel Steradian)

$$K_{\text{cd}}(540\text{THz}) = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \quad (\text{Photometrisches Strahlungsäquivalent})$$

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	1 N = 1 kg m/s <sup>2</sup>

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

Kraft ist Masse mal Beschleunigung:  $F = m \cdot a$

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

Oft vergleichbar mit Arbeit, wichtig für Energieerhaltung, Einheit auch Wattsekunde

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

Leistung ist Arbeit pro Zeit

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$
Spannung	U	Volt, V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ Nm/As} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}$

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

”Stärke“ einer Spannungsquelle - Analog zum Druck in einer Leitung

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$
Spannung	U	Volt, V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ Nm/As} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}$
Ladung	Q	Coulomb, C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

Menge an freien Elementarladungen

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$
Spannung	U	Volt, V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ Nm/As} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}$
Ladung	Q	Coulomb, C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$
Widerstand	R	Ohm, $\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}^2$

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

”Reibung” von elektrischem Strom

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$
Spannung	U	Volt, V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ Nm/As} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}$
Ladung	Q	Coulomb, C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$
Widerstand	R	Ohm, $\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}^2$
Kapazität	C	Farad, F	$1 \text{ F} = 1 \text{ As/V} = 1 \text{ s}^4\text{A}^2/\text{kg m}^2$

**Tabelle:** Größen und ihre Basiseinheiten

Fähigkeit, Ladungen zu speichern

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$
Spannung	U	Volt, V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ Nm/As} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}$
Ladung	Q	Coulomb, C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$
Widerstand	R	Ohm, $\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}^2$
Kapazität	C	Farad, F	$1 \text{ F} = 1 \text{ As/V} = 1 \text{ s}^4\text{A}^2/\text{kg m}^2$
Induktivität	L	Henry, H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2\text{A}^2$

Tabelle: Größen und ihre Basiseinheiten

Zentrale Eigenschaft einer elektrischen Spule

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$
Spannung	U	Volt, V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ Nm/As} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}$
Ladung	Q	Coulomb, C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$
Widerstand	R	Ohm, $\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}^2$
Kapazität	C	Farad, F	$1 \text{ F} = 1 \text{ As/V} = 1 \text{ s}^4\text{A}^2/\text{kg m}^2$
Induktivität	L	Henry, H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2\text{A}^2$
magn. Fluss	$\Phi$	Weber, Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2\text{A}$

**Tabelle:** Größen und ihre Basiseinheiten

Analoge Eigenschaft eines Magnetfeldes zum elektrischen Strom

Größe	Formel	Einheit	Basiseinheit
Kraft	F	Newton, N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$
Energie	E	Joule, J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt, W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$
Spannung	U	Volt, V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ Nm/As} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}$
Ladung	Q	Coulomb, C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$
Widerstand	R	Ohm, $\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3\text{A}^2$
Kapazität	C	Farad, F	$1 \text{ F} = 1 \text{ As/V} = 1 \text{ s}^4\text{A}^2/\text{kg m}^2$
Induktivität	L	Henry, H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2\text{A}^2$
magn. Fluss	$\Phi$	Weber, Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2\text{A}$
Flussdichte	B	Tesla, T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ kg/s}^2\text{A}$

**Tabelle:** Größen und ihre Basiseinheiten

Gibt Stärke des magnetischen Flusses an, z.B. im MRT

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M
Nano, n	$10^{-9}$	$10^9$	Giga, G

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M
Nano, n	$10^{-9}$	$10^9$	Giga, G
Piko, p	$10^{-12}$	$10^{12}$	Tera, T

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M
Nano, n	$10^{-9}$	$10^9$	Giga, G
Piko, p	$10^{-12}$	$10^{12}$	Tera, T
Femto, f	$10^{-15}$	$10^{15}$	Peta, P

<b>Bezeichnung</b>	<b>Potenz</b>	<b>Potenz</b>	<b>Bezeichnung</b>
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M
Nano, n	$10^{-9}$	$10^9$	Giga, G
Piko, p	$10^{-12}$	$10^{12}$	Tera, T
Femto, f	$10^{-15}$	$10^{15}$	Peta, P
Atto, a	$10^{-18}$	$10^{18}$	Exa, E

Bezeichnung	Potenz	Potenz	Bezeichnung
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M
Nano, n	$10^{-9}$	$10^9$	Giga, G
Piko, p	$10^{-12}$	$10^{12}$	Tera, T
Femto, f	$10^{-15}$	$10^{15}$	Peta, P
Atto, a	$10^{-18}$	$10^{18}$	Exa, E

$$1 \text{ m} = 100 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

Bezeichnung	Potenz	Potenz	Bezeichnung
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M
Nano, n	$10^{-9}$	$10^9$	Giga, G
Piko, p	$10^{-12}$	$10^{12}$	Tera, T
Femto, f	$10^{-15}$	$10^{15}$	Peta, P
Atto, a	$10^{-18}$	$10^{18}$	Exa, E

$$1 \text{ m} = 100 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$1 \text{ m}^2 = 100^2 \cdot (10^{-2} \text{ m})^2 = 10.000 \text{ cm}^2$$

Bezeichnung	Potenz	Potenz	Bezeichnung
Dezi, d	$10^{-1}$	$10^1$	Deka, da
Zenti, c	$10^{-2}$	$10^2$	Hekto, h
Milli, m	$10^{-3}$	$10^3$	Kilo, k
Mikro, $\mu$	$10^{-6}$	$10^6$	Mega, M
Nano, n	$10^{-9}$	$10^9$	Giga, G
Piko, p	$10^{-12}$	$10^{12}$	Tera, T
Femto, f	$10^{-15}$	$10^{15}$	Peta, P
Atto, a	$10^{-18}$	$10^{18}$	Exa, E

$$1 \text{ m} = 100 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$1 \text{ m}^2 = 100^2 \cdot (10^{-2} \text{ m})^2 = 10.000 \text{ cm}^2$$

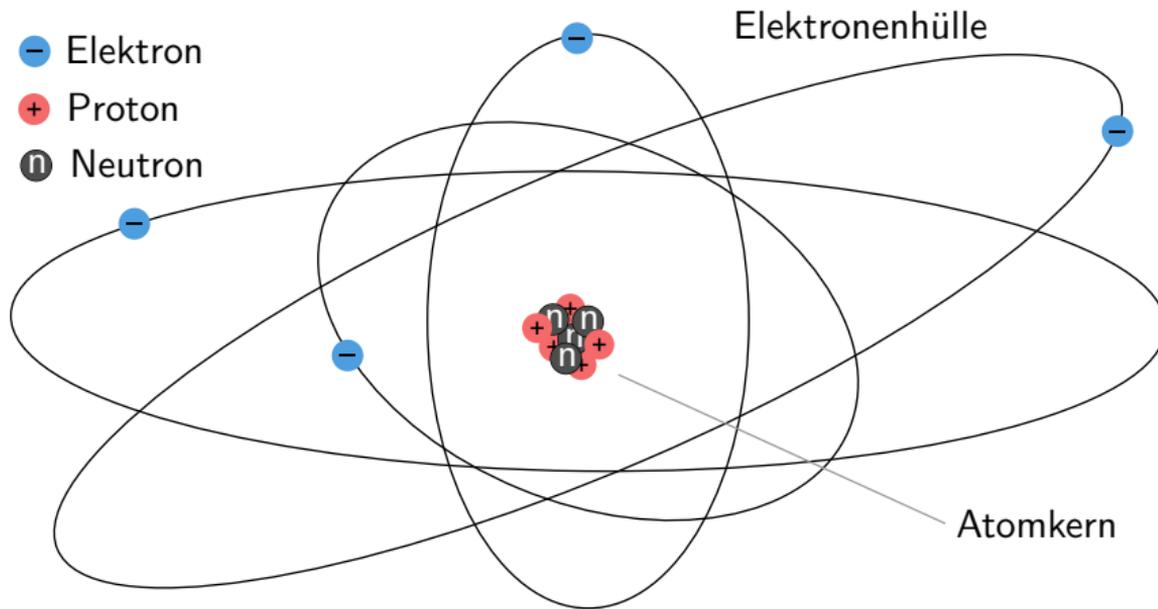
$$1 \text{ m}^3 = 100^3 \cdot (10^{-2} \text{ m})^3 = 1.000.000 \text{ cm}^3$$

## Lernziele: Die Elektrische Ladung

Die Studierenden können

- ▶ die Eigenschaften elektrischer Ladungen sowie im Zusammenhang stehende physikalische Phänomene beschreiben
- ▶ elektrische Felder beschreiben und für einfache Ladungsanordnungen berechnen
- ▶ mit dem Coulomb'schen Gesetz Kräfte auf Ladungen berechnen

# Atomaufbau - Das Bohr'sche Atommodell



Kleinste Ladungseinheit ist die  
Elementarladung:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C (Naturkonstante!)}$$

**Merke:**

$$Q = \pm n \cdot e$$

mit  $n = 1, 2, 3, \dots$

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

Kleinste Ladungseinheit ist die  
Elementarladung:

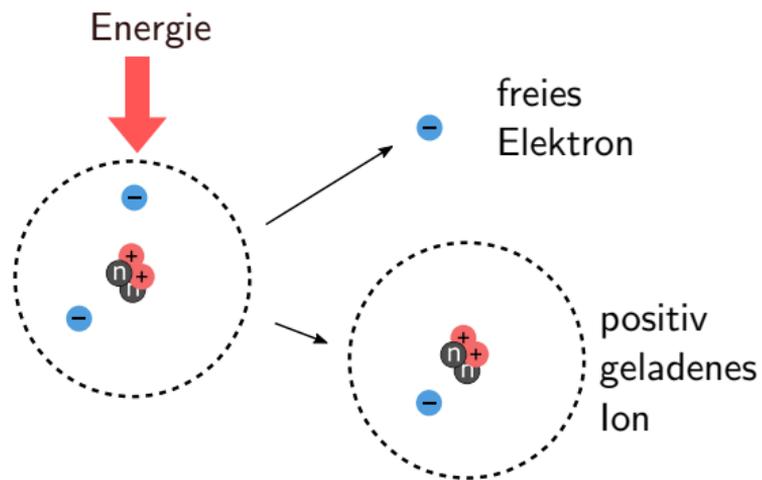
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C (Naturkonstante!)}$$

**Merke:**

$$Q = \pm n \cdot e$$

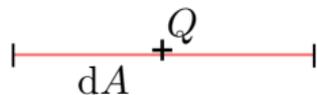
mit  $n = 1, 2, 3, \dots$

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



Freie Elektronen als kleinste, leichteste und  
beweglichste Ladungsträger bedeutsam!

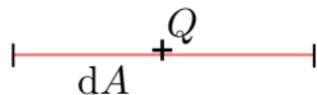
## Linienladung



$$\lambda = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta l} = \frac{dQ}{dl}$$

$$Q = \int_l \lambda dl$$

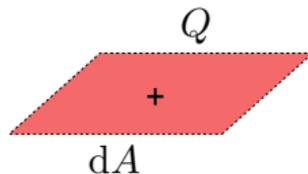
## Linienladung



$$\lambda = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta l} = \frac{dQ}{dl}$$

$$Q = \int_l \lambda dl$$

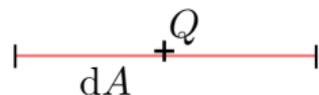
## Flächenladung



$$\sigma = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{dQ}{dA}$$

$$Q = \iint_A \sigma dA$$

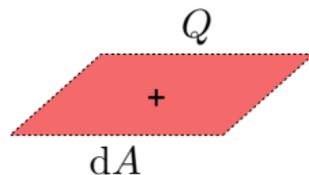
## Linienladung



$$\lambda = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta l} = \frac{dQ}{dl}$$

$$Q = \int_l \lambda dl$$

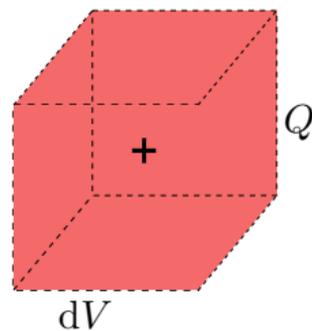
## Flächenladung



$$\sigma = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{dQ}{dA}$$

$$Q = \iint_A \sigma dA$$

## Raumladung

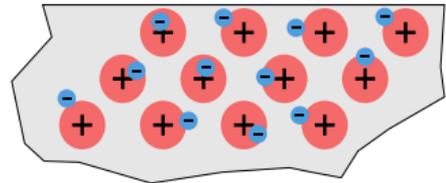


$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{dQ}{dV}$$

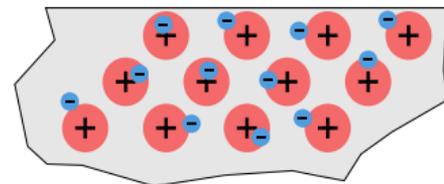
$$Q = \iiint_V \rho dV$$

Atomanordnung in **Gitterstruktur**,  
äußere Elektronen nahezu frei beweglich  
→ verleiht elektrisch leitende Eigenschaften

Summe Elektronen  $\hat{=}$  Summe Protonen  
→ elektrisch neutral

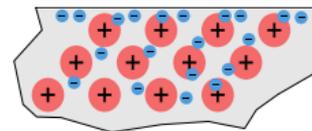


Atomanordnung in **Gitterstruktur**,  
äußere Elektronen nahezu frei beweglich  
→ verleiht elektrisch leitende Eigenschaften

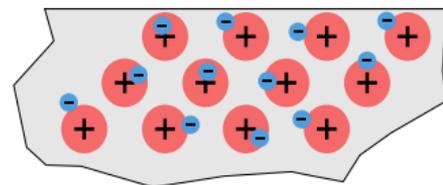


Summe Elektronen  $\hat{=}$  Summe Protonen  
→ elektrisch neutral

Hinzuführen von Elektronen  
→ negativ geladen

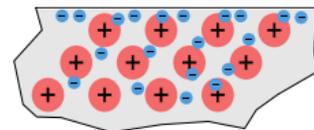


Atomanordnung in **Gitterstruktur**,  
äußere Elektronen nahezu frei beweglich  
→ verleiht elektrisch leitende Eigenschaften

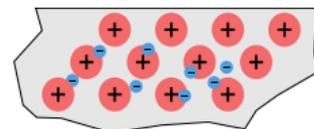


Summe Elektronen  $\hat{=}$  Summe Protonen  
→ elektrisch neutral

Hinzuführen von Elektronen  
→ negativ geladen



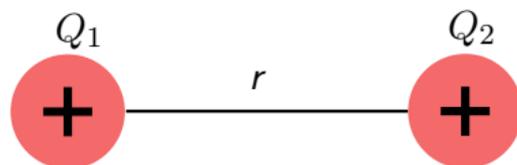
Entziehen von Elektronen  
→ positiv geladen



Ladungen üben Kräfte aufeinander aus.

Gleichnamige Ladung → abstoßend

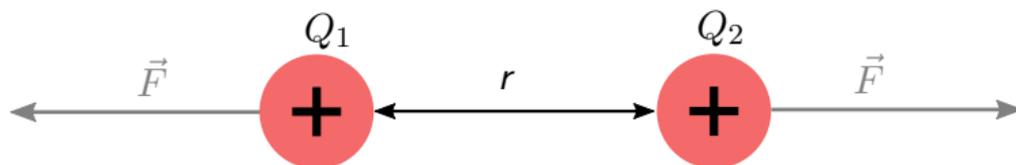
Ungleichnamige Ladung → anziehend



Ladungen üben Kräfte aufeinander aus.

Gleichnamige Ladung → abstoßend

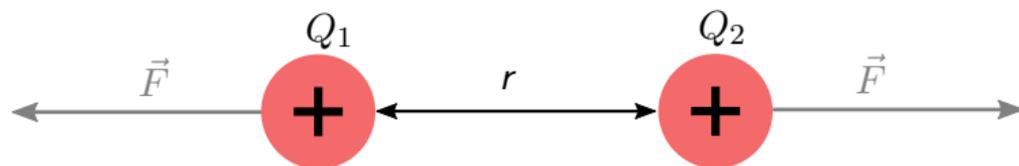
Ungleichnamige Ladung → anziehend



Ladungen üben Kräfte aufeinander aus.

Gleichnamige Ladung → abstoßend

Ungleichnamige Ladung → anziehend

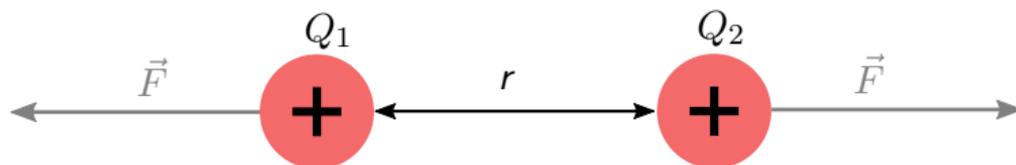


$$F \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \rightarrow F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Ladungen üben Kräfte aufeinander aus.

Gleichnamige Ladung → abstoßend

Ungleichnamige Ladung → anziehend



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

$\epsilon_0$ : **elektrische Feldkonstante (Dielektrizitätskonstante)**

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

## Lernziele: Das elektrische Feld

Die Studierenden

- ▶ entwickeln ein "Gefühl" für elektrische Felder
- ▶ elektrische Felder beschreiben und für einfache Ladungsanordnungen berechnen
- ▶ das Verhalten elektrischer Felder an Leitern charakterisieren

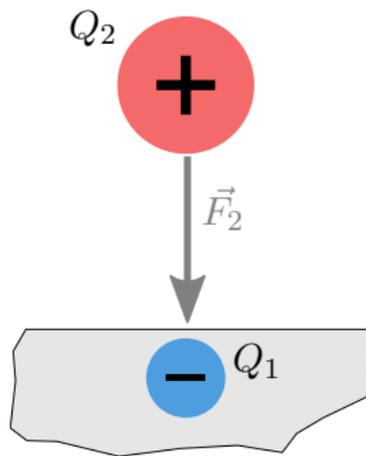
# Charakterisierung des elektrischen Feldes

Elektrisches Feld  $\vec{E}$  definiert durch:

**Größe** (in Newton)

**Richtung**

einer **Kraft**  $\vec{F}_E$  auf pos. Probeladung



# Charakterisierung des elektrischen Feldes

Elektrisches Feld  $\vec{E}$  definiert durch:

**Größe** (in Newton)

**Richtung**

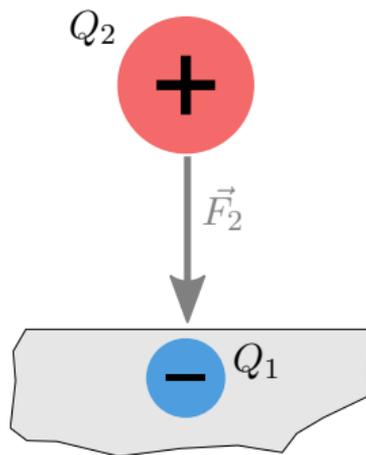
einer **Kraft**  $\vec{F}_E$  auf pos. Probeladung

Charakterisiert durch **Feldlinien**

→ Vektorfeld

**Nachteil:**

Feldstärke **unabhängig** von Probeladung



# Charakterisierung des elektrischen Feldes

Elektrisches Feld  $\vec{E}$  definiert durch:

**Größe** (in Newton)

**Richtung**

einer **Kraft**  $\vec{F}_E$  auf pos. Probeladung

Charakterisiert durch **Feldlinien**

→ Vektorfeld

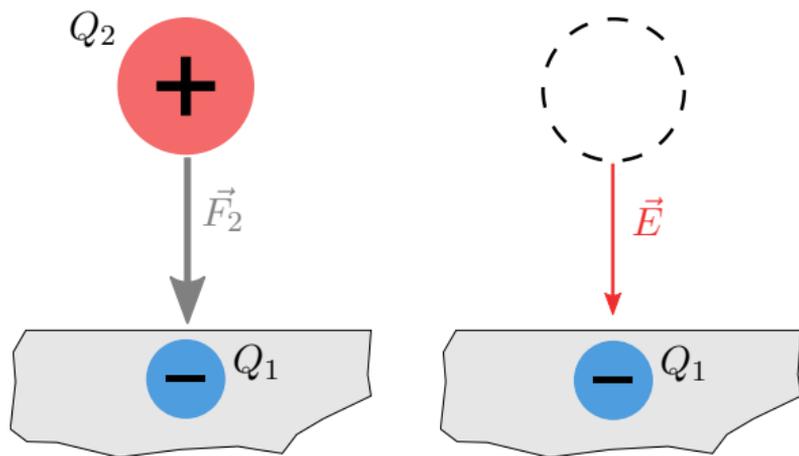
**Nachteil:**

Feldstärke **unabhängig** von Probeladung

**Merke:**

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_2}{Q_2}$$

$$[E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$$



# Charakterisierung des elektrischen Feldes

Elektrisches Feld  $\vec{E}$  definiert durch:

**Größe** (in Newton)

**Richtung**

einer **Kraft**  $\vec{F}_E$  auf pos. Probeladung

Charakterisiert durch **Feldlinien**

→ Vektorfeld

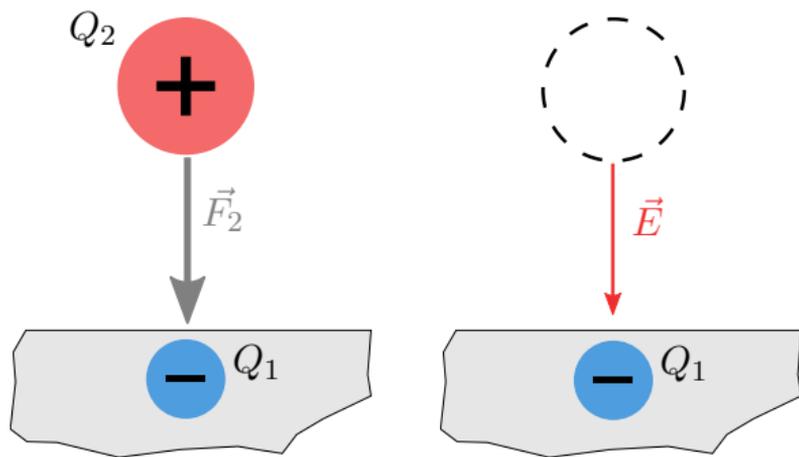
**Nachteil:**

Feldstärke **unabhängig** von Probeladung

**Merke:**

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_2}{Q_2}$$

$$[E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$$



$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_2}{Q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{1}{Q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1}{r^2}$$

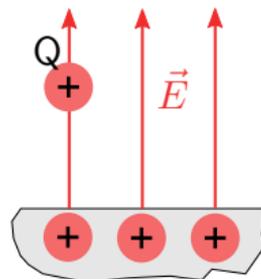
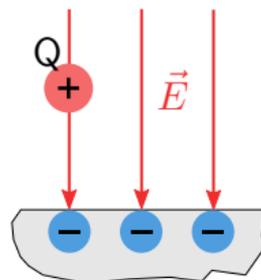
**Feldlinien** beginnen und enden immer auf Ladungen  
(oft Leiteroberflächen).

Elektronenüberschuss:

- Pos. Probeladung wird angezogen
- Feldlinien zeigen zum Leiter

Elektronenmangel:

- Pos. Probeladung wird abgestoßen
- Feldlinien zeigen vom Leiter weg



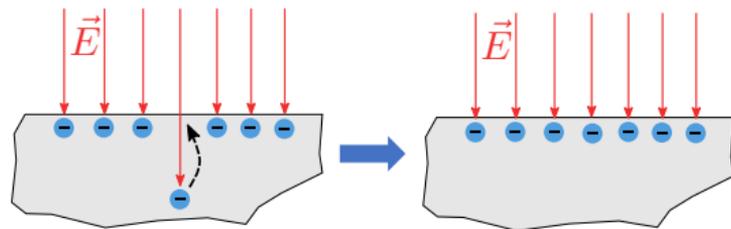
## Merke:

In Leitern verschwindet das  
elektrostatische Feld

Bewegliche Ladungsträger:

→ Leiteroberfläche

→ Elektrostatisches Feld wird kompensiert

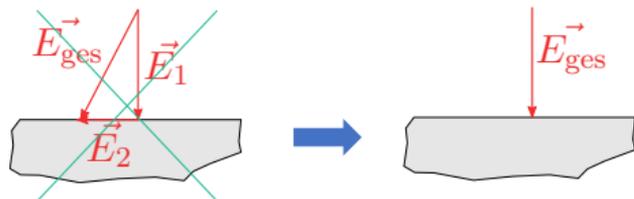
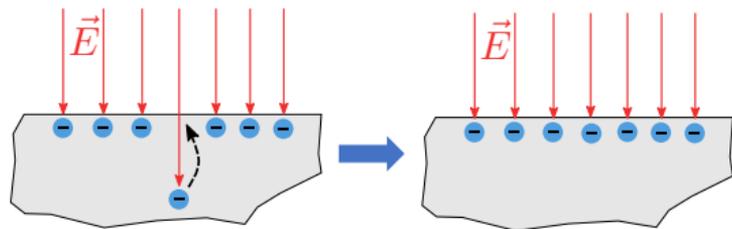


Bewegliche Ladungsträger:

- Leiteroberfläche
- Elektrostatisches Feld wird kompensiert

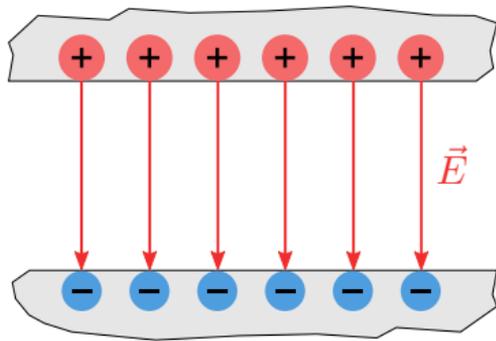
Vektorielle Zerlegung von  $\vec{E}$

- Horizontale Komponente eliminiert

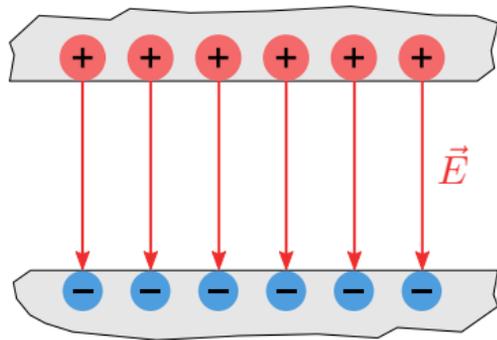


**Merke:**

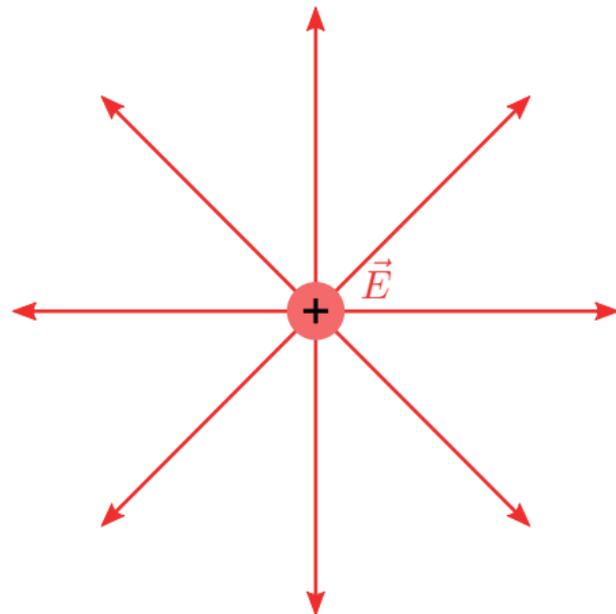
Elektrische Feldlinien stehen senkrecht auf Leitern



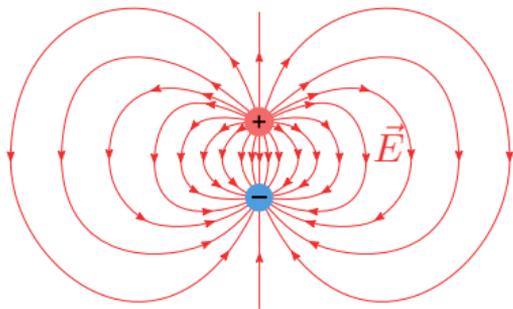
Elektrisches Homogenfeld zwischen zwei  
Leiterplatten



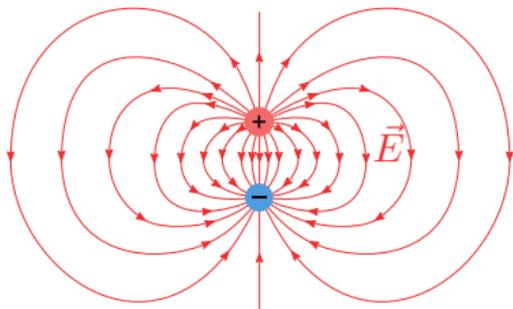
Elektrisches Homogenfeld zwischen zwei  
Leiterplatten



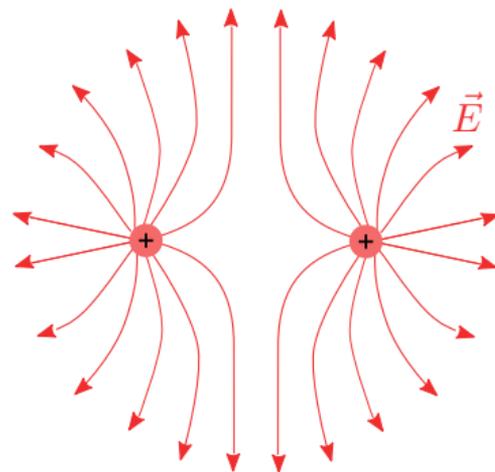
Radialfeld einer positiven Punktladung



Elektrisches Feld sich anziehender  
Punktladungen



Elektrisches Feld sich anziehender Punktladungen



Elektrisches Feld sich abstoßender Punktladungen

## Lernziele: Das elektrische Potential

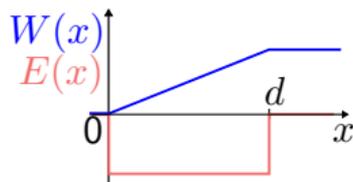
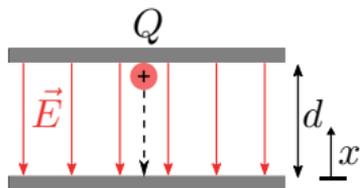
Die Studierenden können

- ▶ Verschiebearbeit von Ladungen im elektrischen Feld berechnen
- ▶ Äquipotentialflächen bestimmen und einzeichnen
- ▶ elektrische Spannungen aus gegebenen Feldgrößen bestimmen

**Arbeit** zur Bewegung von Ladungen im E-Feld erforderlich

Arbeit  $W \hat{=} \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$   
 $[W] = \text{J (Joule)}$

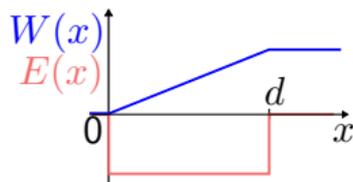
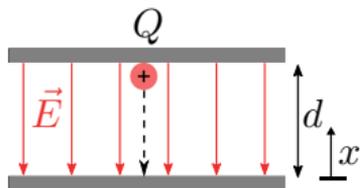
Vorzeichen betrachterabhängig, hier aus Erzeugersicht:  
Negative Arbeit  $\rightarrow$  Erhöhung potentieller Energie im System



**Arbeit** zur Bewegung von Ladungen im E-Feld erforderlich

Arbeit  $W \hat{=} \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$   
 $[W] = \text{J (Joule)}$

Vorzeichen betrachterabhängig, hier aus Erzeugersicht:  
Negative Arbeit  $\rightarrow$  Erhöhung potentieller Energie im System



$$W = \int_d^0 \vec{F} d\vec{x} = Q \int_d^0 \vec{E} \cdot d\vec{x}$$

$$\text{mit } \vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

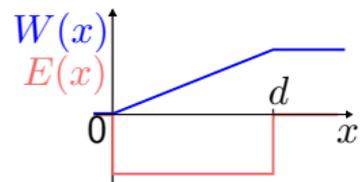
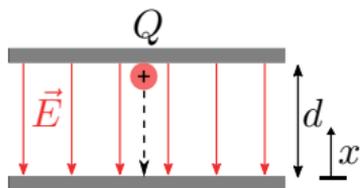
$$W = -Q \cdot E \int_d^0 dx = -Q \cdot E [x]_d^0$$

$$W = -Q \cdot E(0 - d) = Q \cdot E \cdot d$$

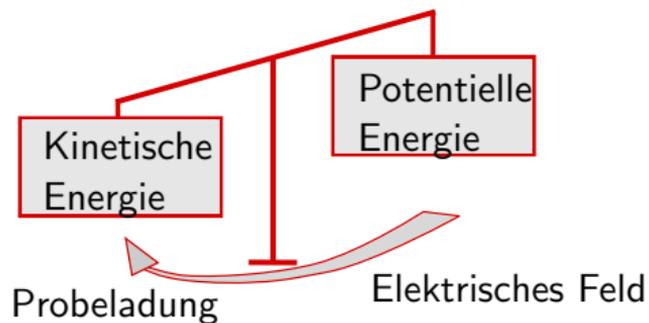
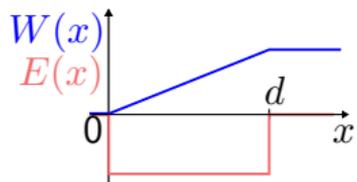
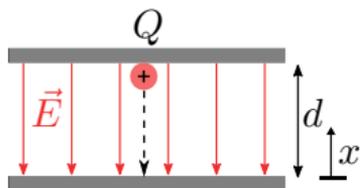
**Merke:**

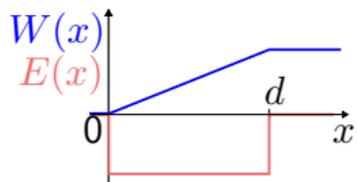
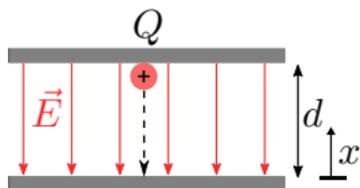
$$\Delta W = Q \cdot E \cdot \Delta x$$

# Arbeit im elektrischen Feld II

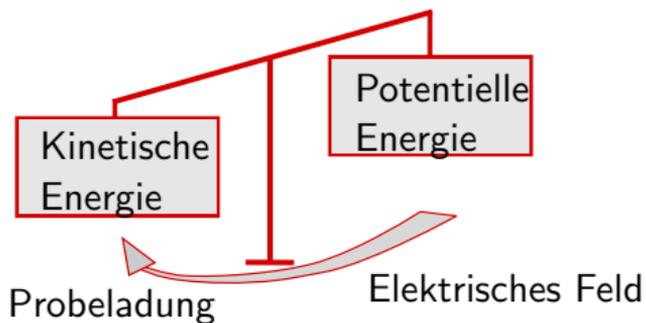


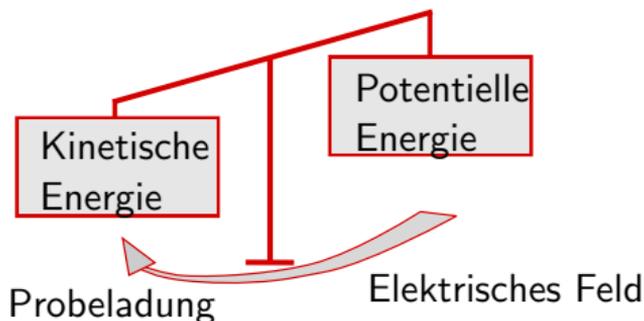
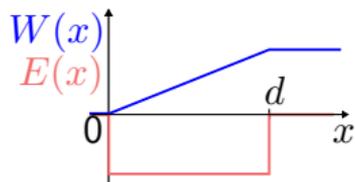
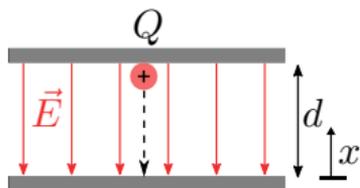
# Arbeit im elektrischen Feld II





$$W(x) = Q \cdot E \cdot x + W_0$$





$$W(x) = Q \cdot E \cdot x + W_0$$

Problem: Abhängigkeit von Probeladung  $Q$

→ **Normierung** von  $W(x)$  auf  $Q$  als Arbeitspotential

$$\frac{W(x)}{Q} = E \cdot x + \frac{W_0}{Q}$$

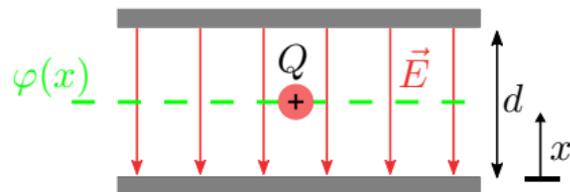
# Definition des elektrischen Potentials

Normierung der potentiellen Energie:

$$\text{Potential } \varphi = \frac{W}{Q}$$

$$[\varphi] = \text{Volt} = \text{V}$$

Im elektrischen Homogenfeld:



$$\varphi(x) = E \cdot x + \varphi_0$$

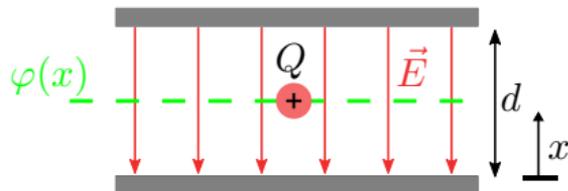
# Definition des elektrischen Potentials

Normierung der potentiellen Energie:

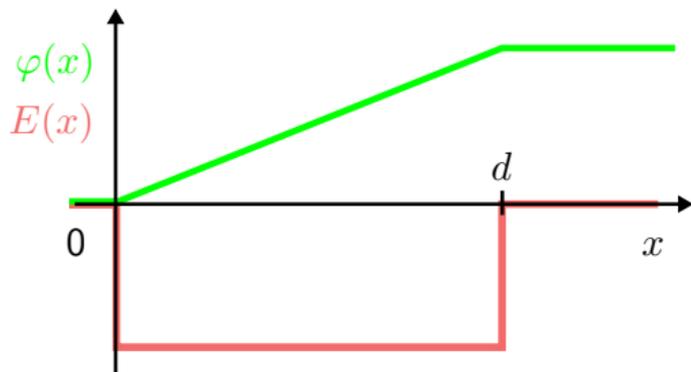
$$\text{Potential } \varphi = \frac{W}{Q}$$

$$[\varphi] = \text{Volt} = \text{V}$$

Im elektrischen Homogenfeld:



$$\varphi(x) = E \cdot x + \varphi_0$$



$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$$

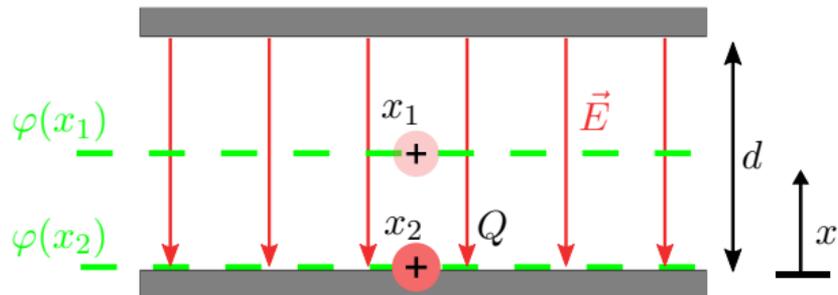
Bezugspunkt notwendig:

$$\varphi_0 = \varphi(x = 0) = 0$$

# Zusammenhang zwischen Arbeit und Potential

Potential nur abhängig von Ortskoordinate  $x$  in Feldrichtung.

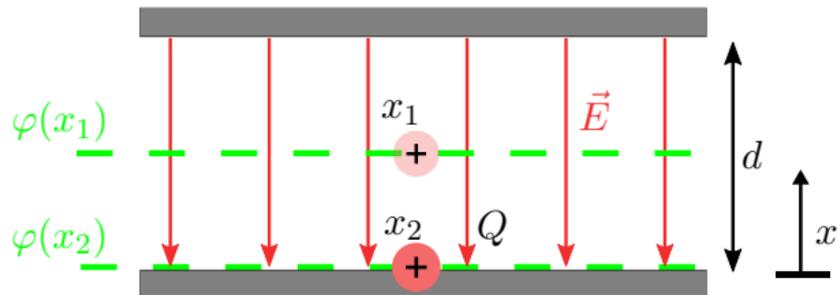
Flächen gleichen Potentials: →  
**Äquipotentialflächen**



# Zusammenhang zwischen Arbeit und Potential

Potential nur abhängig von Ortskoordinate  $x$  in Feldrichtung.

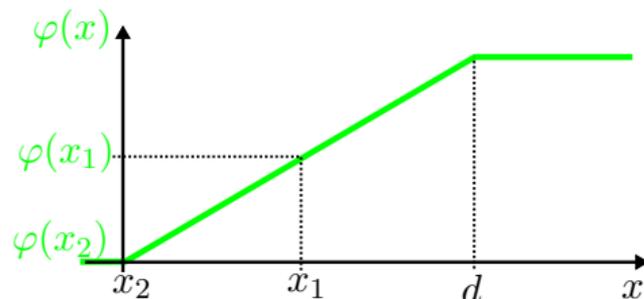
Flächen gleichen Potentials: →  
**Äquipotentialflächen**



$$W_{12} = Q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$$

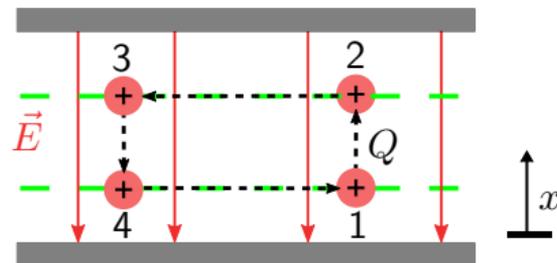
Mit Bezugspotential  $\varphi_2 = 0$ :

$$W_{12} = Q \cdot (\varphi_1 - 0) = Q \cdot \varphi_1$$



# Wirbelfreies Feld

Zunächst Betrachtung der Teilenergien bei einem geschlossenen Umlauf im Homogenfeld.





# Wirbelfreies Feld

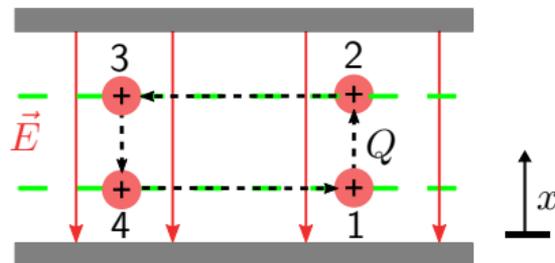
Zunächst Betrachtung der Teilenergien bei einem geschlossenen Umlauf im Homogenfeld.

Die gesamte Energie ergibt sich durch die Aufsummierung der Teilenergien:

$$W_{\text{ges}} = Q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + Q \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) \\ + Q \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) + Q \cdot (\varphi_4 - \varphi_1)$$

$$W_{\text{ges}} = Q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi_4 - \varphi_1)$$

$$W_{\text{ges}} = Q \cdot 0 = 0$$



# Wirbelfreies Feld

Zunächst Betrachtung der Teilenergien bei einem geschlossenen Umlauf im Homogenfeld.

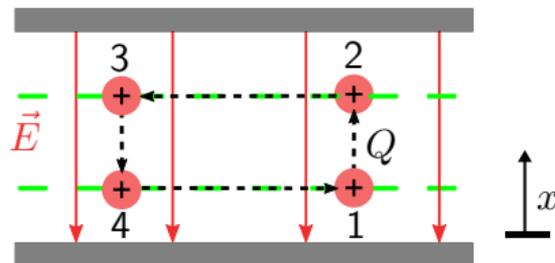
Die gesamte Energie ergibt sich durch die Aufsummierung der Teilenergien:

$$W_{\text{ges}} = Q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + Q \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) \\ + Q \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) + Q \cdot (\varphi_4 - \varphi_1)$$

$$W_{\text{ges}} = Q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi_4 - \varphi_1)$$

$$W_{\text{ges}} = Q \cdot 0 = 0$$

Energie im elektrischen Feld ist nur von Anfangs- und Endpunkt und nicht vom Weg abhängig. Es ist ein „wirbelfreies“ Feld.



Kennzeichen:

- ▶ keine geschlossenen Feldlinien
- ▶ Feldlinien beginnen und enden auf Ladungen

# Definition der elektrischen Spannung

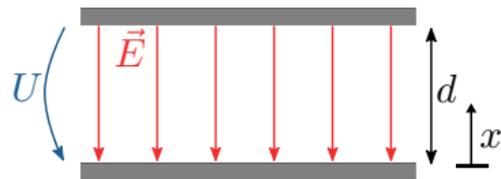
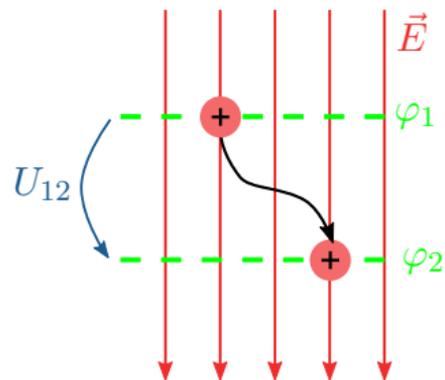
**Potentialdifferenz** bestimmt nutzbare Energie

→ **Spannung**  $U$ :

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$[U] = \text{Volt} = \text{V}$$

Indexreihenfolge: Start- und Zielpunkt



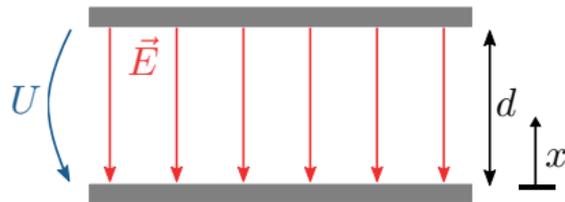
# Zusammenhang zwischen Spannung und Feldstärke I

Im **Homogenfeld**:

$$\varphi(x) = E \cdot x$$

$$U = \varphi(x = d) - \varphi(x = 0)$$

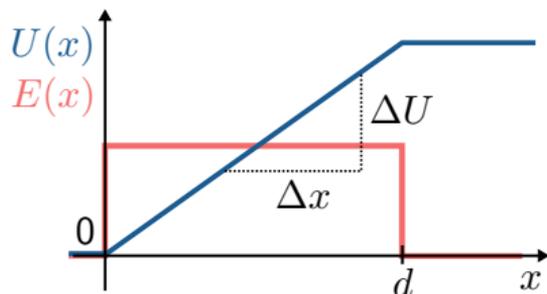
$$U = E \cdot d - E \cdot 0$$



**Merke:**

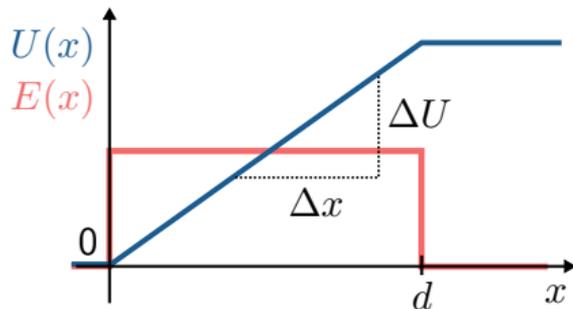
$$U = E \cdot d$$

$$E = \frac{U}{d}$$



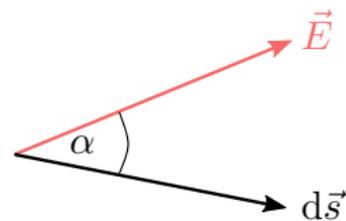
# Zusammenhang zwischen Spannung und Feldstärke II

Spannung  $\hat{=}$  aufintegrierter Feldstärke:



Allgemeines Feld:

Wiederholung Skalarprodukt:



$$\vec{E} \cdot d\vec{s} = E ds \cdot \cos(\alpha)$$

**Merke:**

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{s}$$

## Lernziele: Die Elektrische Stromstärke

Die Studierenden können

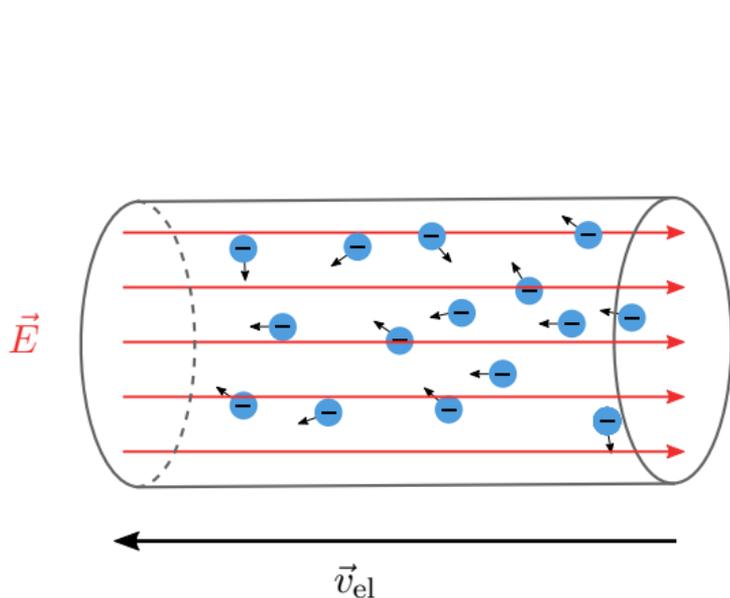
- ▶ die Begriffe der elektrischen Stromstärke und der elektrischen Stromdichte erläutern und anwenden
- ▶ die elektrische Stromstärke sowie die elektrische Stromdichte in einfachen Anordnungen berechnen
- ▶ die Driftgeschwindigkeit von Elektronen in einfachen Anordnungen bestimmen

# Das elektrische Strömungsfeld

Strömungsfeld: **gerichtete** Bewegung von Teilchen

Stationäres Strömungsfeld: **zeitlich konstanter** Teilchenstrom

Stationäres elektrisches Strömungsfeld: strömende Teilchen **elektrische Ladungsträger**



Elektrischer Strom: gerichtete Driftbewegung von Ladungsträgern

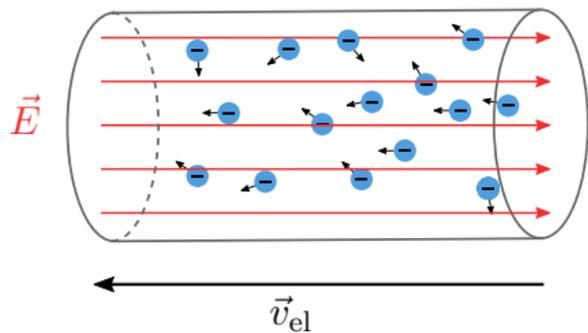
Feldstärkeabhängige Driftgeschwindigkeit  $\vec{v}_{\text{el}}$ :

$$\vec{v}_{\text{el}} = -b_{\text{el}} \cdot \vec{E}$$

mit:

$\vec{v}_{\text{el}}$  = Driftgeschwindigkeit der Elektronen in m/s

$b_{\text{el}}$  = Elektronenbeweglichkeit in  $\text{cm}^2/\text{Vs}$



Ladungsträgertransport innerhalb eines Leiters:

$$\Delta Q = e \cdot N_{\text{el}}$$

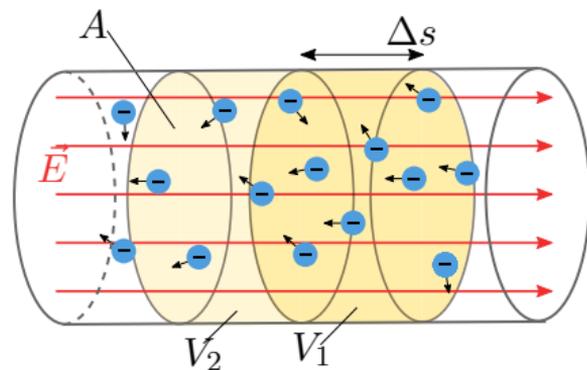
$$\Delta Q = e \cdot n_{\text{el}} \cdot V_1$$

$$\Delta Q = e \cdot n_{\text{el}} \cdot b_{\text{el}} \cdot E \cdot \Delta t \cdot A$$

mit:

$N_{\text{el}}$  = Anzahl Ladungsträger in betrachtetem Volumen

$n_{\text{el}}$  = Ladungsträgerdichte in  $1/\text{m}^3$



# Definition der elektrischen Stromstärke

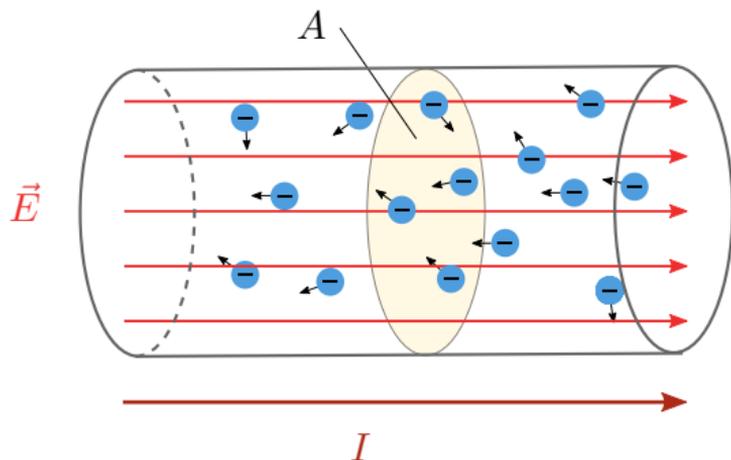
Stromstärke  $I$  : Ladungsmenge  $\Delta Q$  in  $\Delta t$   
durch Leiter

**Merke:**

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$$[I] = \text{Ampere} = \text{A}$$

$$I = e \cdot n_{\text{el}} \cdot b_{\text{el}} \cdot E \cdot A$$



# Definition der elektrischen Stromdichte

Stromstärke  $J$  : Stromstärke  $\Delta I$  pro  
Leiterquerschnitt  $\Delta A$

**Merke:**

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta A}$$

$$[J] = \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

$$J_1 \cdot A_1 = J_2 \cdot A_2 = I$$

