

Energie

Durch Zufuhr oder Abgabe von Arbeit wird die Energie eines Körpers oder die Gesamtenergie eines Systems materieller Punkte erhöht oder erniedrigt.

Die Energie wird in der gleichen Maßeinheit 1 J angegeben wie die Arbeit, durch die sie verändert wird. Es gilt also der *Energiesatz der Mechanik*:

$$\Delta E = E_{\text{nachher}} - E_{\text{vorher}} = \Delta W . \quad (2.75)$$

Die Energieanteile eines Körpers werden durch die Arbeit, die sie erzeugt haben, beschrieben und ergeben wie diese additiv die Gesamtenergie. Die mechanische Energie eines Körpers ist

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} . \quad (2.76)$$

kinetische

Energie

Sie setzt sich zusammen aus der durch die Beschleunigungsarbeit W_B erzeugten kinetischen Energie

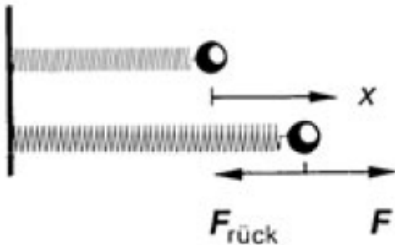
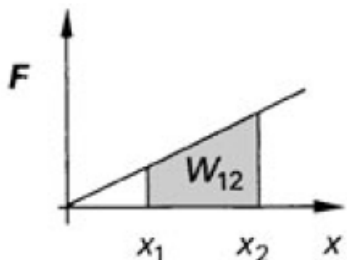
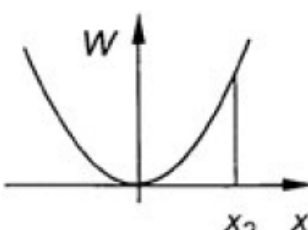
$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.77)$$

potentielle

Energie

von der Verformungsarbeit W_V herrührende elastische Energie

$$E_{\text{elast}} = \frac{1}{2} k s^2 \quad (2.78)$$

	System	Kraftgesetz	Arbeit
Verformungs- arbeit	Feder-Masse-System 	$F_{\text{rück}} = -k x$ 	$W_{12} = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2)$ normiert: $W = 0$ für $x_1 = 0$ 

durch die Hubarbeit W_H erzeugte Lageenergie

$$E_{\text{Lage}} = mgh . \quad (2.79)$$

Die Energieanteile hängen betragsmäßig davon ab, wo das Bezugsniveau $h = 0$ und der Ausgangszustand $s = 0$ liegen und auf welches Koordinatensystem die Geschwindigkeit v bezogen ist.

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} . \quad (2.76)$$

Energieerhaltung

„Energieumwandlung“

Die als Energie gespeicherte Arbeit muss nicht in der Arbeitsform abgegeben werden, in der sie aufgenommen wurde. Diese Abgabe ist auch in anderen Arbeitsformen möglich. Beim Bogenschießen wird beispielsweise die elastische Energie in Beschleunigungsarbeit des Pfeils und eventuell beim Schuss bergauf in Hubarbeit umgewandelt.

Erhaltung der Energie:

In einem abgeschlossenen System bleibt der Energieinhalt konstant. Energie kann weder vernichtet werden noch aus nichts entstehen; sie kann sich in verschiedene Formen umwandeln oder zwischen verschiedenen Teilen des Systems ausgetauscht werden.

Es gibt kein *Perpetuum mobile erster Art*; d. h., es ist unmöglich, eine Maschine zu bauen, die dauernd Arbeit verrichtet, ohne dass ihr von außen ein entsprechender Energiebetrag zugeführt wird (Abschn. 3.3.2).

3.3.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Der Energieerhaltungssatz ist nicht beweisbar; er fasst die jahrhundertelangen Erfahrungen mit Energieumwandlungsexperimenten zusammen. In seiner allgemeinen Form beinhaltet er außer den mechanischen Energieformen der kinetischen und der potentiellen Energie auch thermische Energien, chemische Energien, elektrische und magnetische Feldenergien.

Bleiben in Systemen die nichtmechanischen Energien der Körper konstant, ist also in idealisierten mechanischen Systemen die Reibungsarbeit vernachlässigbar, dann gilt für die kinetische Energie und die potentielle Energie des Systems materieller Punkte der *Energieerhaltungssatz der Mechanik*

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{konstant} . \quad (2.80)$$

Elektrizität und Magnetismus

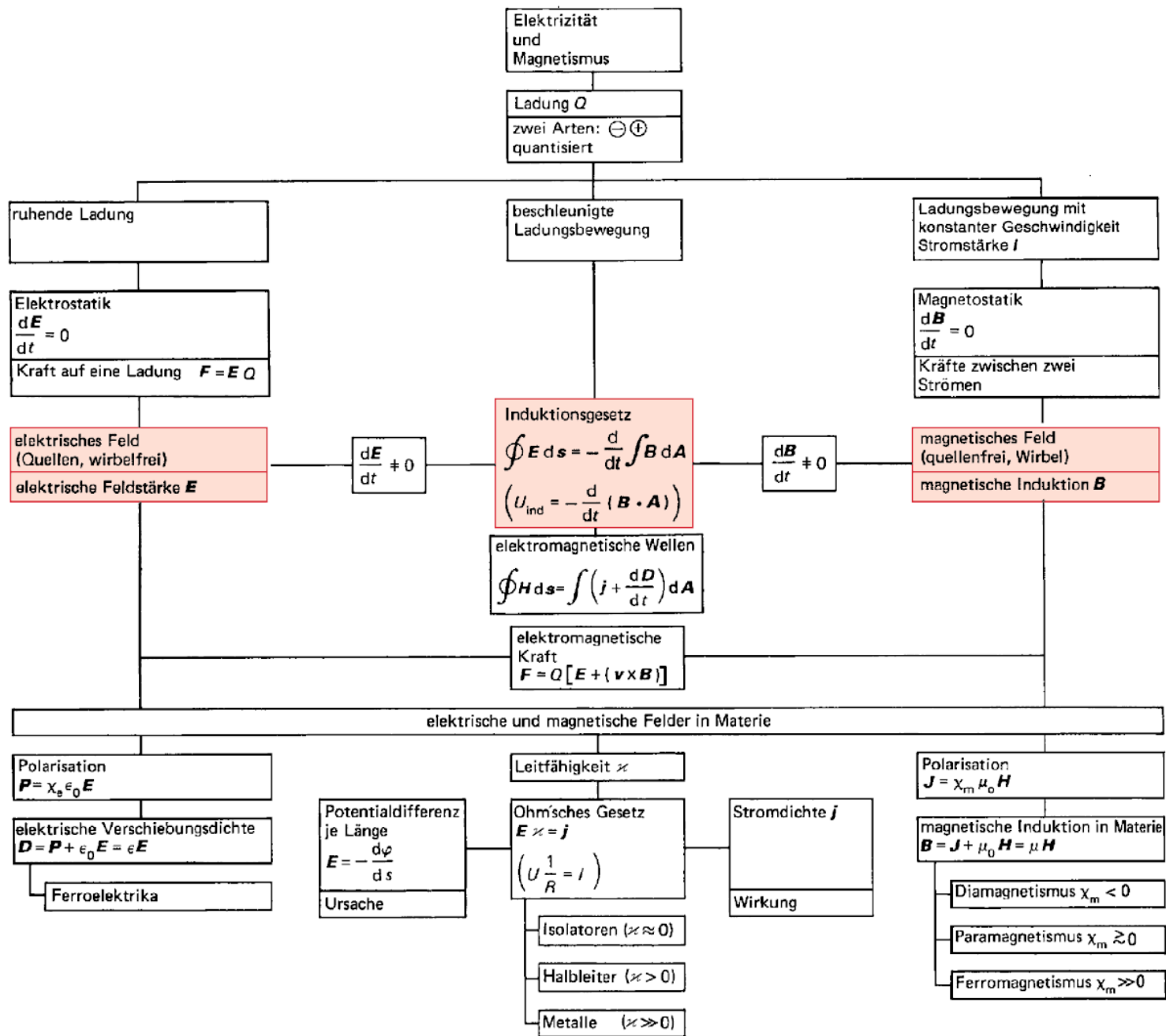


Abb. 4.1 Strukturbild Elektrizität und Magnetismus

Ladung

- Es gibt nur zwei Sorten von Ladungen: *positive und negative*. Sie dienen zur Erklärung der Abstoßung und Anziehung von Ladungen sowie der Ladungsneutralität.
- Die Ladung ist *quantisiert*, d. h., es gibt eine kleinste elektrische Ladungsmenge, die *Elementarladung* e . Sie ist eine Naturkonstante und hat den Wert

$$e = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ C} . \quad (4.1)$$

Diese Elementarladung tragen z. B. die Elementarteilchen *Proton* (positive Ladung) und *Elektron* (negative Ladung). Jede elektrische Ladung ist damit ein Vielfaches der elektrischen Elementarladung. So entspricht die Ladungseinheit von 1 C etwa der Ladung von $6,24 \cdot 10^{18}$ Elektronen. Die Messung der Elementarladung glückte erstmalig R. A. MILLIKAN im Jahr 1910

- Die Ladung ist an Materie gebunden, sie ist
 - wie bereits ausgeführt - eine *diskrete Eigenschaft der Materie*. Elementarladungen tragen beispielsweise folgende Elementarteilchen (Abschn. 8.9):
 - + e : Proton
 - e : Elektron
 - 0: Neutron
- Für die Ladung gilt der *Erhaltungssatz*: In einem abgeschlossenen System bleibt die *Nettoladung* (Menge aller positiver abzüglich Menge aller negativer Ladungen) *erhalten*.
- Im makroskopischen Bereich bedeutet negative Ladung Elektronenüberschuss und positive Ladung Elektronenmangel. Die Ladung wird durch Elektronen bzw. Ionen transportiert (Abschn. 4.2).

Elektrische Ladungen üben Kräfte aufeinander aus. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab und ungleichnamige Ladungen ziehen sich an. Für die anziehende oder abstoßende Kraft, die eine Punktladung Q_1 auf eine im Abstand r_{12} sich befindende Punktladung Q_2 ausübt, gilt das *Coulomb'sche Gesetz* (benannt nach dem französischen Physiker C. A. COULOMB, 1736 bis 1806):

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}. \quad (4.2)$$

$\left(\frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \right)$: Einheitsvektor von Q_1 nach Q_2

Diese Kraft weist dabei in Richtung der Verbindungslinie beider Ladungen. Die Maßstabskonstante ϵ_0 ist die *elektrische Feldkonstante* bzw. die *Dielektrizitätskonstante* des Vakuums:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2} . \quad (4.3)$$

Mit ihr errechnet sich der Proportionalitätsfaktor des Coulomb'schen Gesetzes:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,988 \cdot 10^9 \frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2} . \quad (4.4)$$

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} \frac{r_{12}}{r_{12}} . \quad (4.2)$$

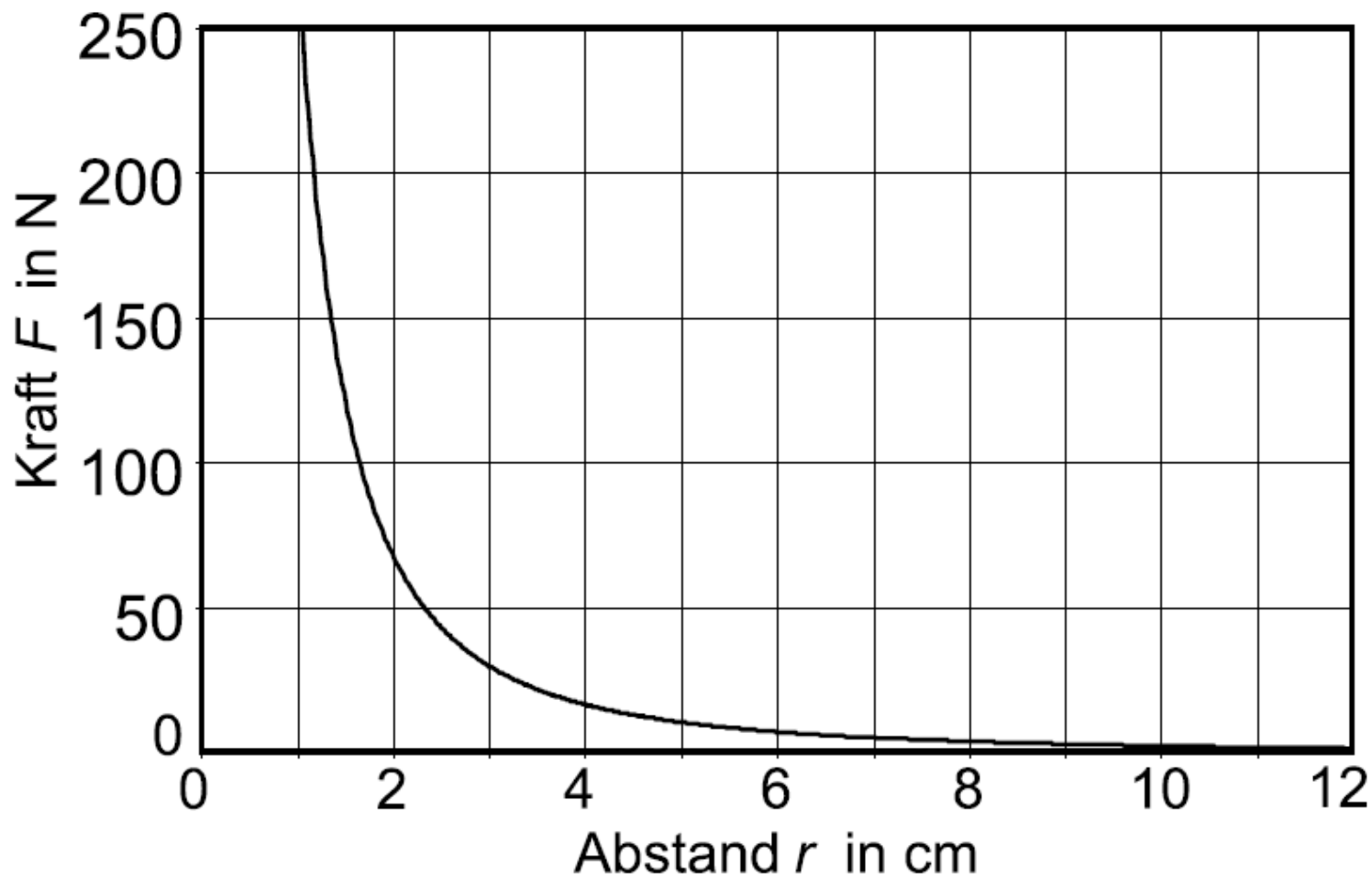


Abb. 4.2 Coulomb'sche Anziehungskraft zwischen zwei Ladungen mit $Q_1 = -10^{-6}$ C und $Q_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ C

- Im Leiter werden die beweglichen Elektronen relativ zu den Atomrümpfen verschoben und dadurch positive und negative Ladungsträger getrennt (*Influenz*).
- Im Nichtleiter werden die Ladungsträger nur geringfügig verschoben (*Polarisation*).

Influenz

4.3.6.1 Elektrische Influenz, elektrische Verschiebungsdichte und elektrische Feldstärke

In einem Leiter sind die Ladungsträger (im Allgemeinen Elektronen) frei beweglich. Das Leiterinnere ist deshalb immer feldfrei; zusätzlich aufgebraute Ladungen sitzen stets an der Oberfläche. Sie haben alle das gleiche Potenzial.

Die *Flächenladungsdichte* σ ist ein Maß dafür, wie viel Teilladung ΔQ sich auf einer Teilfläche ΔA befindet:

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta A} . \quad (4.128)$$

Die Maßeinheit ist $[\sigma] = 1 \text{ C/m}^2 = 1 \text{ As/m}^2$. Anhand der Messung der influenzierten Ladung ist eine Beschreibung und Berechnung des elektrischen Feldes möglich.

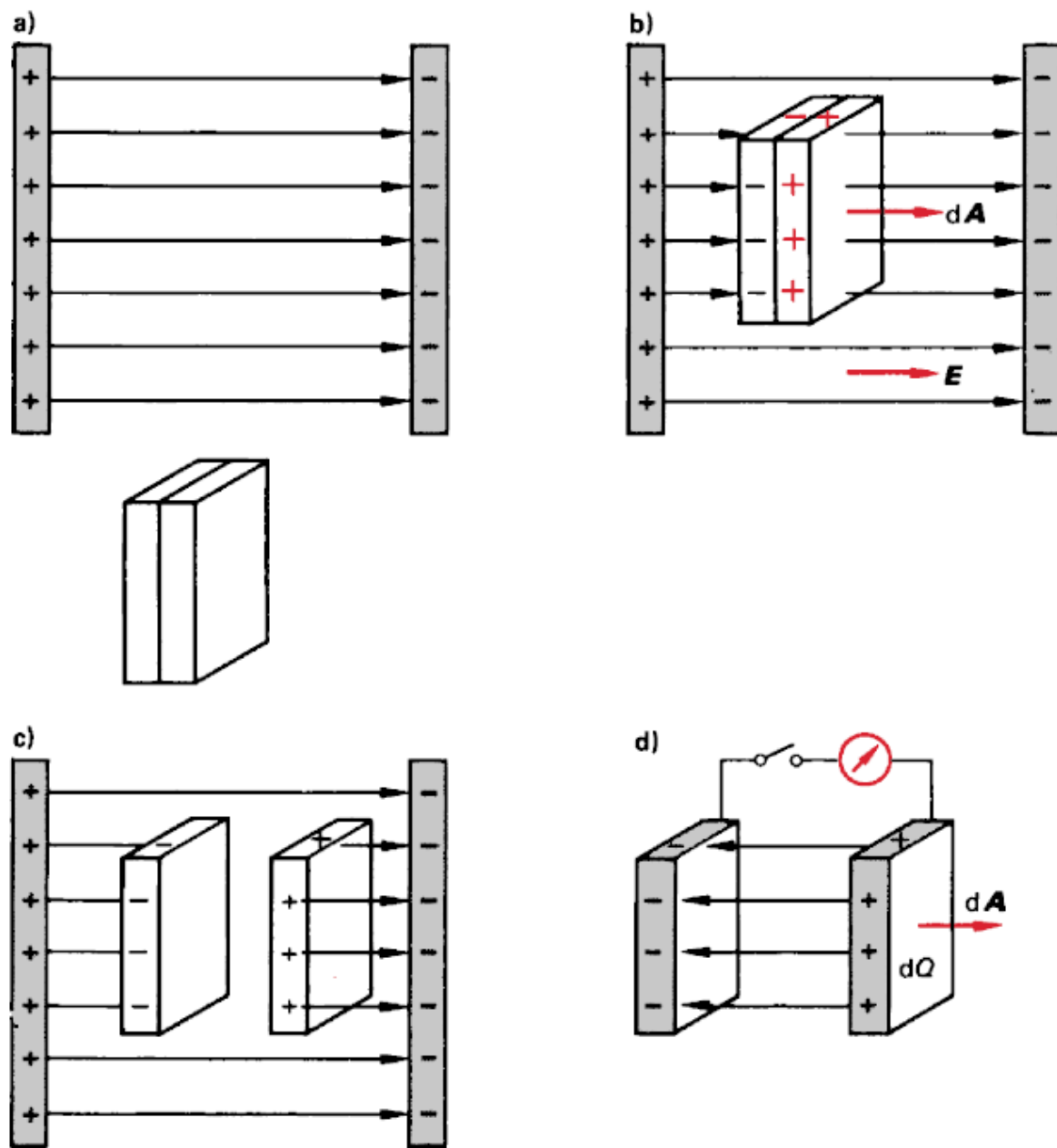


Abb. 4.64 Influenzplatten im homogenen elektrischen Feld

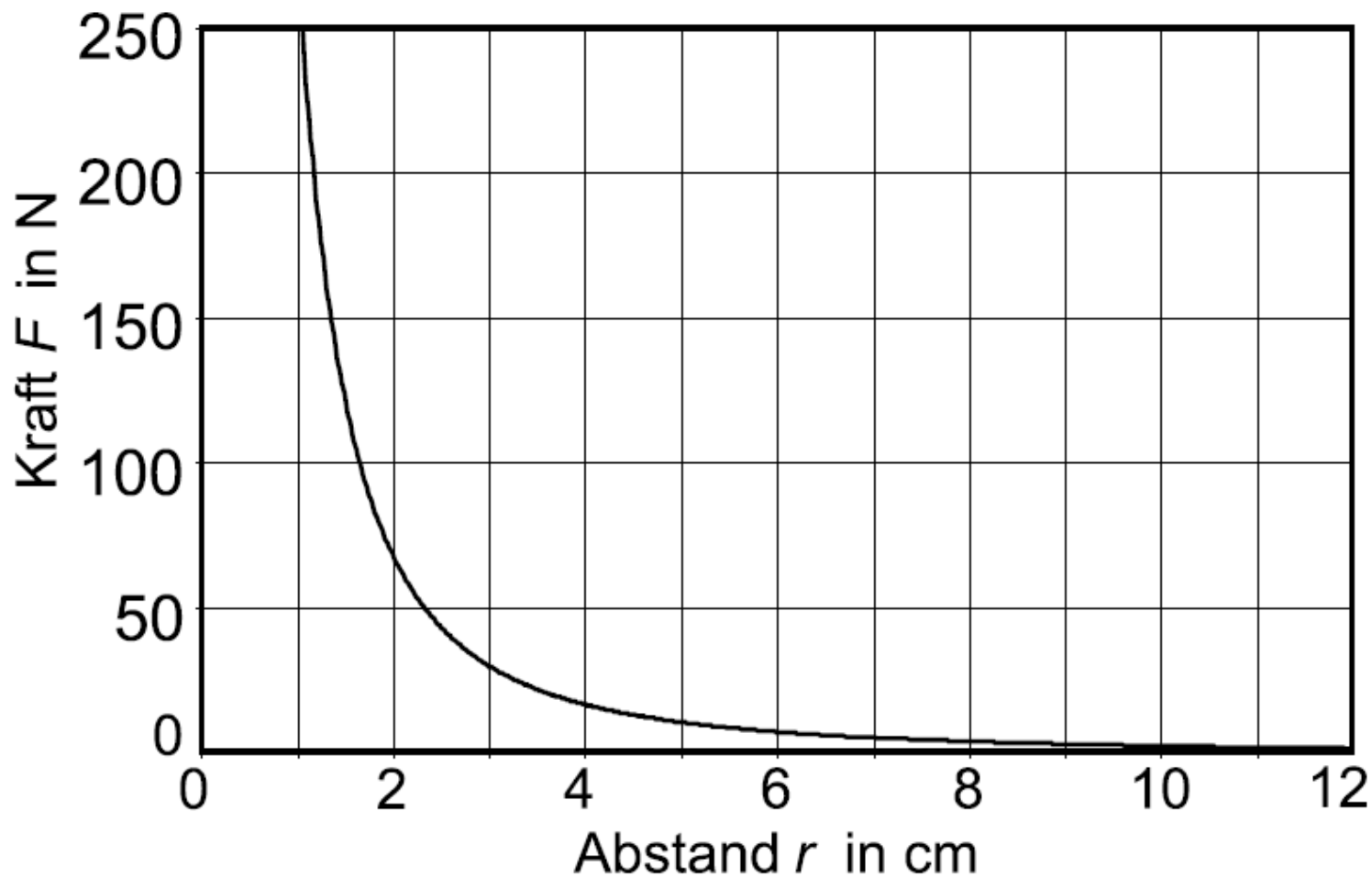


Abb. 4.2 Coulomb'sche Anziehungskraft zwischen zwei Ladungen mit $Q_1 = -10^{-6}$ C und $Q_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ C

Die Coulomb-Kraft weist mathematisch dieselbe Struktur auf wie die Gravitationskraft, nämlich

$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \frac{r_{12}}{r_{12}} . \quad (2.137)$$

da sie

- eine Zentralkraft ist,
- quadratisch mit der Teilchenentfernung abnimmt und
- symmetrisch in den Ladungen ist.

Tabelle 4.1 Unterschiede zwischen der Coulomb- und der Gravitationskraft

Unterscheidungsmerkmale	Kräfte	
	Coulomb-Kraft	Gravitationskraft
Ursache	Ladungen	Massen
Kraftrichtung	Anziehung oder Abstoßung, je nach Vorzeichen der Ladungen	Anziehung
Stärke	groß	sehr klein
Abschirmbarkeit	ja	nein
Bedeutung	Zusammenhalt der Atome	Zusammenhalt des Makrokosmos

Stromstärke

Wird in der Zeitspanne dt durch eine Querschnittsfläche die Ladung dQ hindurchbewegt, dann berechnet sich die Stromstärke I zu

$$I = \frac{dQ}{dt} . \quad (4.6)$$

Die Einheit der Stromstärke I ist nach dem französischen Physiker A. M. AMPÈRE (1775 bis 1839) benannt.

Aus (4.6) folgt, dass auch die Ladung aus der Dauer des Stromflusses berechnet werden kann als

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt . \quad (4.7)$$

Dies ist eine wichtige Methode der Ladungsbestimmung für zeitabhängige Ströme. Die Ladung ist anschaulich als Fläche unter der $I(t)$ -Kurve zu verstehen. Ist die Stromstärke in der Zeit konstant, d. h. der Ladungstransport stationär, so gilt

$$Q = I t . \quad (4.8)$$

Die Stromstärke I ist im Internationalen Einheitensystem als Basisgröße über die Kraftwirkung zweier stromdurchflossener Leiter definiert (Abschn. 1.3):

Eine Stromstärke I besitzt dann den Wert 1 Ampere, wenn die durch zwei im Abstand von 1 m befindliche geradlinige, parallele Leiter (mit Durchmesser null) fließende Stromstärke je Meter Länge eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N hervorruft.

Diese Definition wurde gewählt, um die elektrische Energie und die mechanische Energie in gleichen Einheiten messen zu können; es gilt

$$1 \text{ V A s} = 1 \text{ J} = 1 \text{ N m} .$$

Als *Stromrichtung* wurde die Bewegungsrichtung von *plus* (+) nach *minus* (–) festgelegt. Diese sogenannte „technische“ Stromrichtung ist entgegengesetzt der tatsächlichen Elektronenbewegung.

Die *Stromdichte* in einem stromdurchflossenen Draht des Querschnitts A ist definiert als

$$j = \frac{I}{A} . \quad (4.9)$$

Wirkungen des elektrischen Stroms

- *Wärmewirkung*
Stromdurchflossene Leiter erwärmen sich, ändern ihre Länge (ihr Volumen) und oft andere temperaturabhängige Größen, z. B. den elektrischen Widerstand oder die Farbe.
- *Chemische Wirkung (Elektrochemie)*
In elektrolytischen Leitern können Ladungen und Ionen transportiert und an Festkörpern, den sogenannten Elektroden, abgeschieden werden (Galvanotechnik). Diese Wirkung wurde früher zur Definition des Ampere herangezogen: 1 A scheidet nämlich in 1 s aus einer wässrigen Silbernitratlösung 1,118 mg Silber ab.
- *Magnetische Wirkung (Elektromagnetismus)*
Stromdurchflossene, gerade Leiter werden von einem zylindersymmetrischen Magnetfeld umgeben.

Spannung

Die Spannung U ist ein Maß für die hineingesteckte Ladungstrennungsarbeit je Ladung:

$$U = W/Q.$$

elektrische Urspannung

In leitenden Festkörpern (z. B. Metallen) sind nur Elektronen frei beweglich, sodass am Plus-Pol Elektronenmangel und am Minus-Pol Elektronenüberschuss herrscht. Werden diese Pole miteinander verbunden, dann fließen die Elektronen vom Minus- zum Plus-Pol. Die *technische Stromrichtung* legt im Gegensatz zum physikalischen Verhalten folgendes fest:

Bei passiven Bauelementen (z. B. Ohm'scher Widerstand) fließt im äußeren Stromkreis der Strom vom Pluspol der Spannungsquelle zu ihrem Minuspol.

Konsequent durchgeführt erhält man auch so keine physikalisch falschen Ergebnisse. Abbildung 4.4 zeigt die Pfeilrichtungen für die Stromstärke I und die Spannung U . Die Spannung U in V ist über die elektrische Energie definiert:

Ein Volt liegt dann zwischen zwei Punkten eines metallischen Leiters, wenn beim Transport der Ladung von 1 Coulomb eine Energie von 1 Joule umgesetzt wird.

Es gilt

$$U = \frac{P_{\text{ab}}}{I} . \quad (4.10)$$

$$U_{AB} = -\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B . \quad (4.11)$$

Spannungsquellen halten zwischen zwei Punkten eine Spannung aufrecht. Dies geschieht durch Umwandlung von chemischer Energie (galvanische Elemente), mechanischer Energie (Generatoren) oder Lichtenergie (Solarzellen) in elektrische Energie.

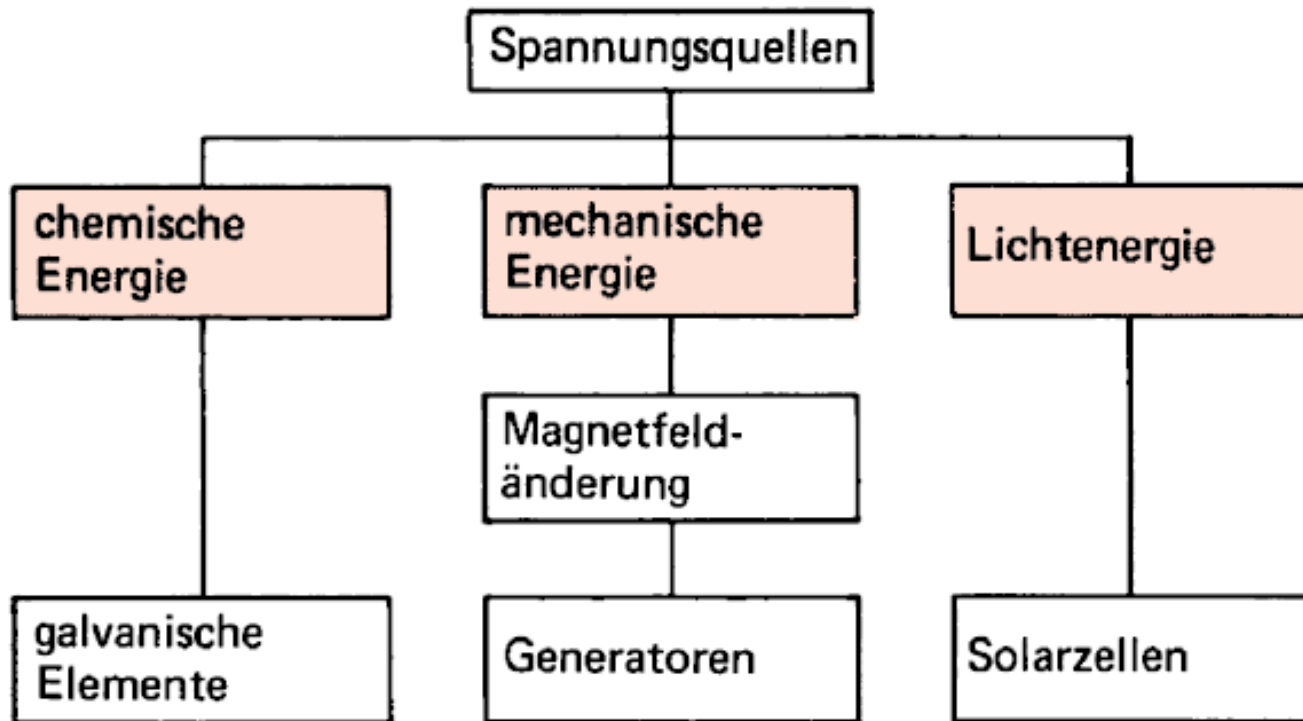


Abb. 4.5 Arten von Spannungsquellen

Widerstand und Leitwert

Der elektrische Widerstand R ist ein Maß für die Hemmung des Ladungstransports und bestimmt deshalb die Stromstärke bei einer bestimmten Spannung. Er ist folgendermaßen definiert:

Der elektrische Widerstand R beträgt 1 Ohm, wenn zwischen zwei Punkten eines metallischen Leiters beim Spannungsabfall von 1 Volt genau 1 Ampere fließt.

Die Einheit ist $1 \text{ V/A} = 1 \Omega$.

Mit der Entdeckung des *Quanten-Hall-Effektes* durch K. v. KLITZING (Abschn. 8.2.5) lässt sich das Ohm unabhängig von der Geometrie und den physikalischen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe allein durch Naturkonstanten mit hoher Genauigkeit ($10^{-8} \Omega$) darstellen $(h/e^2) = 25\,812,8 \Omega$; hierbei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum $h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ und e die Elementarladung.

Der Kehrwert des elektrischen Widerstandes ist der Leitwert G :

$$G = \frac{1}{R} . \quad (4.12)$$

Er wird in Siemens S oder in Ω^{-1} gemessen.

Der elektrische Widerstand R eines metallischen Leiters der Länge l und dem Querschnitt A ist

$$R = \varrho \frac{l}{A} . \quad (4.13)$$

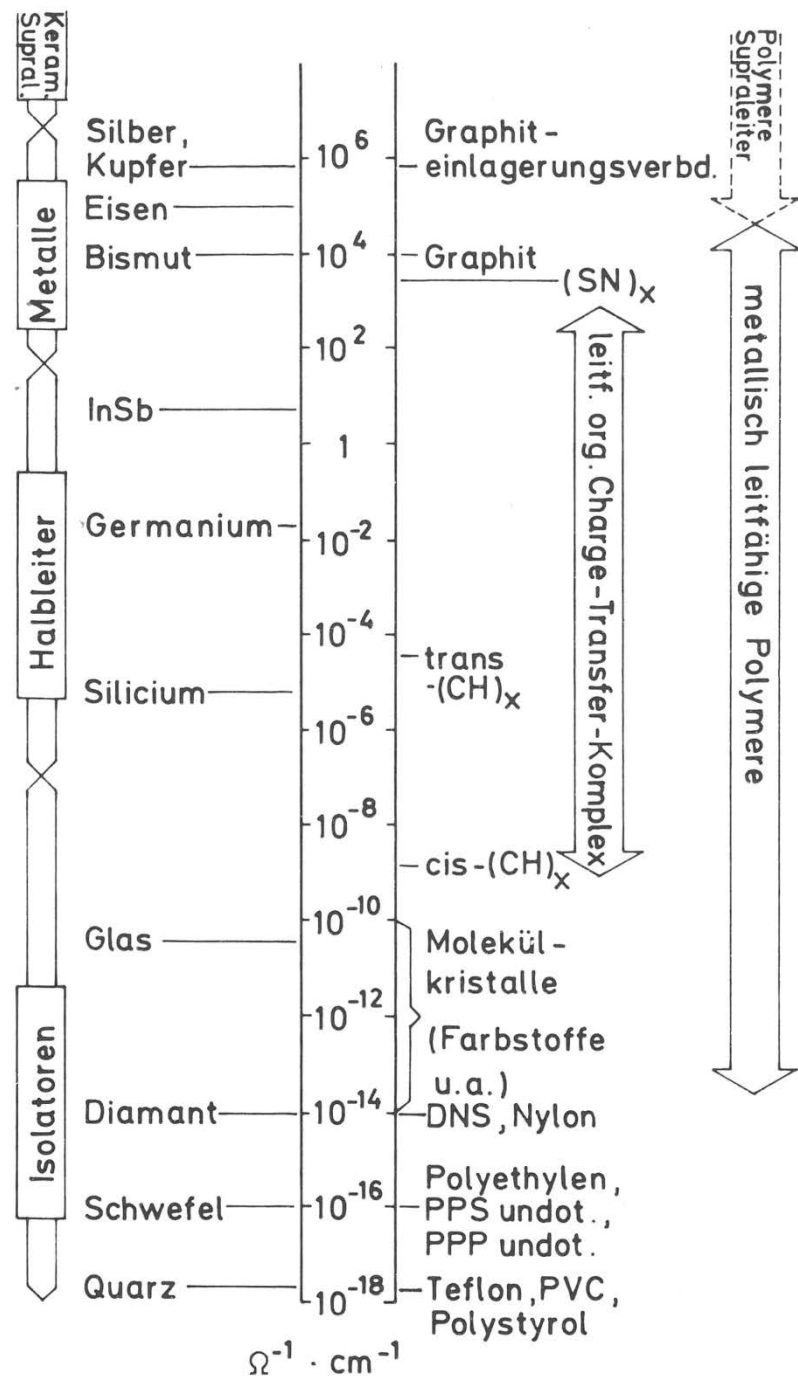
Die Proportionalitätskonstante ist der spezifische Widerstand ϱ (Resistivität).

$$\varrho = \frac{RA}{l} . \quad (4.14)$$

Er wird üblicherweise für Festkörper in $(\Omega \text{ mm}^2)/\text{m}$ und für Flüssigkeiten in $\Omega \text{ cm}$ gemessen.

Analog zum Leitwert ist der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes die elektrische Leitfähigkeit \varkappa :

$$\varkappa = \frac{1}{\varrho} = \frac{l}{RA} = \frac{Gl}{A} . \quad (4.15)$$



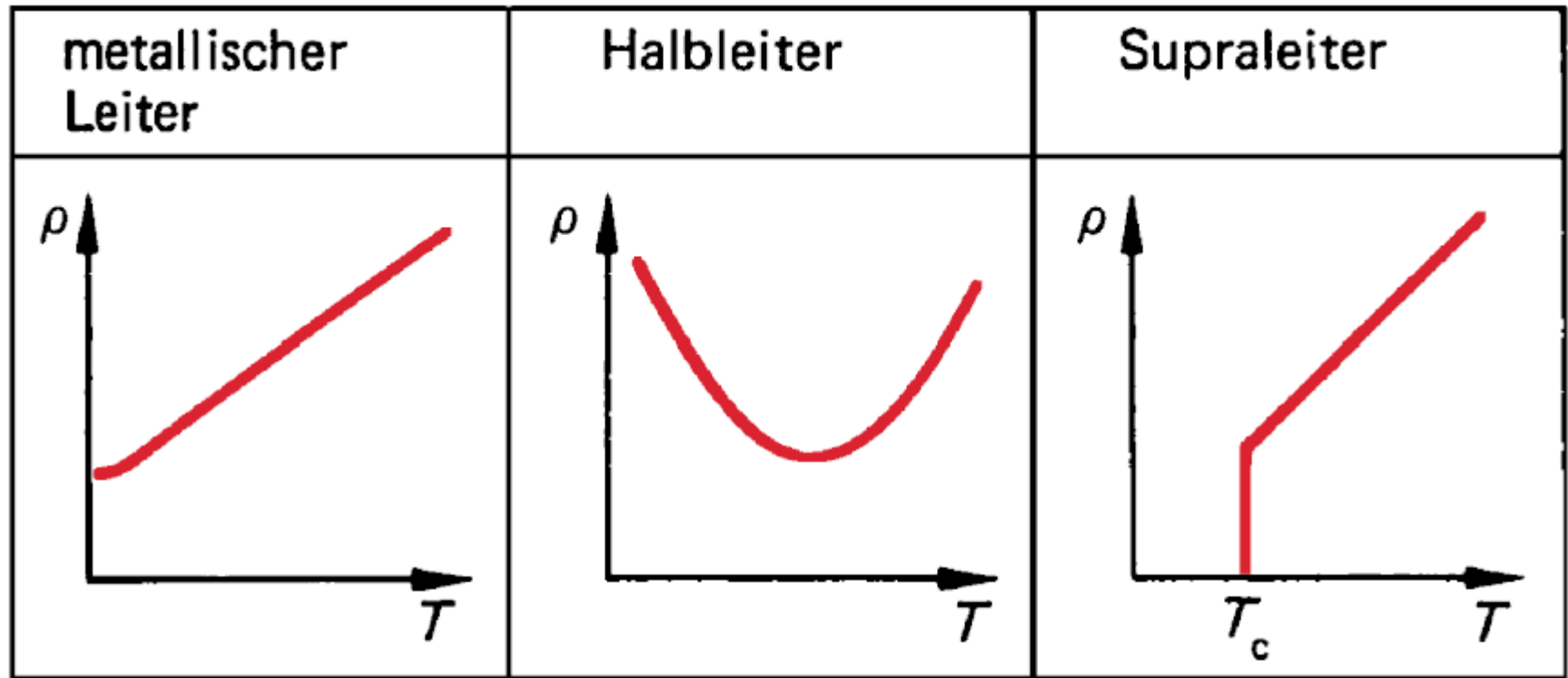


Abb. 4.7 Prinzipieller Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstandes für einen metallischen Leiter, einen Halbleiter und einen Supraleiter

Elektrisches Feld

4.3.1 Allgemeiner Feldbegriff

In der Physik tritt die Bezeichnung *Feld* in verschiedenen Zusammenhängen auf (z. B. in Abschn. 2.12.2.1). Ein *Feld* ist allgemein eine physikalische Größe Z , die nicht nur in einem einzigen Punkt, sondern im gesamten Raum wirksam und damit messbar ist. Ein Feld kann daher mathematisch beschrieben werden:

$$Z = Z(x, y, z; t) . \quad (4.90)$$

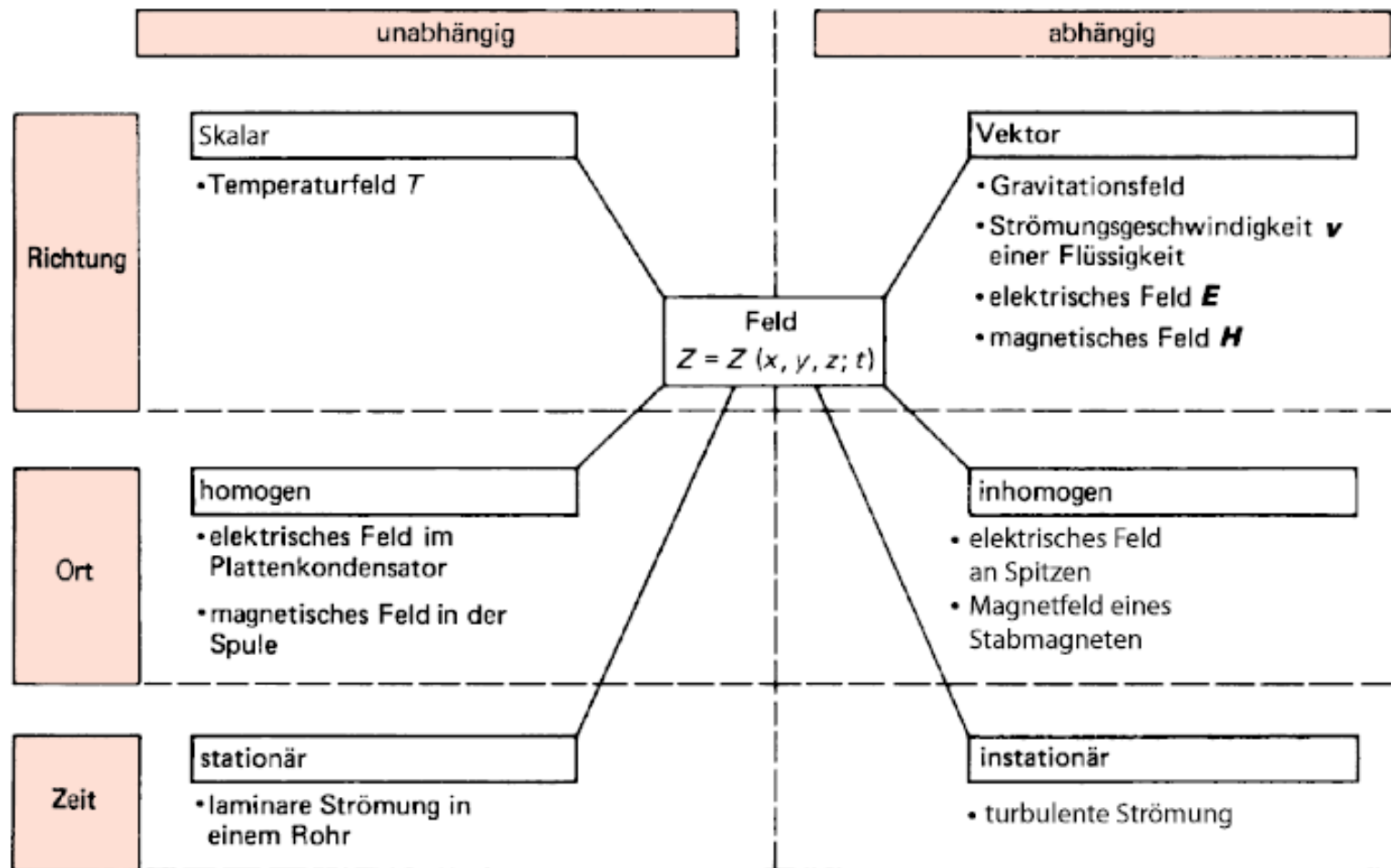


Abb. 4.47 Einteilung der Felder