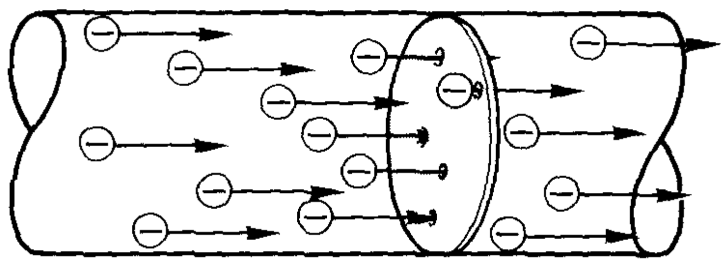

Abbildung 3.1: Bewegte Ladungen im einem Leiter

3.2 Mechanismen der Stromleitung

Betrachten wir noch einmal den Einstiegsversuch. Was ist in dem Leiter geschehen, mit dem wir die Kondensatorplatten verbunden haben? Die Elektronen bewegen sich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes $\vec{E}$. Auf sie wirkt eine Kraft

$$\vec{F} = q_- \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{a}. \tag{3.3}$$

Somit bewegen sie sich mit einer Geschwindigkeit

$$\vec{v}_- = \vec{a} \cdot t = q_- \frac{\vec{E}}{m} t, \tag{3.4}$$

d. h. v_- nimmt linear mit der Zeit zu. Betrachten wir dazu ein Beispiel:

Beispiel 3.1

Durch einen Kupferdraht mit einem Querschnitt von $1\,\mathrm{mm}^2$ fließe ein Strom von 10 A. Dieser Draht befinde sich in einem elektrischen Feld von $E = 0{,}17\,\mathrm{V/m}$ und es ist $|q_-| = e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C und $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Damit ist

$$v_- \simeq 3 \cdot 10^{10} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} t, \tag{3.5}$$

d. h. für $t = 10\,\mathrm{ms}$ ist $v_- = 3 \cdot 10^8 \mathrm{m/s} \simeq 1\,\mathrm{c}$ (Lichtgeschwindigkeit). Dies ist offensichtlich unsinnig!!!

Wir müssen uns also ein anderes Bild von der Elektronenbeweglichkeit machen. In Materialien können Teilchen nämlich nur eine Zeit τ frei fliegend beschleunigt werden, bevor

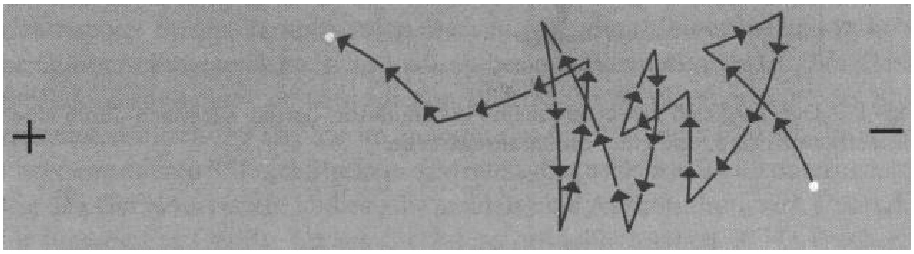

Abbildung 3.2: Elektronenbewegung

sie gegen schwingende Gitterbausteine, gegen Kristallfehler etc. stoßen und dabei ihre kinetische Energie abgeben und ihre Richtung verlieren. Dann werden sie während einer mittleren Zeit τ erneut beschleunigt usw. Die bei den Stößen abgegebene kinetische Energie ist dabei die im Leiter erzeugte Stromwärme (s. Abb. 3.2, aus [7]).
Die charakteristische freie Flugzeit, d.h. die Zeit zwischen zwei Stößen, wird **mittlere Stoßzeit τ** oder auch **Relaxationszeit** genannt. Die sich einstellende mittlere Geschwindigkeit

$$v_D = a \cdot \tau = q \, \frac{E}{m_e} \, \tau \tag{3.6}$$

wird als **Driftgeschwindigkeit** v_D bezeichnet.

Wie groß ist die Driftgeschwindigkeit?

Dazu betrachten wir einen Leiterquerschnitt der Fläche A und die Ladungsmenge, die pro Zeiteinheit durch ihn hindurchtritt. Es fließe ein Strom $I = \mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$. Damit ist die Ladung $\mathrm{d}Q = I\,\mathrm{d}t$. Ein Elektron legt in der Zeit $\mathrm{d}t$ den Weg $\mathrm{d}s = v_D \cdot \mathrm{d}t$ zurück. Nehmen wir weiterhin an, es befinden sich n Elektronen pro Volumeneinheit im Leiter. Dann befinden sich im Volumen $V = A\,\mathrm{d}s$ insgesamt $n\,A \cdot \mathrm{d}s$ Elektronen. Alle diese Elektronen treten in der Zeit $\mathrm{d}t$ durch den Querschnitt A hindurch (s. Abb. 3.3, entnommen aus [7]). Damit fließt eine Ladung von

$$\begin{aligned} \mathrm{d}Q &= \text{Anzahl der Ladungsträger multipliziert mit ihrer Ladung} && (3.7)\\ &= n \cdot A \cdot \mathrm{d}s \cdot q = n \cdot q \cdot A \cdot v_D \cdot \mathrm{d}t, && (3.8)\end{aligned}$$

durch die Oberfläche. Das entspricht einem Strom von

$$I = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = n \cdot q \cdot A \cdot v_D. \tag{3.9}$$

Da die Geschwindigkeit der Driftbewegung der Elektronen von der Feldstärke E abhängt, führt man den Begriff der **Beweglichkeit** μ ein:

$$\text{Beweglichkeit } \mu = \frac{\text{Driftgeschwindigkeit } v_D}{\text{elektrische Feldstärke } E}. \tag{3.10}$$

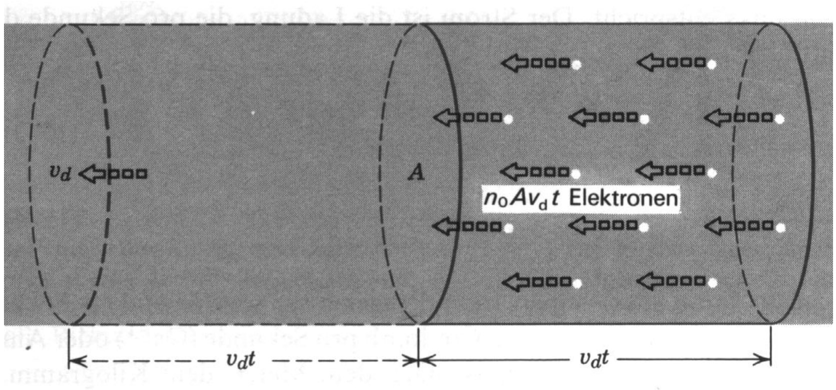

Abbildung 3.3: Die Driftgeschwindigkeit

Wenn die Stromverteilung im Draht nicht gleichförmig ist, dann betrachtet man besser die **Stromdichte** j.

$$\boxed{j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}A} = n \cdot q \cdot v_D} \qquad \textbf{Stromdichte in Metall} \tag{3.11}$$

3.3 Allgemeine Form des Ladungstransportes

Allgemein tragen positive und negative Ladungsträger zur Stromleitung bei, z.B. bei Elektrolyten. Es gilt dann:

$$j = q_+ n_+ v_+ + q_- n_- v_- \tag{3.12}$$

$$\text{oder vektoriell} \quad \vec{j} = q_+ n_+ \vec{v}_+ + q_- n_- \vec{v}_- \tag{3.13}$$

Beachte: Historisch werden $\vec{j}$ und $\vec{I}$ in Richtung der positiven Ladungen gezählt! Wie groß sind v_D und τ?
Wir betrachten wieder den Kupferdraht von Seite 92. Aus der Atomphysik weiß man, dass jedes Atom ein e^- zur Leitung beträgt, d.h.

$$n = \frac{\text{Zahl der Atome}}{\text{Volumen}} = \frac{6 \cdot 10^{23}\,\frac{\text{Atome}}{\text{Mol}}\, 8,9\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{63,5\frac{\text{g}}{\text{Mol}}} = 8,5 \cdot 10^{22}\,\text{cm}^{-3}, \tag{3.14}$$

$$\text{damit ist} \quad v_D = \frac{j}{e \cdot n} = \frac{I}{e \cdot n \cdot A} \simeq 7 \cdot 10^{-4}\frac{\text{m}}{\text{s}} \tag{3.15}$$

$$\text{und} \quad \tau = \frac{m}{e \cdot E} v_D \simeq 2 \cdot 10^{-14}\text{s}. \tag{3.16}$$

Beide Werte dieses Beispiels sind in der Tat typische Werte für v_D und τ.