

# Beweglichkeit und Diffusion

## Illustration

In den Kapiteln [2.1.1](#) und [2.1.2](#) wird im Grunde eine einfache Botschaft "kompliziert" vermittelt. Hier schauen wir uns das Ganze nochmal in den großen Zügen an.

Zunächst geht es um Geschwindigkeiten und "Fließen". Die wesentlichen Punkte sind:

1. Frei bewegliche Teilchen in einem Material das im thermodynamische Gleichgewicht nur so "rumliegt" - Atome, Elektronen, was auch immer - rennen mit "thermischer" Geschwindigkeit wild durcheinander, bleiben aber im Mittel wo sie sind (Fliegenschwarmanalogie).
2. Die "thermische" Geschwindigkeit  $v$  (aus  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ ) ist schon klassisch bei Raumtemperatur "erstaunlich" hoch. Für Elektronen müssen wir hier noch eine quantenmechanische Korrektur (später) einbauen; die grundsätzlichen Überlegungen sind davon jedoch nicht betroffen.
3. **Teilchenströme** treten auf, wenn sich der ungeordneten Bewegung eine gerichtete Bewegung überlagert. Dann "fließt" das ganze Ensemble mit einer **Driftgeschwindigkeit  $v_D$**  in Fließrichtung.
4. Die Driftgeschwindigkeit ist dem Betrag nach i.d.R. sehr viel kleiner als die thermische Geschwindigkeit. Trotzdem ist nur die Driftgeschwindigkeit für z. B. elektrischen Stromfluss verantwortlich.

Damit kann man jeden beliebigen Teilchenfluß  $j_T$  = Flussdichte = **Nettozahl** der Teilchen die pro Sekunde durch eine Querschnittsfläche  $A$  fließen = Fluß in eine Richtung – Fluß in Gegenrichtung =  $n \cdot v_D$  schon hinreichend beschreiben;  $n$  ist dabei die Teilchen**dichte** oder **-konzentration**, also die Teilchenzahl pro  $cm^3$ .

- Eine elektrische Stromdichte  $j$  ist nichts anderes als ein Strom elektrisch geladener Teilchen, d. h. die (Netto)zahl an Ladungen, die pro Sekunde durch eine Querschnittsfläche  $A$  fließen: wir haben  $j = q \cdot j_T$  mit  $q$  = Ladung der Teilchen (i.d.R. eine (oder einige wenige) Elementarladungen  $e$ ).

Flüsse haben immer eine Ursache, eine **"treibende Kraft"**

- Bei elektrischen "Flüssen" = Strömen ist die übliche Ursache ein **elektrisches Feld  $E$** , das auf die geladenen Teilchen eine Kraft  $F = q \cdot E$  ausübt und die Teilchen damit in Feldrichtung beschleunigt.
- Eine andere Ursache für Teilchenströme, die wir schon früher behandelt haben, ist ein **Konzentrationsgradient  $\nabla n$** . Damit ist nach dem [1. Fickschen Gesetz](#), das wir [atomar begründet](#) haben, ein Teilchenstrom  $j_T = -D \cdot \nabla n$  gegeben. Das 1. Ficksche Gesetz gilt auch für geladene Teilchen - ein Konzentrationsgradient "treibt" dann einen elektrischen **Diffusionsstrom**.
- Das gilt auch noch wenn wir für Elektronen das Ganze "richtig", d.h. quantenmechanisch betrachten.

Schauen wir zunächst auf ein elektrisches Feld als treibende Kraft, die dann **"Feldströme"** verursacht:

- Damit sich eine feldverursachte **konstante** Driftgeschwindigkeit  $v_D$  ergibt, die bei Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes proportional zu  $E$  sein muss, brauchen wir zwingend eine Art "Reibung".

Klassische Reibung kann es aber im Atomaren nicht geben, stattdessen haben wir den elementaren Prozeß der [Energiedissipation](#) durch Stoßprozesse. Das sind die Prozesse, die **immer** für die "Thermalisierung" verantwortlich sind, d.h. für die Tatsache, dass alle Teilchen sich im thermischen Gleichgewicht gleich verhalten - eben mit der thermischen Geschwindigkeit "wild" durch die Gegend fliegen.

- Unabhängig davon, mit was genau sich die Teilchen stoßen, kann man immer eine mittlere Stoßzeit  $\tau = \frac{1}{2}$  mittlere Zeit zwischen zwei Stößen definieren, und damit verbunden die mittlere freie Weglänge  $l$  = mittlerer zurückgelegter Weg zwischen zwei Stößen =  $2\tau(v_T + v_D)$ . (Der Faktor  $\frac{1}{2}$  bzw.  $2$  ist hier historisch bedingt und bedeutungslos).
- Alternativ kann man die "Stoßerei" in den Materialparameter **Beweglichkeit  $\mu$**  packen (der historisch gesehen früher "kam"); man erhält die Beziehungen

$$\mu = \frac{e \cdot \tau}{m} = \frac{v_D}{E} = \frac{e \cdot D}{kT}$$

Der letzte Term berücksichtigt, dass die früher behandelten Diffusionsprozesse, die vom Material aus "gesehen" durch eine Diffusionskonstante  $D$  beschrieben wurden, auch nicht anderes behandeln als Teilchen die mit "thermischer" Geschwindigkeit wild durcheinander rennen, "getrieben" durch die **thermische Energie  $kT$** .

- Aus dieser mehr abstrakten Sicht unterscheiden sich alle thermisch herumrennende Teilchen in ihrem grundsätzlichen Verhalten nicht - man kann immer Stoßzeiten, mittlere freie Weglängen, und damit eine Beweglichkeit definieren.
- Damit kann es keine zwei unabhängige Materialparameter -  $\mu$  und  $D$  - geben; die beiden müssen verknüpft sein. Die Verknüpfung (per obige Gleichung) ist elementar wichtig; sie heißt nach den "Entdeckern" ([oder "Erfindern"?](#)) **Einstein-Smoluchowski Beziehung**. Mehr dazu im [Link](#).

Wenn man das alles verdaut hat, hat man erst mal einen sehr tief gehenden Einblick in das Wesen der Materie gemacht. Außerdem hat man eine fundamentale Beziehungen für die elementare Eigenschaft "spezifische Leitfähigkeit"  $\sigma$  erhalten:

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu$$

- In Worten: Will ich  $\sigma$  optimieren, kann ich an zwei "Knöpfen" drehen:
  1. *Konzentration* der beweglichen Ladungsträger.
  2. *Beweglichkeit* der Ladungsträger
- Wie "dreht" man an diesen Knöpfen? Richtig! - Arbeite mit Defekten im Kristall. Wenn man das in Vollendung tut, nennt man es dann z. B. **Halbleitertechnologie**.