

## 9.2 Leitungseigenschaften dotierter Halbleiter

### 9.2.1 Beweglichkeit und Leitfähigkeit bei dotierten Halbleitern

#### Beweglichkeit

Um von der Ladungsträgerdichte  $n$  zur **Leitfähigkeit**  $\sigma = q \cdot n \cdot \mu$  zu kommen, brauchen wir noch die **Beweglichkeit**  $\mu$  der Ladungsträger.

Die **Beweglichkeit**  $\mu$  haben wir schon behandelt; wir hatten:

1. Die **Definition** von  $\mu$ .
2. Den **Zusammenhang zwischen  $\mu$  und fundamentalen Größen** wie Driftgeschwindigkeit, mittlere freie Weglänge oder Zeit zwischen zwei Stößen.

Zur Beweglichkeit gäbe es noch eine Menge zu sagen, z. B. daß sie mit dem **Diffusionskoeffizienten**  $D$  der Elektronen oder Löcher direkt verknüpft ist. Wir werden diese Beziehung noch brauchen, hier ist sie:

$$D = \frac{\mu \cdot k_B T}{e}$$
$$\mu = \frac{D \cdot e}{k_B T}$$

Kein Geringerer als **Einstein** (und **Smoluchowski**) hat diese Beziehung abgeleitet, sie heißt deshalb auch **Einstein-Smoluchowski-Beziehung**.

Was ist der Diffusionskoeffizient eines Elektrons oder Lochs? Im **Kapitel 4.2.1** "Atomare Fehlstellen und Diffusion" kam sowas nicht vor. Ja, schon – aber indirekt im **Kapitel 4.2.3** "Random Walk und Diffusionslänge", wo wir (ohne das groß zu betonen) jedem per "Random Walk" sich bewegenden "Etwas" – Elektronen, Leerstellen, Säuer – einen Diffusionskoeffizienten  $D$  und eine Diffusionslänge  $L$  zugeordnet haben. Die wichtige Beziehung war  $L = (D\tau)^{1/2}$

Dies alles, plus einige weiterführende Betrachtungen sind in **einem eigenen Modul** noch einmal zusammengestellt. Dort wird auch die Einstein-Smoluchowski Beziehung abgeleitet.

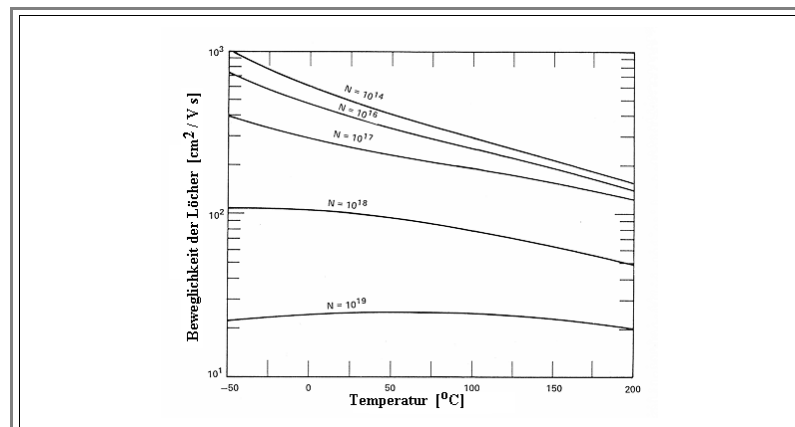
Wie auch immer, hier müssen wir nur zwei Dinge betrachten:

1. Die Beweglichkeit nimmt mit **zunehmender Temperatur** **ab**. Das haben wir bereits für den intrinsischen Fall betrachtet, und daran wird sich auch bei dotierten Halbleitern nicht viel ändern können.
2. Die Beweglichkeit wird durch Stöße mit Fremdatomen verringert. Dotieratome sind Fremdatome, wir müssen uns also fragen ob Dotierung die Beweglichkeit beeinflusst.

Die Antwort auf die Frage in Punkt **2** ist: **Ja!** Die Beweglichkeit wird durch Dotieren **herabgesetzt** (das ist schlecht, da wir damit offenbar auch die Grenzfrequenz eines Bauelementes herabsetzen).

Aber gleichzeitig wird die Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit verringert, da Stöße mit Phononen mit zunehmender Dotierkonzentration eine immer kleinere Rolle spielen.

Was wir insgesamt erhalten, sieht typischerweise so aus:



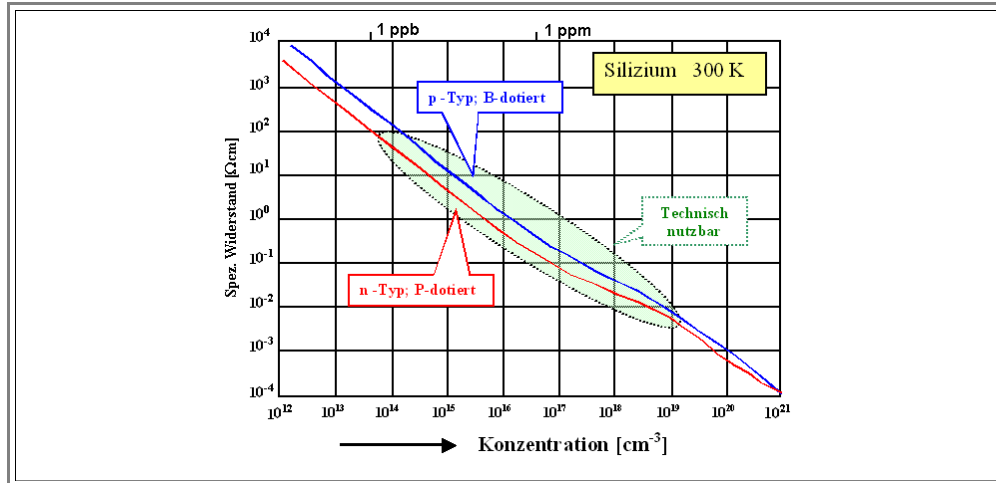
Die Beweglichkeit wird durch Dotieren bei Raumtemperatur im Extremfall um etwa eine Größenordnung reduziert; dabei ist die Abnahme von  $\mu$  erst bei höheren Dotierstoffkonzentrationen ( $> 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) richtig spürbar.

- Die Kurven für Elektronen sind ähnlich, aber im Absolutwert kann schon mal ein Faktor **10** auftauchen – je nach Halbleiter und detaillierter Bandstruktur. Die Beweglichkeit der Elektronen im Silizium ist beispielsweise ungefähr einen Faktor **3** größer als die der Löcher.

## Leitfähigkeit

Nehmen wir die ungefähr lineare Abhängigkeit der Ladungsträgerdichte, und die vergleichsweise kleine, aber nichtlineare Abhängigkeit der Beweglichkeit von der **Dotierstoffkonzentration** und multiplizieren beides miteinander, erhalten wir die **spezifische Leitfähigkeit**  $\sigma$  oder den spezifischen Widerstand  $\rho=1/\sigma$  als Funktion der Dotierstoffkonzentration (bzw. -dichte).

- Für Silizium sieht das dann so aus:



Das sind so mit die wichtigsten Kurven der modernen Menschheit. Auf ihnen beruht die **komplette Silizium-Technologie**.

- Jede Produktherstellung in der **Si** Technologie beginnt mit einer sorgfältigen Überlegung, mit welchem Dotiertyp und welcher Grunddotierung man startet (i.d.R. so im Bereich **(0,5 . . . 10) Ωcm**)
- Bei der Herstellung eines **Chips**, also einer **integrierten Schaltung**, wird dann lokal noch bis zu **10** mal anders dotiert – darauf beruht die **Funktion der Bauelemente**.
- Die **Funktion des Systems**, nur um das hier gleich mal zu unterscheiden, beruht dann darauf, wie man die Bauelemente miteinander **verbindet**. Das findet dann im wesentlichen nicht mehr **im Si** statt, sondern **auf dem Si**.

## Fragebogen

Schnelle Fragen zu 9.2.1