

Gleichheit von Rekombinationsrate und Generationsrate

Advanced

Im Gleichgewicht **muß** die Generationsrate gleich der Rekombinationsrate sein - sonst ändern sich die Ladungsträgerkonzentrationen im Leitungs- und Valenzband, so wie sich ein Kontostand ändert, wenn Einzahlungs- und Abhebungsrate nicht gleich groß sind (immer im Mittel, natürlich).

- Das heißt aber **überhaupt nicht**, daß die Generationsrate oder die Rekombinationsrate "wissen", was sie tun müssen.
- Die **Generationsrate** wird durch die verfügbare Energie (normalerweise thermische Energie, normalerweise allenfalls noch Lichtenergie), der Dichte der Elektronen an der betrachteten "Stelle" im Valenzband; und den "Weg" zum möglichen Endpunkt im Leitungsband - direkt, über andere Niveaus im Band, oder von einem Dotierniveau - unter Beachtung der notwendigen Erhaltungssätze (Energie und (Kristall)impuls).
- Außerdem gilt noch die Quantenmechanik, und dann kommt noch ein weiteres Kriterium dazu: Ein Übergang findet nur statt, wenn am Endpunkt ein freier Platz vorhanden ist. Das ist im Leitungsband zwar meist der Fall, deswegen greift dieses Kriterium hier nicht so recht, aber es ist fundamental und wichtig. Der [Link](#) gibt noch etwas mehr Information zu diesem Thema.
- Die **Rekombinationsrate** wiederum ergibt sich ausschließlich durch die Wahrscheinlichkeit, daß ein sich im entsprechenden Band herumtreibender Minoritätsladungsträger in die unmittelbare Nähe eines Rekombinationspartners kommt, den Weg (direkt, über Niveaus im Band, ...) und den aus Energie und (Kristall)impulserhaltungssatz folgenden Bedingungen, Außerdem verlangt die Quantentheorie, dass es einen passenden freien Platz im Valenzband gibt.

In anderen Worten: Rekombination und Generation sind sich in vielen Punkten sehr ähnlich, aber zunächst mal scheinbar unabhängig.

Wieso dann die Gleichheit der beiden Raten?

- Weil sie im Gleichgewicht gleich sein müssen - das ist die Definition von Gleichgewicht. Das erklärt aber nur **warum**, aber noch nicht **wie**. Offenbar muss sich, falls wir an der einen Rate "drehen" (unter Beibehaltung des Gleichgewichts; z.B. **R** durch Abänderungen der Lebensdauer durch Einbau von Störstellen), die andere Rate solange anpassen, bis wieder Gleichgewicht entsteht.

Schauen wir uns das mal in Formel an.

- Unsere wichtigen Grundformel sind:

$n_{\min} = \frac{n_i^2}{N_{\text{dot}}}$	$n_{\min} = R \cdot \tau$	$R = G = \text{const}$
---	---------------------------	------------------------

Die erste Formel gibt uns die Minoritätenkonzentration **n_{min}** über das Massenwirkungsgesetz, dabei geht nur die Dotierstoffkonzentration ein. Die zweite Gleichung definiert **n_{min}** über die Rekombinationsrate **R** und die Lebensdauer **τ**, die stark von Defekten abhängt; damit wird **n_{min}** variabel. Die dritte Gleichung sagt, dass die Rekombinationsrate aber eigentlich konstant sein sollte.

- Das scheint überhaupt nicht zusammenzupassen. Tut es so, wie es geschrieben ist, auch nicht. Aber eigentlich müsste bei der ersten Gleichung auch ein $\approx$ Zeichen stehen und **n_{maj}** statt **N_{dot}**. Das drückt dann aus, dass wir bei normalen Dotierungen und damit **n_{min} << n_{maj}**, die Minoritätenkonzentration sehr stark ändern können, wenn wir die Majoritätenkonzentration und damit die Fermienergie nur ein **bißchen** ändern.
- Da die Lebensdauer nur durch Störstellenniveaus in der Bandlücke beeinflusst wird, und **alle** Niveaus in der Bandlücke bei der Bestimmung der Fermienergie mitwirken, passiert genau das: Die Fermienergie wird sich immer so einstellen, dass die Minoritätenkonzentration den Wert hat, der die richtige Rekombinationsrate ergibt. Die Majoritätskonzentration muss sich dabei i.d.R. nur minimal ändern

Im **Nicht**gleichgewicht sieht es etwas anders aus. Sofort nach Abschalten von Licht haben wir noch eine überhöhte Minoritätsdichte, also Nichtgleichgewicht. Der Abbau erfolgt durch eine erhöhte Rekombinationsrate, während die Generationsrate ihren Gleichgewichtswert hat.

- Das ist verallgemeinerbar: Der Weg ins Gleichgewicht nach Abschalten einer "Störung" erfolgt durch Anpassen der Rekombinationsrate, die Generationsrate bleibt eher konstant.

Die Generationsrate ist also, wenn man so will, fundamentaler als die Rekombinationsrate. Sie ist fest vorgegeben (= Gleichgewichtswert); die Rekombinationsrate ist die Rate die sich anpaßt.

- Im Kontobeispiel heißt das, daß die Einzahlungen unabhängig von den Abhebungen sind, diese sich aber nach dem Kontostand richten. Geht er hoch, werden die Auszahlungen erhöht, geht er runter, werden sie erniedrigt. Irgendwann ist das System eingeschwungen und es herrscht Gleichgewicht.

Das hat aber eine fundamentale Konsequenz: Wird die Minoritätsladungsträgerdichte etwas aus dem Gleichgewicht ausgelenkt, wird sich die Generationsrate darum nicht kümmern, sie bleibt unverändert.

- Gleichgewicht kann sich nur wieder einstellen, indem sich die Rekombinationsrate anpaßt oder andere Quellen für Minoritäten erschlossen werden - zum Beispiel durch Injektion über einen Kontakt.
- Die genaue Buchführung über die Zu- und Abflüsse von Minoritätsladungsträgern in einem gegebenen Volumenelement inklusive der laufenden Generation und Rekombination heißt **Shockley-Read-Hall Theorie**, oder einfach **SRH-Theorie**.
- Sie ist das Herzstück der gesamten Halbleitertechnik, sprengt aber den Rahmen dieser Vorlesung
- Wer Lust hat, kann mal in eine Vorlesung für Fortgeschrittene hineinschauen und sich die [SRH-Theorie dort anschauen](#).