



The slide features a header with logos on the left and right. The left logo is the seal of Technische Universität Braunschweig. The right logo is LENA (Laboratory for Energy Nanotechnology) and the Institut für Halbleitertechnik, which includes a yellow circular emblem with the number 147. The main content area is a light gray rectangle containing the title and author information.

Technische Universität Braunschweig

LENA Laboratory for Energy Nanotechnology

Institut für Halbleitertechnik

Grundlagen der Elektronik und Photonik

Ladungsträgerkonzentrationen in einer Diode mit Spannung

Prof. Dr. Andreas Waag

Ladungsträger-Konzentrationen an einem p-n-Übergang mit äußerer Spannung

Bänderschema von Halbleitern

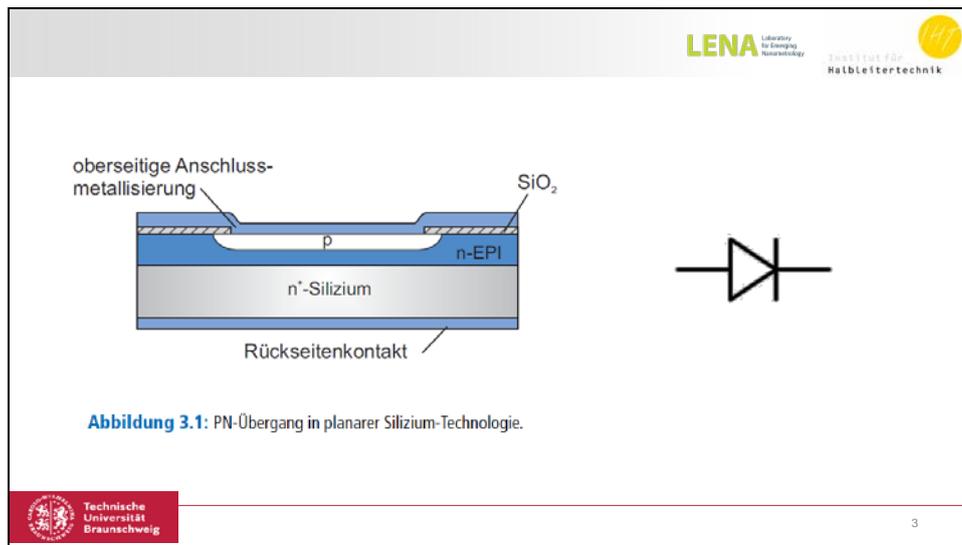
Die Inhalte dieses Clips entsprechen Level 3

- Level 1 Basiswissen Phase 1 (teilweise noch Schulwissen)
- Level 2 Basiswissen Phase 2 (Eingangskurse Bachelor)
- Level 3 Ziel-Niveau „Grundlagen der Elektronik und Photonik“
- Level 4 vertiefendes Wissen (Eingangskurse Master)
- Level 5 Expertenwissen (Fortgeschrittenen-Kurse Master)
- Level 6+ Wissensgrenze

LENA Laboratory for Energy Nanotechnology
INSTITUT FÜR Halbleitertechnik

Technische Universität Braunschweig

Dieser Clip ist auf Level 3 – Ziel-Niveau der Vorlesung.



Ein p-n-Übergang entsteht überall dort, wo eine p-dotierte Zone auf eine n-dotierte Zone trifft. p-n-Übergänge zeigen Diodenverhalten. Sie tauchen in praktisch allen Halbleiter-Bauelementen auf, so dass deren Verständnis grundlegend ist für die Beschreibung der Funktion von z.B. Transistoren, LEDs, oder Solarzellen. Dioden werden aber auch als elektronische Bauelemente in der CMOS Technologie benötigt, z.B. zum Absichern vor Überspannungen oder zur Temperaturmessung. In der Abbildung ist eine Diode in Dünnschicht-Technik gezeigt, ein typischer Aufbau für ein hoch integriertes Bauelement in CMOS Technologie. Das Schaltungssymbol für einen p-n-Übergang ist das der Diode. Die Strom-Spannungs-Charakteristik ist hochgradig nicht-linear: in Sperrrichtung trägt die Diode nur einen sehr kleinen Sperrstrom, in Durchlassrichtung gepolt hängt der Strom exponentiell von der von außen angelegten Spannung ab. Dioden können sehr klein sein, wie in der hoch integrierten CMOS-Technologie. Dioden können aber auch sehr groß sein (z.B.: mehrere cm^2 in der Fläche), wenn sie sehr hohen Strömen standhalten sollen, wie es z.B. in der Leistungselektronik häufig vorkommt. Im Folgenden sollen die Ladungsträger-Konzentrationen bei äußerer Spannung berechnet werden. Diese können dann in die Stromgleichungen eingesetzt werden. Das Ergebnis ist die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode.

Merkregel zur Polung von Dioden

LENA Laboratory for Energy Nanotechnology  **INSTITUT FÜR Halbleitertechnik**

Hinweis

Positives Potential am p-dotierten Bereich und negatives Potential am n-dotierten Bereich bedeutet Durchlassrichtung. Bei zu hohen Spannungen in Sperrichtung bricht die Diode durch.

 Technische Universität Braunschweig

4

Hier die einfache Merkregel zur Polung von Dioden: Negatives Potential an n und positives Potential an p bedeutet Durchlassrichtung.

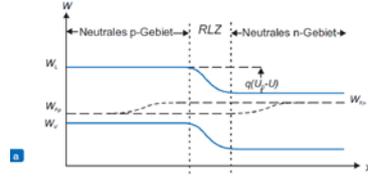
Der p-n-Übergang mit äußerer Spannung

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(U_D - U)}{q} \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}$$

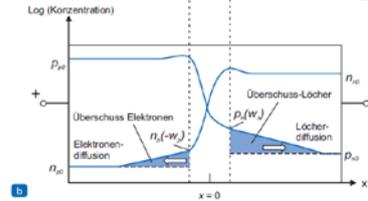
Bei einer Spannung in Durchlassrichtung wird die Breite der RLZ reduziert



a



b



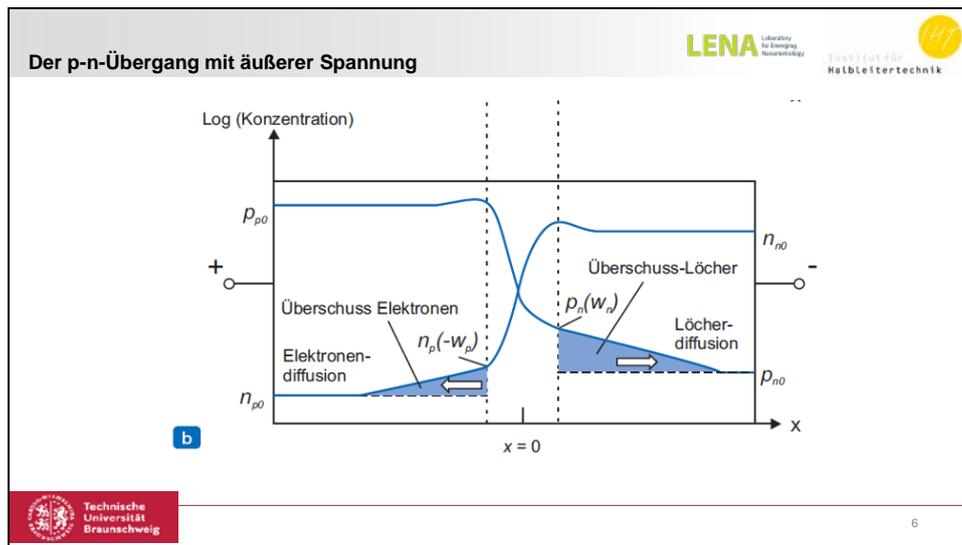


5

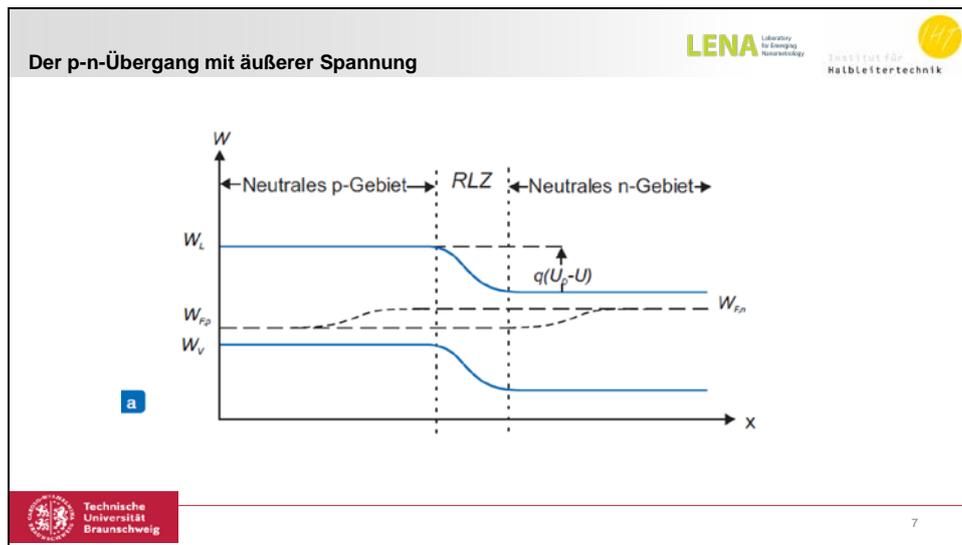
Betrachten wir nun zunächst – ausgehend von den Überlegungen zur Bandverbiegung und Raumladungszone – den p-n-Übergang mit äußerer Spannung. Die Überlegungen folgen der Annahme, dass die von außen angelegte Potentialdifferenz nur über der RLZ abfällt. Dies ist dann der Fall, wenn Spannungsabfälle entlang der n- und p-Gebiete, die als Zuleitung zum p-n-Übergang wirken, vernachlässigt werden können. Bei nicht zu hohen Strömen ist dies meist eine gute Näherung.

Durch ein Potential in Durchlassrichtung reduziert sich die Diffusionsspannung um den Betrag des angelegten Potentials. Dies führt zu einer Verkleinerung der Raumladungszone. (Gleichung). Für die Potentialdifferenz ist hier die Diffusionsspannung minus die von außen angelegte Potentialdifferenz in die Gleichung eingesetzt.

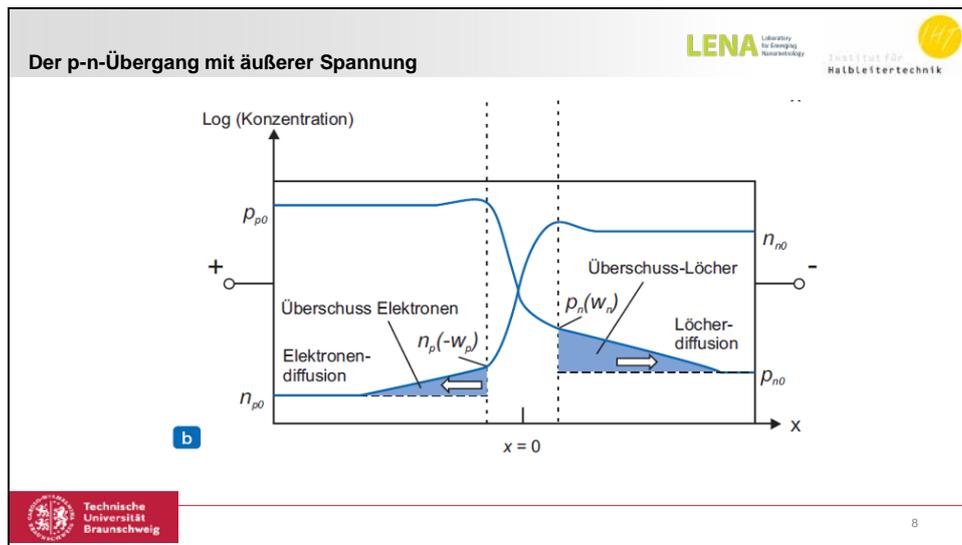
Der Rand der RLZ bewegt sich mit steigender Spannung auf die Mitte der RLZ zu, die Breite der RLZ verringert sich.



Die zugehörige Konzentration an Minoritäts-Ladungsträgern hat an den Grenzen der verkleinerten RLZ aber noch nicht ihr Gleichgewicht erreicht. Mit anderen Worten: die Minoritäts-Ladungsträgerkonzentration am Rand der RLZ steigt an. Minoritäts-Ladungsträger sind einerseits Elektronen im p-Bereich und Löcher im n-Bereich.



Eine erhöhte Minoritäts-Konzentration bedeutet gleichzeitig, dass sich der Halbleiter an dieser Stelle nicht mehr im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Die beiden Konzentrationen von Elektronen und Löchern müssen deshalb mit zwei separaten Fermi-Energien, den Quasi-Fermi-Niveaus, beschrieben werden. Diese sind als die beiden gestrichelten Linien im Diagramm dargestellt.



Ganz links im p-Gebiet und ganz rechts im n-Gebiet herrscht jedoch wieder thermodynamisches Gleichgewicht. Wir haben es also mit einem Gradienten der Minoritäts-Konzentrationen zu tun. Es ist dieser Gradient in der Ladungsträger-Konzentration, der zu einem Diffusionsstrom führt. Dies ist der Strom durch die Diode bei Anlegen einer Durchlass-Spannung.

Der Diffusionsstrom im Minoritätsbereich muss durch einen Feldstrom im Majoritätsbereich nachgeliefert werden, da die Stromdichte im gesamten Bauelement ja überall gleich groß sein muss (Knotenregel). Ladungen können nämlich nicht einfach verschwinden. Ladungen, die in das Bauelement hinein fließen, müssen auch wieder aus dem Bauelement herausfließen.

Schon hier wird klar, dass die Situation in Dioden recht kompliziert ist.

Quantitative Beschreibung: Ladungsträgerkonzentration




$$n = n_i e^{\frac{(W_{Fn} - W_i)}{kT}} \qquad p = p_i e^{\frac{(W_i - W_{Fp})}{kT}}$$

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{W_{Fn} - W_{Fp}}{kT}\right) \qquad qU = W_{Fn} - W_{Fp}$$



9

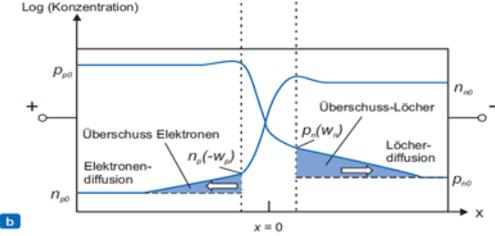
Wir haben es mit einer Situation im Nicht-Gleichgewicht zu tun, da ein äußeres Potential anliegt und Strom fließt. An den Rändern der RLZ sind insbesondere die Minoritäts-Ladungsträger-Konzentrationen erhöht gegenüber ihrem Gleichgewichtswert. Zur Beschreibung der Konzentrationen müssen deshalb Quasi-Fermi-Niveaus bemüht werden. Für n und p ergeben sich damit folgende Gleichungen (Gleichungen). W_{Fn} ist die Quasi-Fermi-Energie für Elektronen, W_{Fp} ist die Quasi-Fermi-Energie für Löcher. In den Gleichungen wurde als Referenz nicht die jeweilige Bandkante, sondern das intrinsische Fermi-Niveau W_i gewählt, das in der Nähe der Mitte der Bandlücke liegt. Sind beide Quasi-Fermi-Niveaus identisch gleich W_i so ergibt sich für n und p die jeweiligen intrinsischen Konzentration n_i und p_i . Für das Produkt np ergibt sich (Gleichung). Wie wir gleich noch sehen werden ist die Differenz der Quasi-Fermi-Niveaus gleich der von außen angelegten Spannung U multipliziert mit der Ladung q . Dies ist der Ausgangspunkt zur Berechnung der Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode: aus der Konzentration an Elektronen und Löcher als Funktion der äußeren Spannung lassen sich Gradienten errechnen und damit dann auch die Diffusionsströme. Die Summe von Elektronen- und Löcher-Diffusionsstrom ergibt dann den Gesamtstrom der Diode.

Quantitative Beschreibung: Ladungsträgerkonzentration

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{W_{Fn} - W_{Fp}}{kT}\right)$$

$$qU = W_{Fn} - W_{Fp}$$



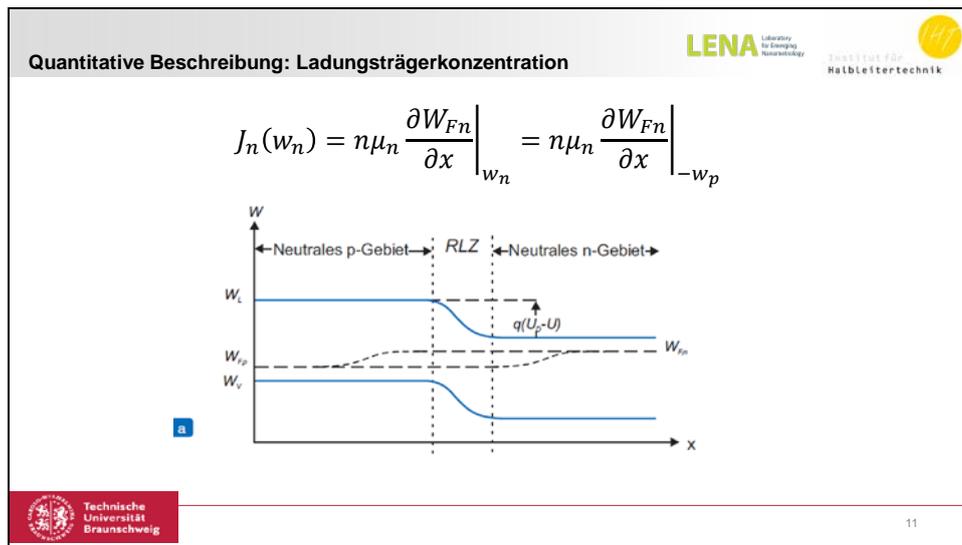



$$J_n(w_n) = n\mu_n \left. \frac{\partial W_{Fn}}{\partial x} \right|_{w_n} = n\mu_n \left. \frac{\partial W_{Fn}}{\partial x} \right|_{-w_p}$$



10

Betrachten wir zunächst den Elektronenstrom an Eingang und Ausgang der RLZ. Unter der Annahme, dass in der RLZ keine Rekombination stattfindet, was z.B. in Silizium-Dioden sehr gut erfüllt ist, muss laut Knotenregel der Eingangs- und der Ausgangsstrom an der Stelle w_n und der Stelle $-w_p$ identisch sein. Der Strom ist aber gerade proportional zum Gradienten der Fermi-Energie (Gleichung). Aus der Gleichung kann man ablesen, dass der Gradient der Fermi-Energie nur dort groß ist, wo die Konzentration n sehr klein ist. Dies ist weder im n-Bereich, noch in der RLZ, sondern eben nur am linken Rand der RLZ der Fall, dort wo die Elektronen in der Minorität sind. Dabei muss beachtet werden, dass die Konzentration in der Graphik logarithmisch aufgetragen ist. Die Kurven für die Konzentrationen zeigen eine Änderung über die RLZ von vielen Größenordnungen an. Dies untermauert unser Argument nur noch stärker: der Gradient der Fermi-Energie ist überall Null, außer am Rand der RLZ, an dem die Ladungen Minoritäten sind, also die kleinste Konzentration vorkommt. Für Elektronen ist die im p-Gebiet an der Grenze zur RLZ der Fall.



Ein Gradient von Null bedeutet, dass die Fermi-Energie konstant ist, und zwar sowohl im n-Gebiet als auch über die RLZ hinweg. Nur im p-Gebiet, dort wo der Gradient den größten Wert annimmt, ergibt sich eine Steigung. Hieraus ergibt sich der in dieser Graphik gezeigte Verlauf der Quasi-Fermi-Energien für Elektronen und Löcher. Weit im n-Bereich und weit im p-Bereich liegt wieder thermodynamisches Gleichgewicht vor, die Quasi-Fermi-Energien müssen dann identisch sein. Im n-Gebiet liegt die Fermi-Energie in der Nähe des Leitungsbandes, im p-Gebiet liegt die Fermi-Energie in der Nähe des Valenzbandes.

Konzentration an den Rändern der Raumladungszone




$$n_n p_n = n_i^2 \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) \quad \left\{ \begin{array}{l} p_n(w_n) = \frac{n_i^2}{n_n} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) = p_{n0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) \\ n_p(-w_p) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) = n_{p0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) \end{array} \right.$$

$$p_n(w_n) = p_{n0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

$$n_p(-w_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$



Technische Universität Braunschweig

12

Damit können wir nun die Konzentrationen an den Rändern der RLZ berechnen. Ausgehend von dem Produkt n_n mal p_n (Gleichung) können wir nach p im n -Bereich auflösen. Es ergibt sich (Gleichung). Genau so ergibt sich eine Gleichung für n im p -Bereich (Gleichung).

Die Minoritäts-Ladungsträgerkonzentration an den Rändern der RLZ hängen demnach exponentiell von der äußeren Spannung U ab. Ist $U=0$ so ergibt sich die ursprüngliche Gleichgewichtskonzentration p_0 im n -Bereich bzw. n_0 im p -Bereich. Mit diesen Gleichungen kann man nun auch den Gradienten der Konzentration berechnen, und damit den Diffusionsstrom. Das Ergebnis wird die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode sein.

Der p-n-Übergang mit äußerer Spannung

LENA Laboratory for Energy Nanotechnology  Institut für Halbleitertechnik

$$p_n(w_n) = p_{n0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

$$n_p(-w_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} = 0$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

 Technische Universität Braunschweig

13

Hierzu muss n und der Gradient von n (sowie p und der Gradient von p) in die Drift-Diffusionsgleichungen eingesetzt werden. Diese folgenden Schritte bei der Berechnung des Stroms wird in einem anderen Clip behandelt.