



Technische  
Universität  
Braunschweig



LENA  
Laboratory  
for Energy  
Nanotechnology



Institut für  
Halbleitertechnik


**Grundlagen der Elektronik und Photonik**

**Thermische Anregung von Ladungsträgern**

Prof. Dr. Andreas Waag

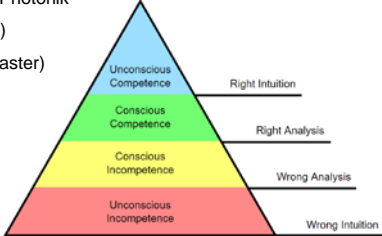
1


**Bänderschema von Halbleitern**

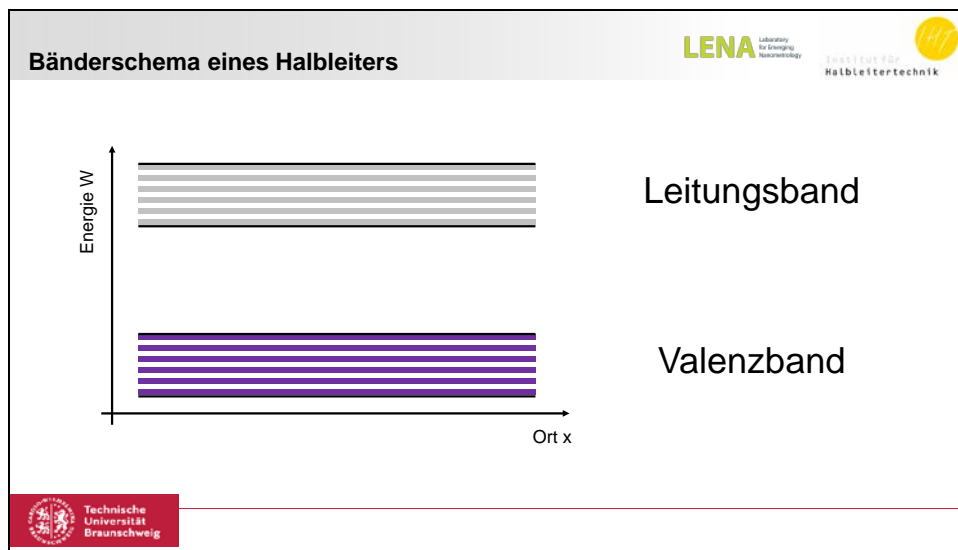
LENA Laboratory for Energy Nanotechnology  INSTITUT FÜR Halbleitertechnik

Die Inhalte dieses Clips entsprechen Level 2

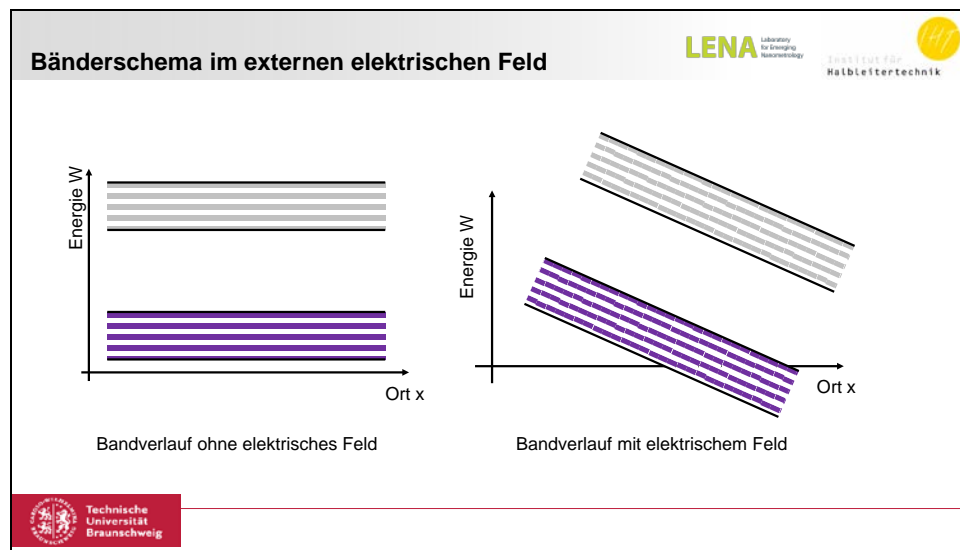
- Level 1 Basiswissen Phase 1 (teilweise noch Schulwissen)
- Level 2 Basiswissen Phase 2 (Eingangskurse Bachelor)
- Level 3 Ziel-Niveau „Grundlagen der Elektronik und Photonik“
- Level 4 vertiefendes Wissen (Eingangskurse Master)
- Level 5 Expertenwissen (Fortgeschrittenen-Kurse Master)
- Level 6+ Wissensgrenze



Technische Universität Braunschweig 

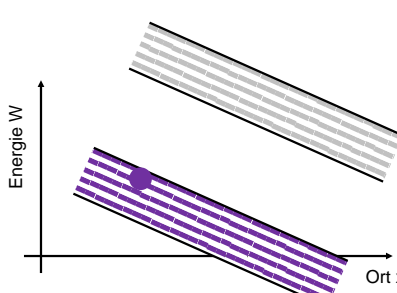


Im Bänderschema werden alle verfügbaren Energieniveaus für Elektronen in einem Halbleiter aufgetragen. Die y-Achse gibt die Energie an, auf der x-Achse ist der Ort aufgetragen. Um Stromtransport in Halbleiterbauelementen wie z.B. in Transistoren oder LEDs beschreiben zu können, muss man erst einmal verstehen, wie sich Elektronen in diesen Energiebändern überhaupt bewegen können. Nur wenn Elektronen einem von außen angelegten elektrischen Feld folgen können entsteht ein Strom. Nur: wie gut können Elektronen einem elektrischen Feld folgen? Und was unterscheidet einen Halbleiter von einem Metall und einem Isolator?




Eine extern angelegte Spannung erzeugt eine Potentialdifferenz entlang der  $x$ -Achse, also entlang der Ortskoordinate. Dies entspricht einem Gradienten der Energie. Elektronen würden nun – zumindest prinzipiell – gerne diesem Energiegradienten folgen. Wie Wassertropfen in einem Wasserfall auch würden Elektronen von einem energetisch höheren Niveau in ein energetisch niedrigeres Niveau abfließen. Anschaulich würde sich deshalb ein Elektronenstrom von links nach rechts ergeben. Hier stößt der Vergleich mit einem klassischen System „Wasser“ aber an seine Grenzen. Wir müssen die Situation genauer betrachten.

**Ladungsträger-Transport in voll besetzten Valenzbändern** LENA Laboratory for Energy Nanotechnology INSTITUT FÜR Halbleitertechnik



Ein Elektron in einem voll besetzten Valenzband kann nicht zum Stromtransport beitragen.

Es stehen keine freien Energieniveaus zur Verfügung, in die das Elektron abfließen könnte.



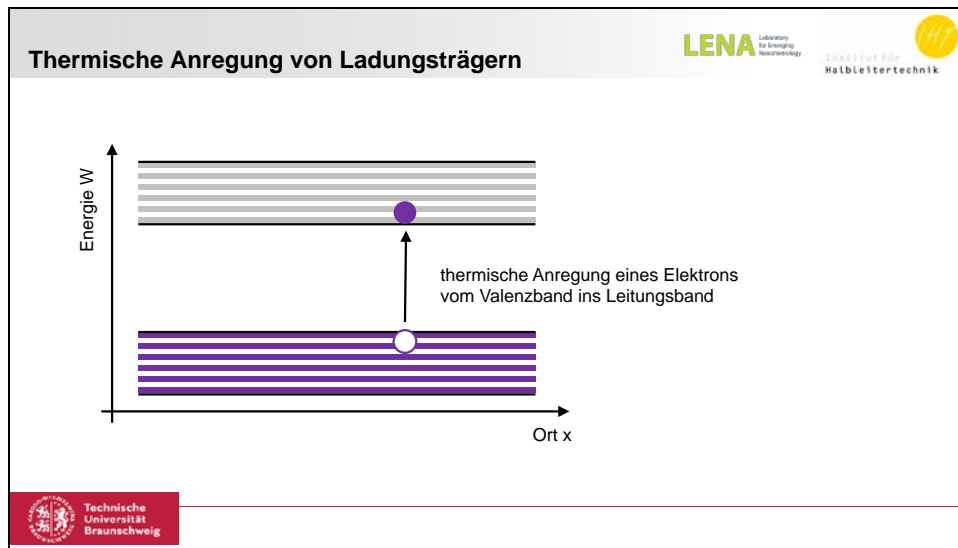
Bandverlauf mit elektrischem Feld

Technische Universität Braunschweig

Ein Elektron würde gerne in Richtung niedrigerer Energie – in unserem Beispiel nach rechts - abfließen. Wir erinnern uns aber hier an die Besetzung der Bänder in Halbleitern. Ein Halbleiter zeichnet sich dadurch aus, dass es ein letztes voll besetztes Band gibt (das Valenzband, oder das HOMO) und ein völlig leeres Band – das Leitungsband oder das LUMO). Zwischen beiden Bändern gibt es eine Lücke, die Bandlücke. Elektronen für den Ladungstransport stehen also nur im Valenzband (oder allen darunter liegenden Bändern, die hier allerdings nicht gezeigt sind) zur Verfügung.

Ein Elektron in einem voll besetzten Valenzband kann aber nicht zum Stromtransport beitragen. Der Grund hierfür liegt darin, dass ein Elektron, das sich nach rechts bewegen möchte, auf ein freies Energieniveau weiter rechts angewiesen ist. Freie Energieniveaus sind in einem voll besetzten Valenzband jedoch Mangelware. Damit kann es keinen Stromfluss geben, obwohl sehr viele Elektronen im Valenzband vorhanden sind, und obwohl eine äußere Spannung angelegt ist, die zu einem Gradienten der Energie führt. Ein Halbleiter in dieser Situation kann keinen Strom tragen, er ist isoliert.

Die Situation ähnelt der eines Staus auf der Autobahn: wenn es vor dem eigenen Fahrzeug keinen freien Raum gibt, kommt alles zum Stillstand.



Die Situation „volles Valenzband und überhaupt kein Elektron im Leitungsband“ ist eine Idealisierung und kommt in der Realität nicht vor. Man muss nämlich berücksichtigen, dass sich der Halbleiter auf einer bestimmten Temperatur befindet. Meist nimmt man als typische Temperatur 300 K an, dies entspricht ca. 27 °C und wird als „Raumtemperatur“ bezeichnet. Bei einem Halbleiter-Bauelement wie z.B. einem Transistor oder einer LED treten im Betrieb teilweise auch wesentlich höhere Temperaturen bis zu 120 °C oder sogar 150°C auf.

Im thermodynamischen Gleichgewicht bei einer Temperatur  $T$  verteilt sich die thermische Energie sehr ungleichmäßig auf die vielen Elektronen. Der Mittelwert der thermischen Energie beträgt bei Raumtemperatur zwar nur 25 meV, aber auch sehr hohe Energien von z.B. weit oberhalb von 1 eV kommen – mit entsprechen niedriger Wahrscheinlichkeit – vor. Es sind die Elektronen mit dieser hohen thermischen Energie, die über die Bandlücke des Halbleiter hinweg angeregt werden können und dadurch im Leitungsband landen.

Es existieren nur sehr wenige Elektronen mit ausreichend hoher thermischer Energie, um ins Leitungsband angehoben zu werden. Auch ohne Rechnung können wir vermuten: je größer die Bandlücke, umso kleiner die Elektronenkonzentration im Leitungsband. Deshalb sind Materialien mit großer Bandlücke Isolatoren.

Und je höher die Temperatur, desto mehr Elektronen werden sich im Leitungsband befinden. Dies ist der Grund dafür, dass Silizium-Elektronik bei sehr hohen Temperaturen oberhalb von ca. 200°C nicht mehr funktioniert. Silizium hat eine Bandlücke von nur 1,1 eV. Halbleiter mit größerer Bandlücke – wie z.B. Galliumnitrid mit 3,3 eV – sind für die Hochtemperatur-Elektronik wesentlich besser geeignet.



**Löcher und Elektronen**

LENA Laboratory for Energy Nanotechnology INSTITUT FÜR Halbleitertechnik

Die Anregung eines einzigen Elektrons in Leitungsband erzeugt zwei Ladungsträger.

Das Elektron im Leitungsband ist negativ geladen.

Das Loch im Valenzband ist positiv geladen.



Bandverlauf mit elektrischem Feld

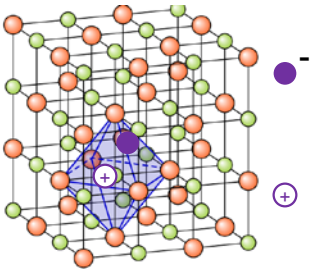
Technische Universität Braunschweig

Das Elektron im Leitungsband hat die Ladung  $e$ , also eine Elementarladung von  $1,3 \cdot 10^{-19}$  Coulomb. Es ist negativ geladen. Das ins Leitungsband angeregte Elektron hinterlässt allerdings auch ein freies Energieniveau im Valenzband. Das an dieser Stelle im Valenzband fehlende Elektron wird auch als „Loch“ bezeichnet - eine durchaus merkwürdige, aber eben historisch geprägte Bezeichnung. (im Englischen: Electron and Hole). Das fehlende Elektron, also das Loch, ist positiv geladen. Wo kommt diese positive Ladung aber her ?



### Die positive Ladung eines Lochs








In einem Kristallgitter gibt genauso viele Elektronen wie Protonen.

Der Halbleiter ist insgesamt elektrisch neutral.

Das Loch hat eine positive Nettoladung. Der Absolutbetrag ist identisch mit dem Betrag der Elementarladung

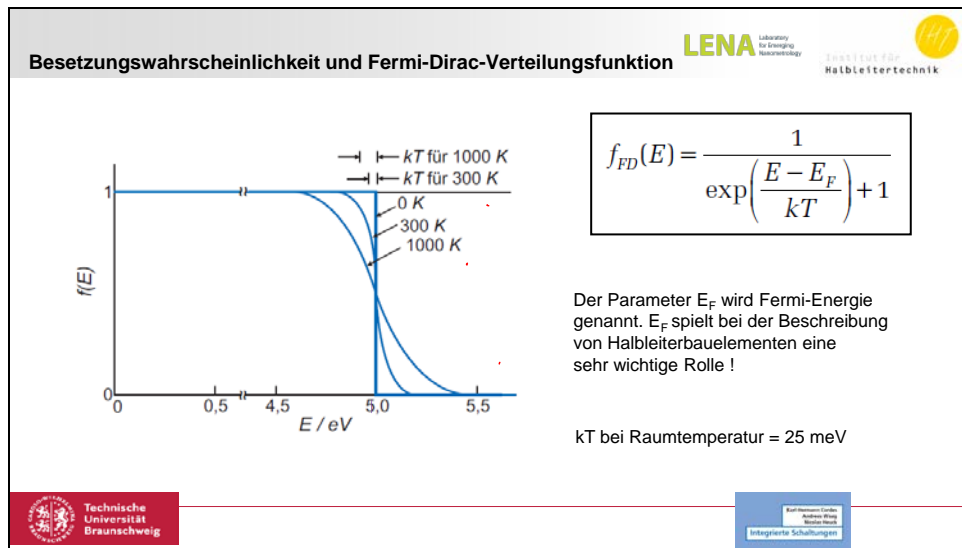




Technische  
Universität  
Braunschweig

Zur Beantwortung dieser Frage begeben wir uns zurück in den realen Raum eines Kristallgitters. In jedem Kristallgitter – genauso wie auch in Atomen - gibt es genau so viele Elektronen wie Protonen im Kern der Atome. Das Kristallgitter ist deshalb insgesamt elektrisch neutral, also ungeladen, da alle Ladungen gleichmäßig über den Ort verteilt sind. Entfernt man ein Elektron an einer Stelle – z.B. durch Anregung ins Leitungsband – muss gleichzeitig eine positive Ladung zurückbleiben, da ja jetzt zwar immer noch  $N$  Protonen im Gitter sitzen, aber nur noch  $N-1$  Elektronen. Dies ergibt eine positive Nettoladung, die positive Ladung des Lochs im Valenzband. Der Gesamtverbund ist wieder insgesamt elektrisch neutral.

Das Loch kann als positiver Ladungsträger betrachtet werden, genauso wie das Elektron ein negativer Ladungsträger ist. Dieses Konzept erleichtert die Beschreibung von Halbleitern erheblich. Statt  $(N-1)$  Elektronen im Valenzband zu beschreiben, muss man nur das Verhalten von einem einzigen Loch im Valenzband berechnen. Übertragen auf das System gut bekanntes Problem „Stau auf der Autobahn“ bedeutet das: statt die Bewegungskordinaten der vielen stehenden Fahrzeuge aufzuzeichnen reicht es aus, die Bewegungskordinaten einer „Lücke“ zu beschreiben.

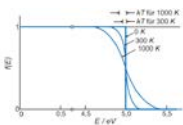


Schon hier soll auf das Ergebnis einer genauen – hier nicht gezeigten - Rechnung verwiesen werden: Die Anregungswahrscheinlichkeit wird durch die Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion gegeben. Die Fermi-Dirac-Funktion entstammt der Thermodynamik und gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Zustand bei der Energie  $E$  mit einem Elektron besetzt ist. Zwei Parameter gehen in die Fermi-Dirac-Funktion ein: Die Temperatur und die Fermi-Energie. Je größer die Differenz zwischen Fermi-Energie und Energie des Zustands, desto exponentiell kleiner die Besetzungswahrscheinlichkeit.

Für sehr niedrige Energien ist die Besetzungswahrscheinlichkeit = 1, solche Zustände sind demnach mit Sicherheit besetzt. Für sehr hohe Energien ist die Besetzungswahrscheinlichkeit = 0, solche Zustände sind demnach fast immer unbesetzt.

Für Zustände genau an der Fermi-Energie, also mit einer Energie  $E = E_F$  beträgt die Besetzungswahrscheinlichkeit genau 50%.


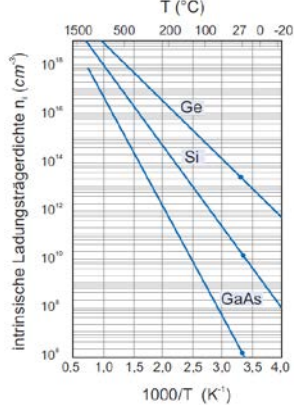
### Intrinsische Ladungsträger-Konzentration





$$f_{FD}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$$

Die thermisch aktivierte Ladungsträgerkonzentration wird **intrinsische Ladungsträgerkonzentration** genannt.

Je größer die Bandlücke, desto kleiner die intrinsische Ladungsträger-Konzentration bei Raumtemperatur.

Multipliziert man die Fermi-Dirac-Besetzungswahrscheinlichkeit mit der Zahl der Zustände, die bei einer Energie E zur Verfügung stehen (Rechnung hier nicht gezeigt) und integriert über alle Energien, so erhält man die Gesamtzahl an Elektronen, die thermisch über die Bandlücke hinweg ins Leitungsband angeregt wurden. Diese Werte hängen von der Bandlücke – und damit vom Halbleitermaterial – und von der Temperatur ab. Je höher die Bandlücke, desto exponentiell niedriger die Ladungsträgerkonzentration. Diese hängt ebenfalls exponentiell von der Temperatur ab, siehe Gleichung. Die halb-logarithmische Auftragung über 1/T liefert deshalb eine Gerade.

Die durch thermische Aktivierung entstehende Ladungsträgerkonzentration nennt man „intrinsische Ladungsträgerkonzentration“.

Im Allgemeinen ist die intrinsische Ladungsträgerkonzentration in Halbleitern sehr klein und spielt in Transistoren und LEDs eine untergeordnete Rolle.

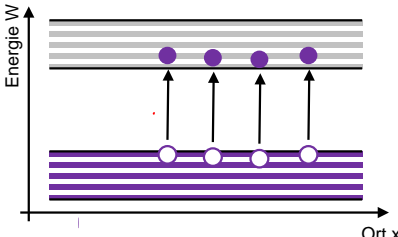
**Intrinsische Ladungsträger-Konzentration**

Bei thermischer Anregung ist die Zahl der Elektronen immer identisch zur Zahl der Löcher.

Intrinsische Löcher- und Elektronen-Konzentration sind gleich.

$$n_i = p_i$$

$n_i$  intrinsischen Elektronen-Konzentrationen  
 $p_i$  intrinsischen Löcher-Konzentrationen



LENA Laboratory for Energy Nanotechnology INSTITUT FÜR Halbleitertechnik

Technische Universität Braunschweig

Für thermische Anregung ist klar: jede Anregung eines Elektrons ins Leitungsband hinterlässt ein Loch im Valenzband. Die intrinsische Ladungsträger-Konzentration von Elektronen und Löchern ist deshalb identisch.  $n_i = p_i$ . Dieser Zusammenhang wird bei der Beschreibung externer Dotierung wichtig werden.