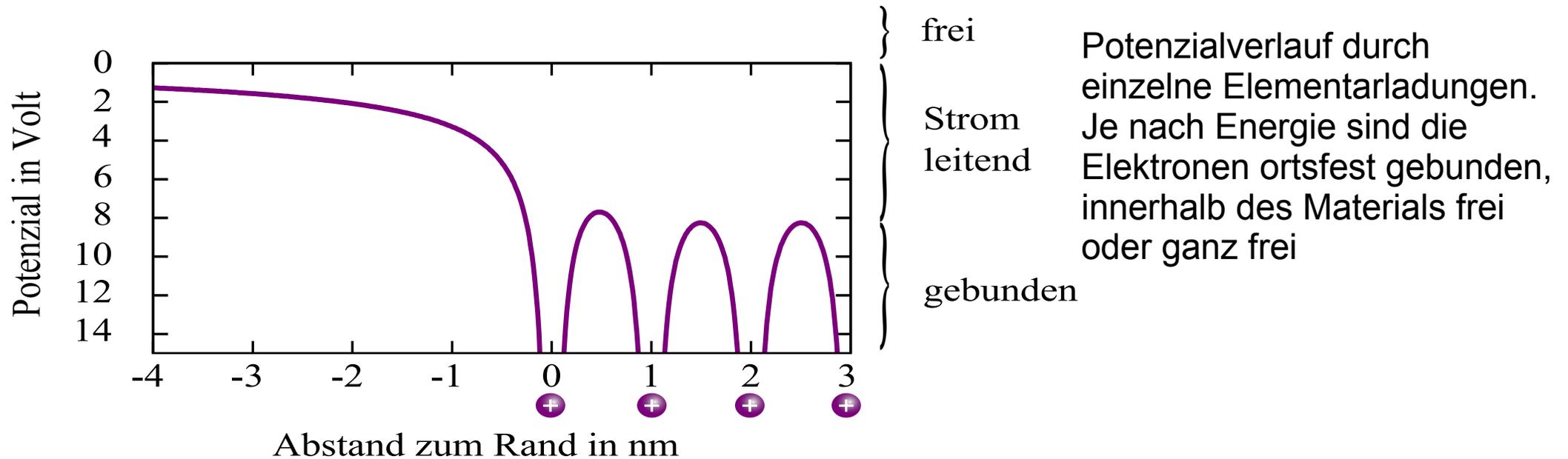


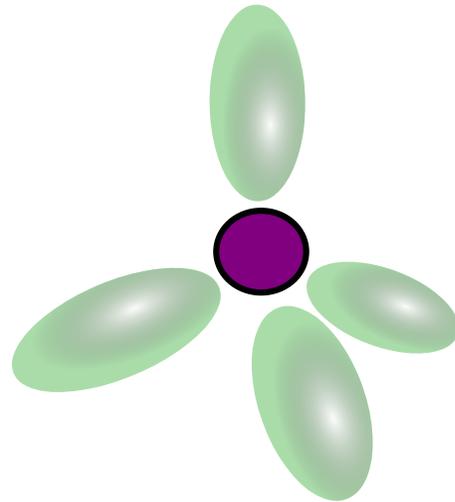
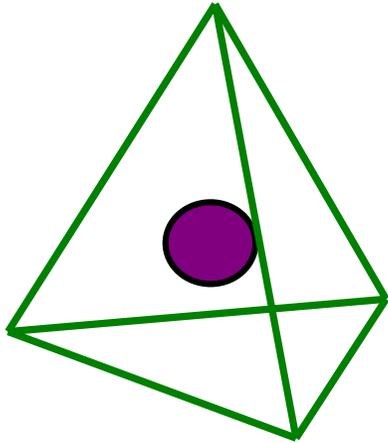
# Elektronische Bauelemente



# Potenzial durch Elementarladungen



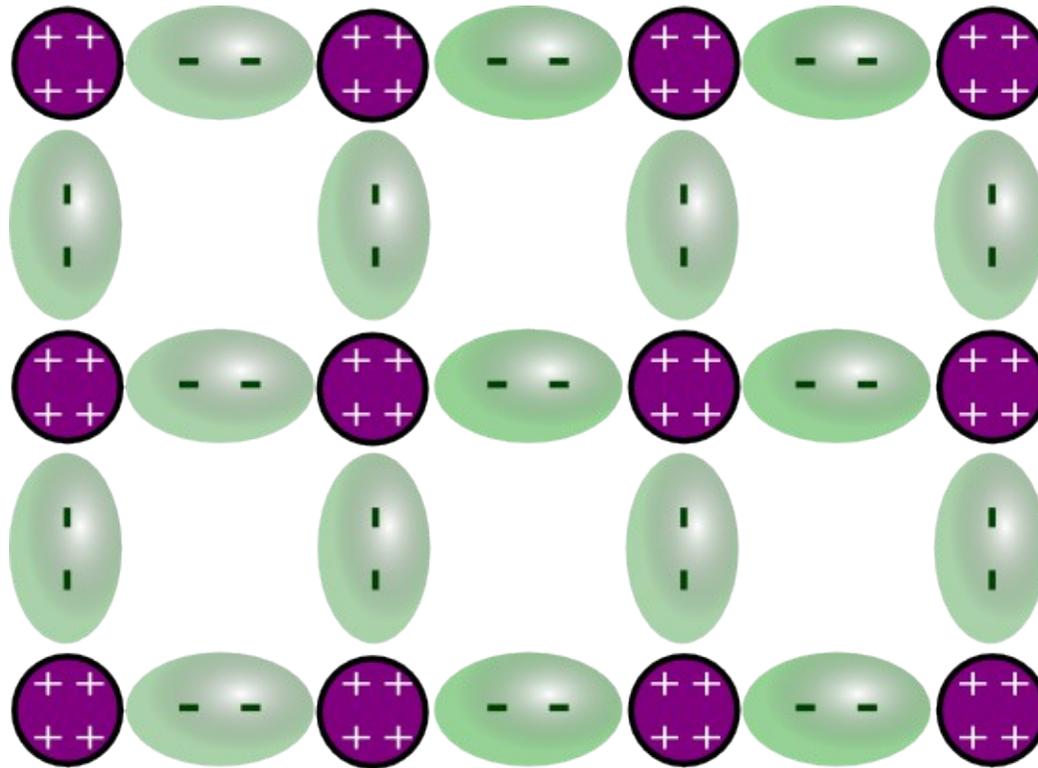
# Siliziumatom



Zur Geometrie des Silizium-Atoms:

Die äußeren Elektronen des Silizium-Atoms halten sich bevorzugt in den hier angedeuteten Räumen auf. Die Achsen dieser sogenannten Orbitale bilden einen Tetraeder

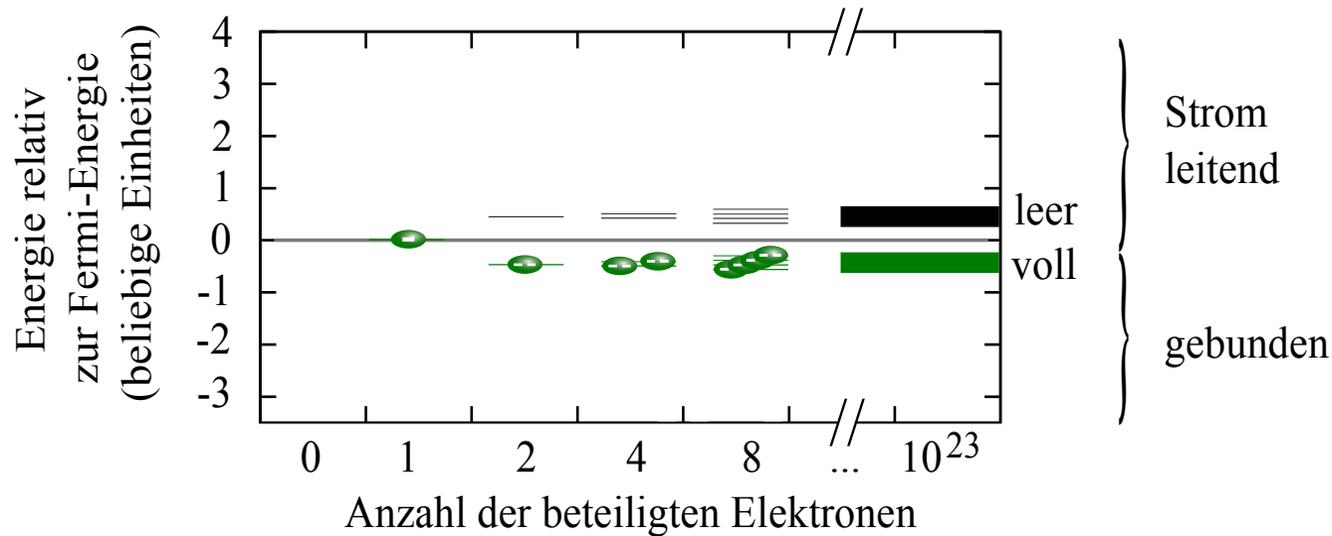
# Siliziumkristall /zweidimensional



Prinzipskizze der  
Silizium-  
Kristallbindungen:  
Die Orbitale der  
Bindungselektronen  
des Siliziums ergeben  
sich durch  
Übereinanderlegen der  
Orbitale der  
Einzelatome



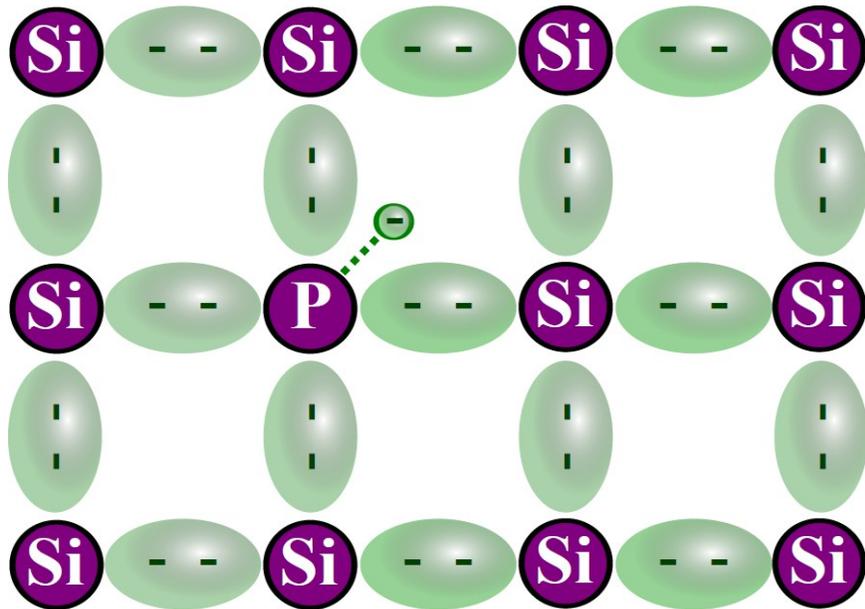
# Entstehung der Energiebänder



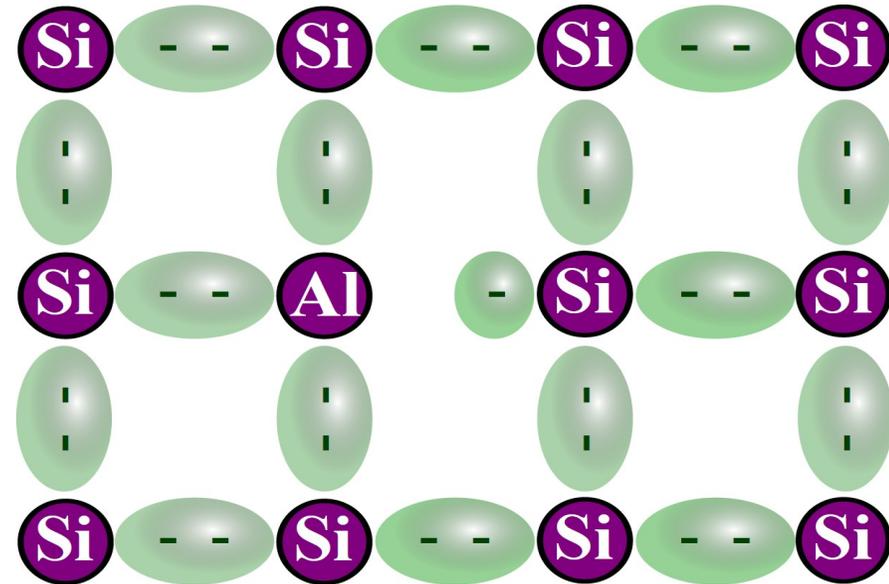
Entstehung der Silizium-Bandstruktur: Hybridorbital für ein Atom (1), Aufspaltung in doppelt besetztes Bindungs-Orbital und leeres Extra-Orbital bei zwei Atomen (2), ... und so weiter. Bei  $n$  Atomen entstehen  $4n$  Energieniveaus, davon gehört die Hälfte zu Bindungsorbitalen. Sie bilden das *Valenzband* (bei niedriger Temperatur voll). Die anderen Orbitale bilden das *Leitungsband* (bei niedriger Temperatur leer)



# Dotierung



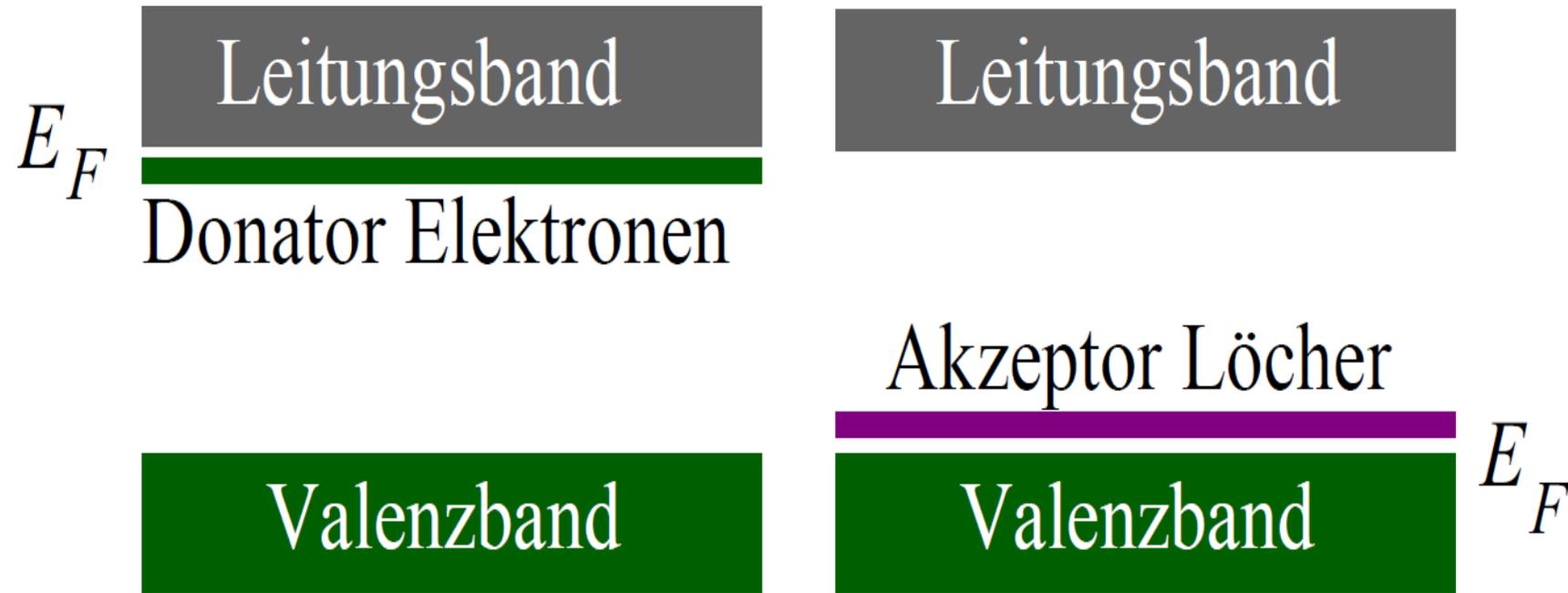
Dotierung mit einem Donator (hier Phosphor): Der Atomrumpf fügt sich in das Kristallgitter ein. Das übrig bleibende Elektron findet kein Bindungs-Orbital



Dotierung mit einem Akzeptor (hier Aluminium): Der Atomrumpf fügt sich in das Kristallgitter ein, aber es fehlt ein Elektron

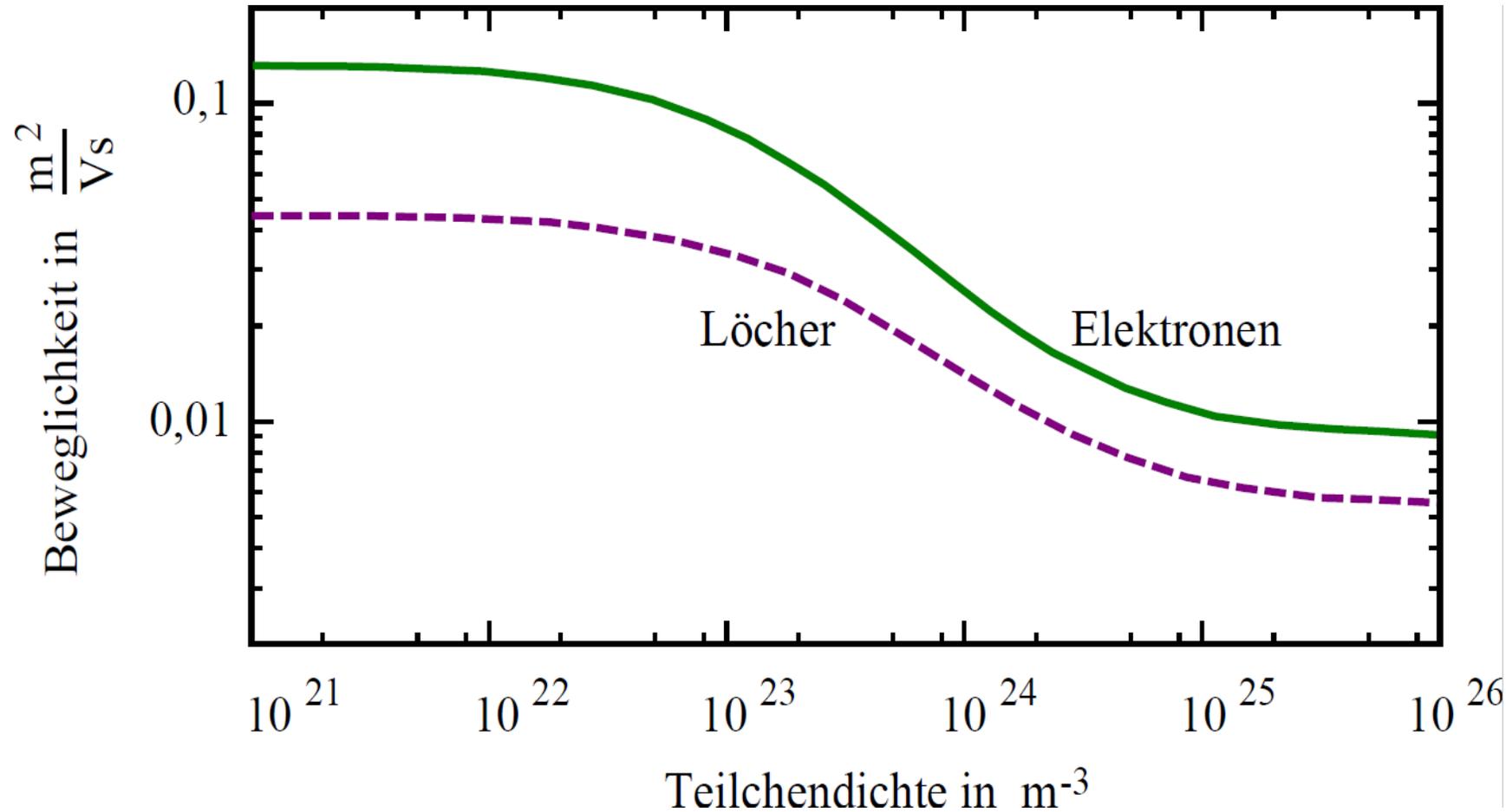


# Energiebänder dotierten Siliziums



Energiebänder beim dotierten Silizium, links Donator-dotiert, rechts Akzeptor-dotiert. Das Leitungsband ist bei  $T = 0K$  leer.

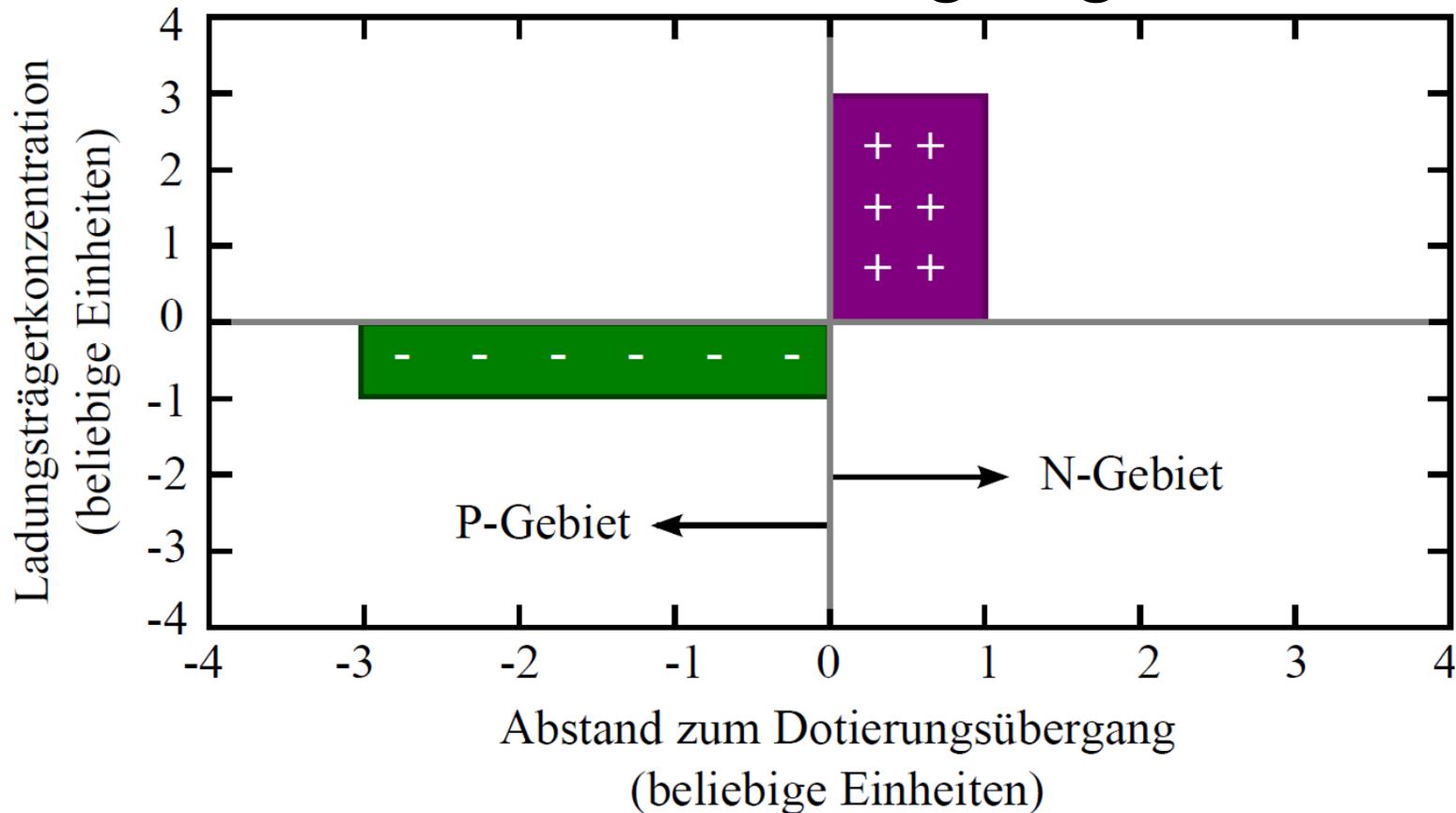
# Beweglichkeit in Silizium



Beweglichkeit für  
Elektronen und  
Löcher  
als Funktion der  
Dichte der  
Dotierungsatome

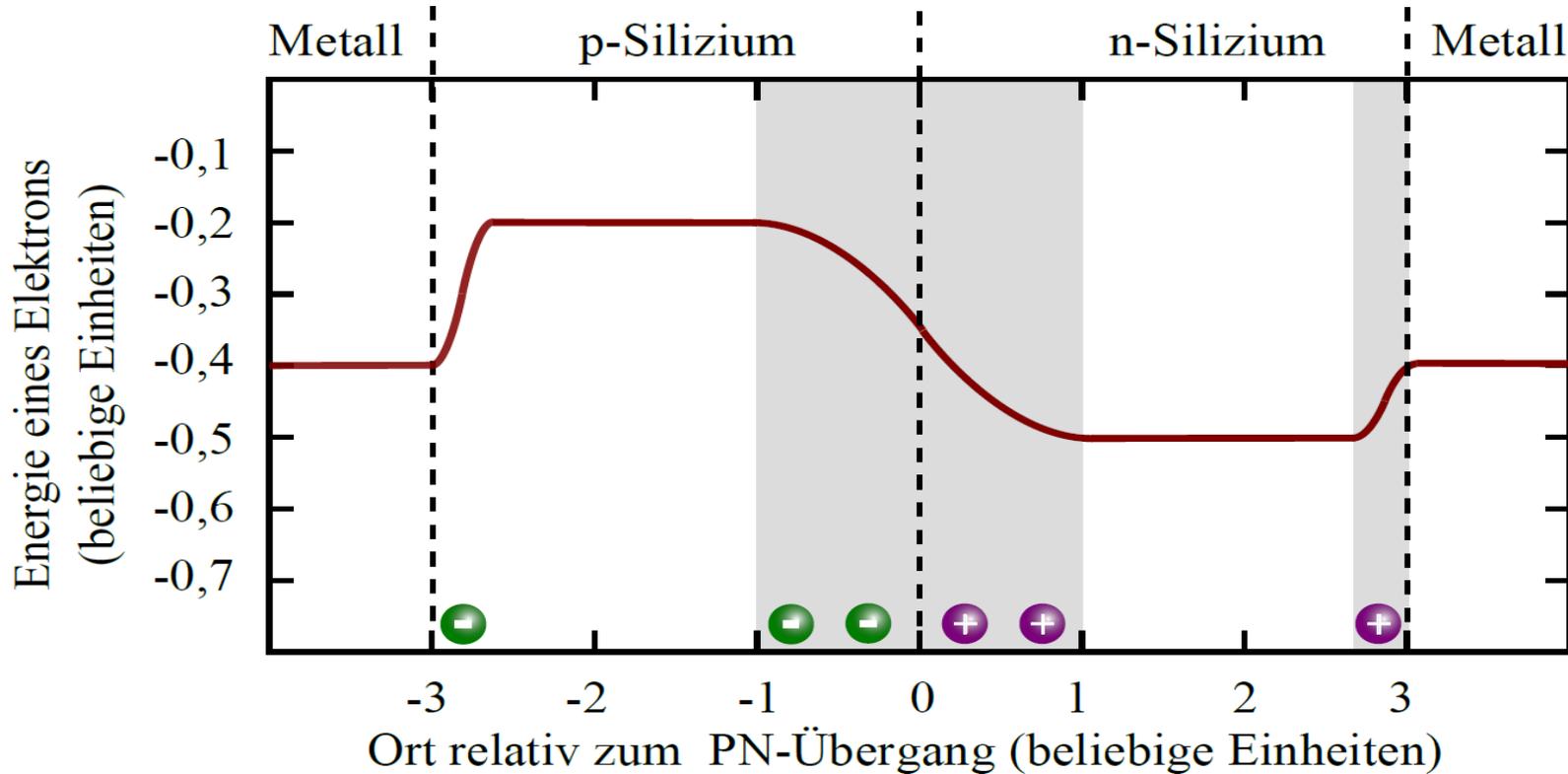


# PN-Übergang



PN-Übergang am Beispiel eines abrupten Wechsels bei  $x = 0$  von einem P-Gebiet links auf ein dreimal so hoch dotiertes N-Gebiet rechts. Die Ladungsdichten der verbleibenden Atomrümpfe sind proportional zur jeweiligen Dotierung

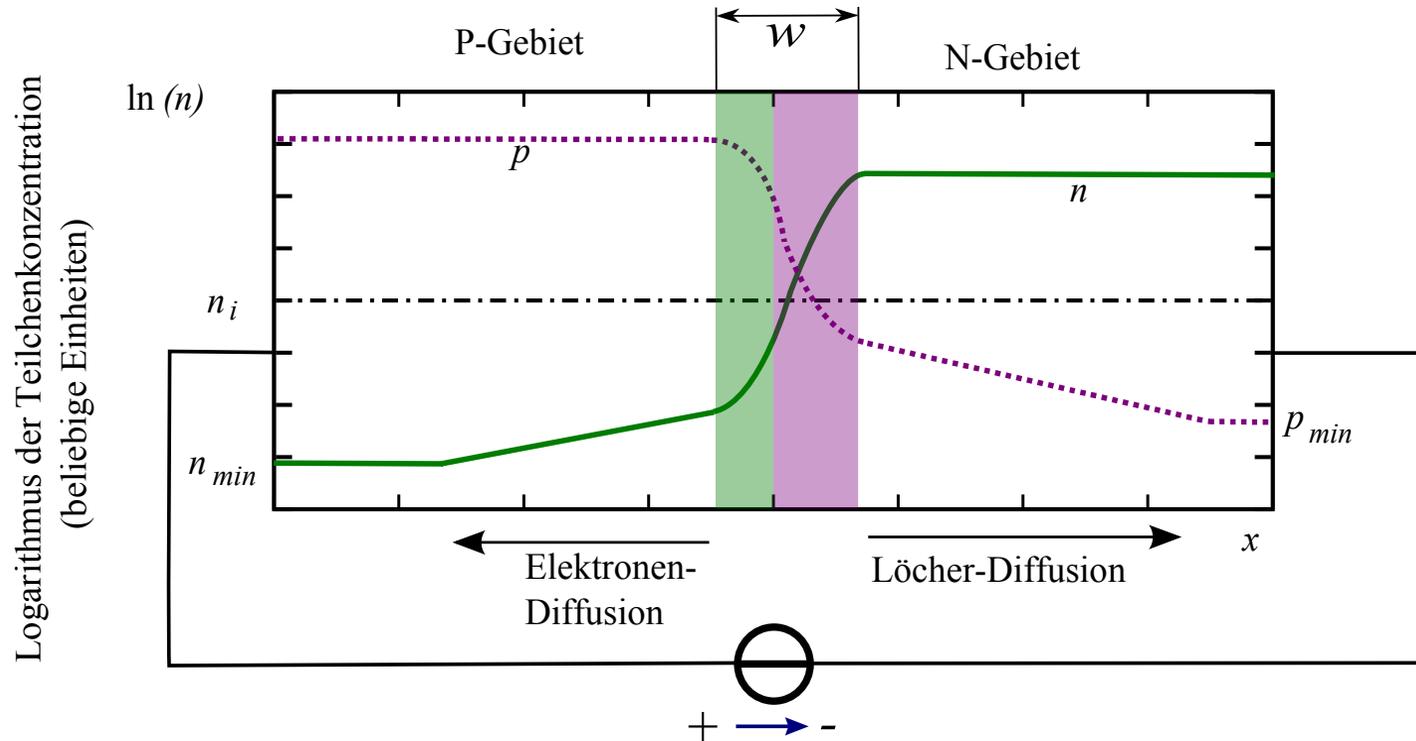
# Diffusionsspannung & Kontaktpotentiale



Veränderung der potenziellen elektrischen Elektronenenergie auf dem Weg Metall zum Halbleiter P-Gebiet, zum Halbleiter N-Gebiet und zurück zum Metall.  
Das N-Gebiet gibt sowohl an das P-Gebiet als auch an das Metall Elektronen ab, ist also gegenüber beiden positiv geladen. Die Summe der Energieänderungen ist Null.



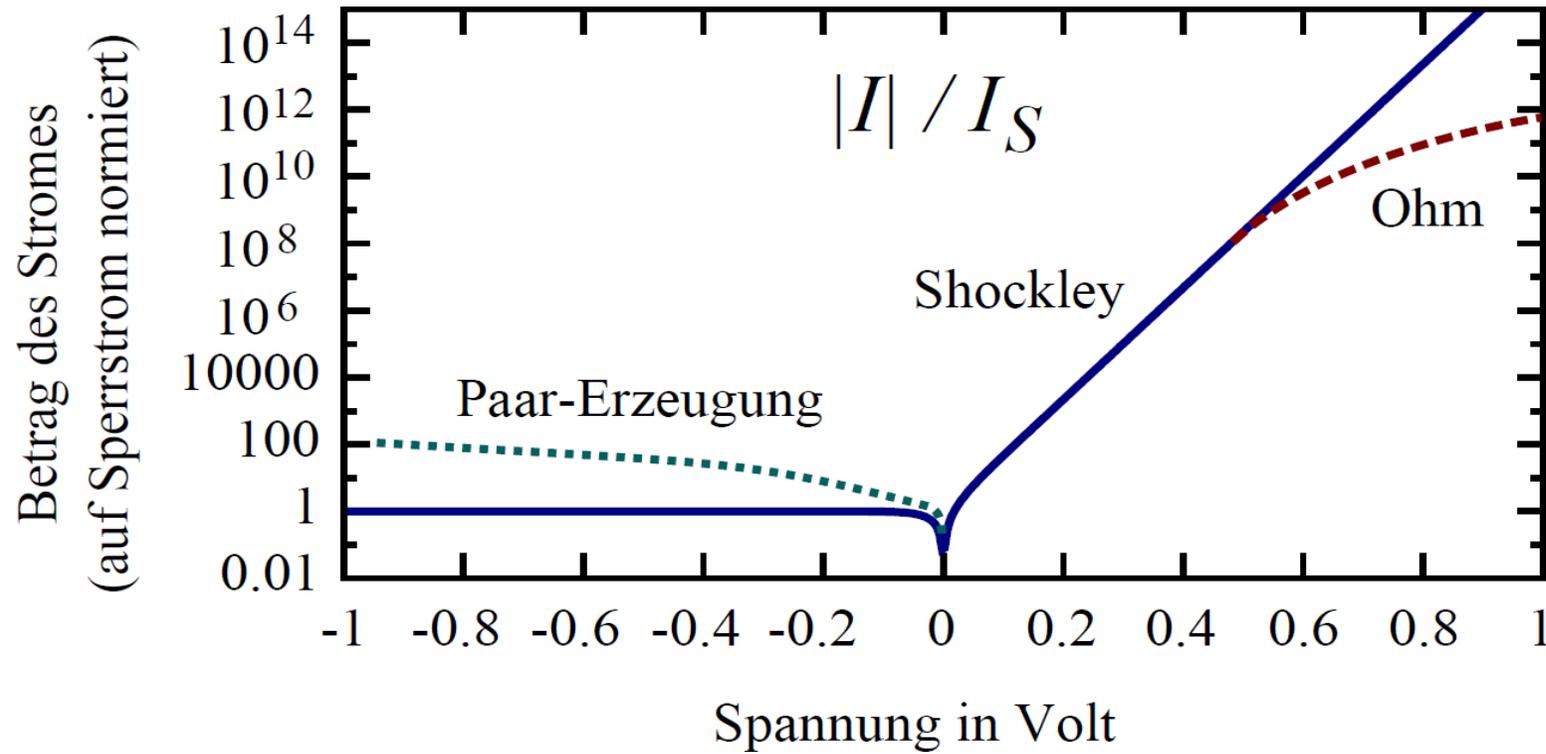
# Diode



Verlauf der Ladungsträgerkonzentration einer vorwärts gepolten Diode



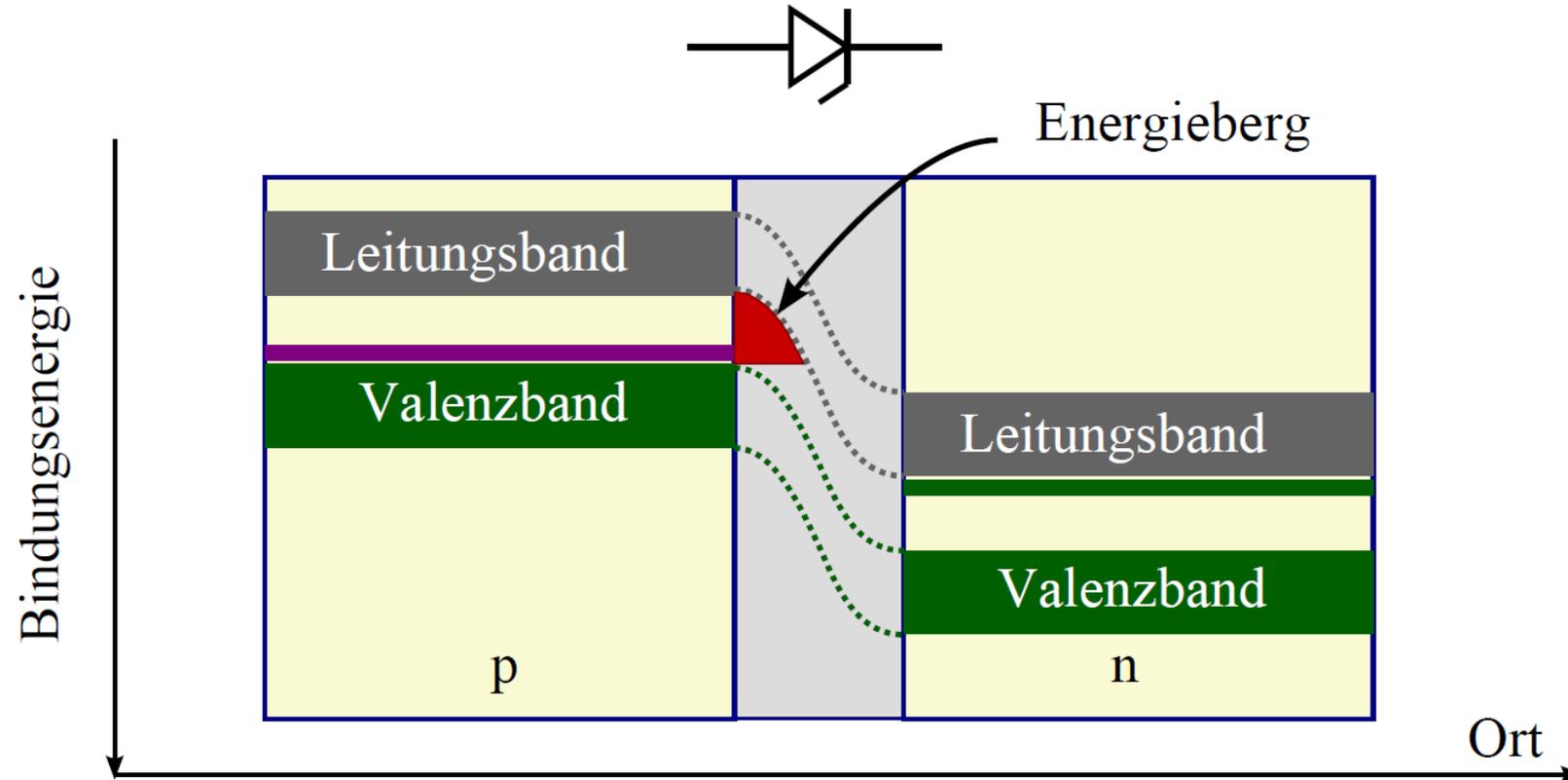
# Diodenkennlinie



Der auf den Sperrstrom normierte Strombetrag einer Siliziumdiode. Die durchgezogene Linie ist repräsentiert die Shockley-Gleichung. Die gestrichelte Linie zeigt das tatsächliche Verhalten bei großen Strömen, die gepunktete Linie das tatsächliche Verhalten im Sperrbereich



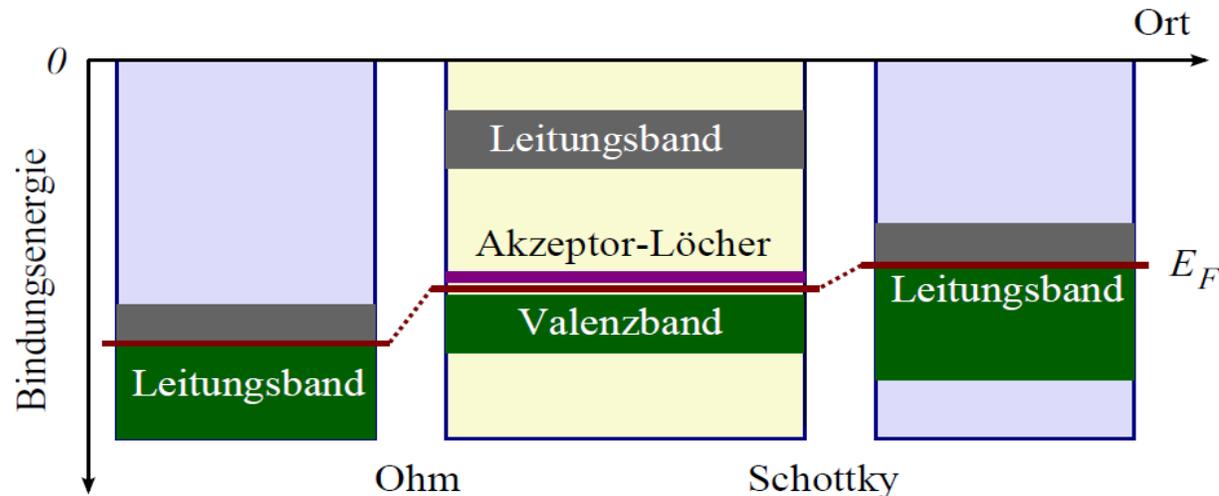
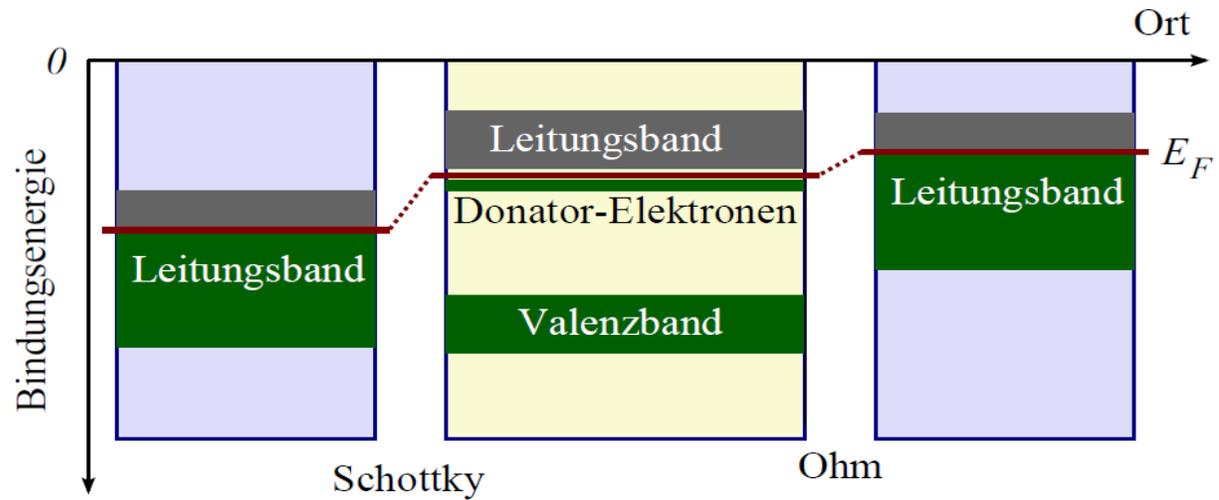
# Zener-Diode



Zur Wirkungsweise einer in Rückwärtspolung betriebenen Zener-Diode: Ein Elektron aus dem Valenzband des P-Gebietes, welches durch den Tunneleffekt unter dem Energieberg hindurchkommt und die Unterkante des Leitungsbandes erreicht, trägt zum Rückwärtsstrom bei.



# Metall-Halbleiter Kontakt



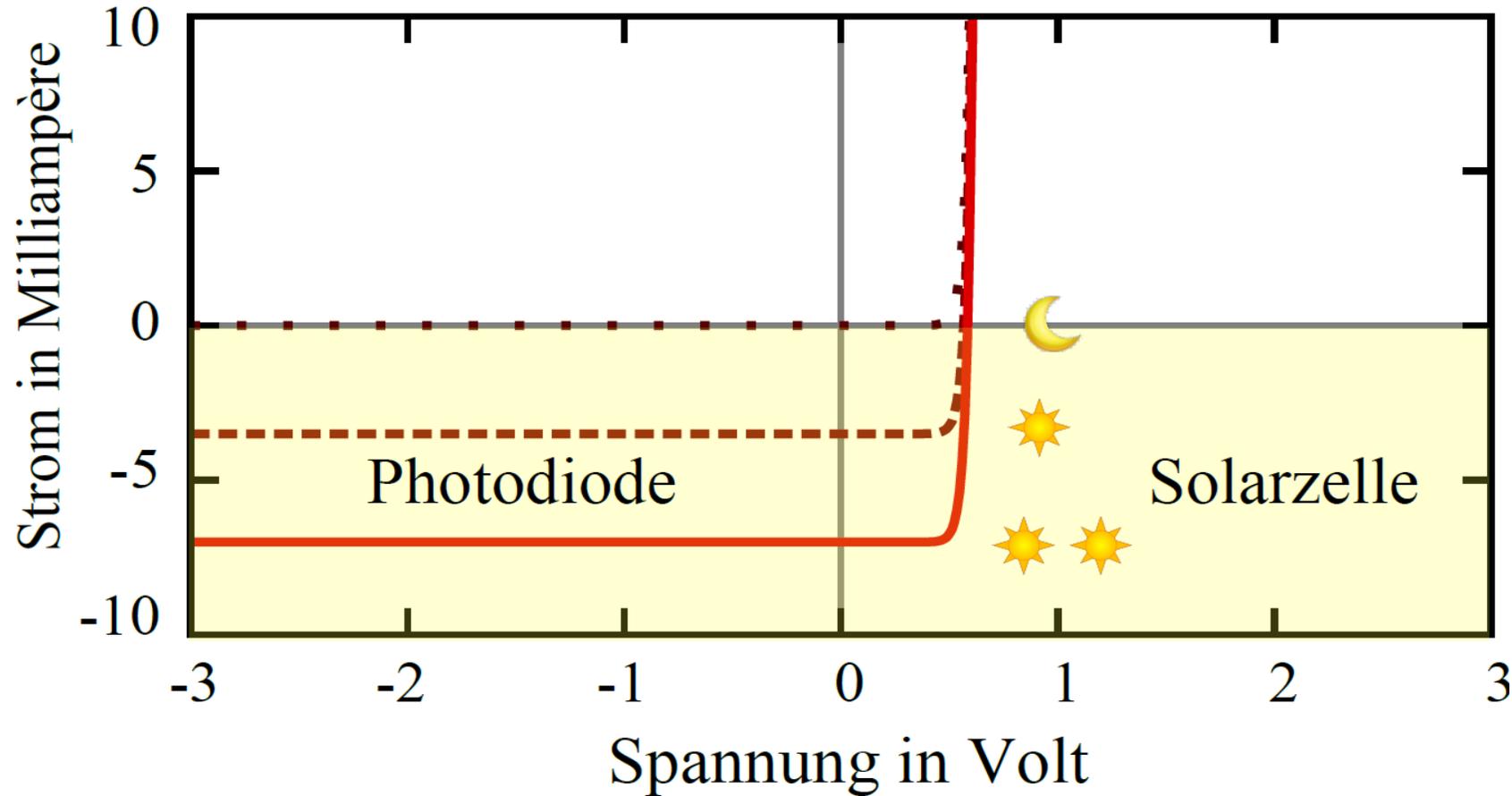
Energieniveaus von Halbleitern (in der Mitte) und Metallen vor einer Kontaktierung.

Ist der Halbleiter mit Donatoren dotiert, so entsteht eine Verarmungszone durch Abwandern der Halbleiter-Elektronen (Schottky).

Ist der Halbleiter mit Akzeptoren dotiert, so führt das Einwandern von Metall-Elektronen in die Akzeptor-Löcher zur Bildung einer Verarmungszone



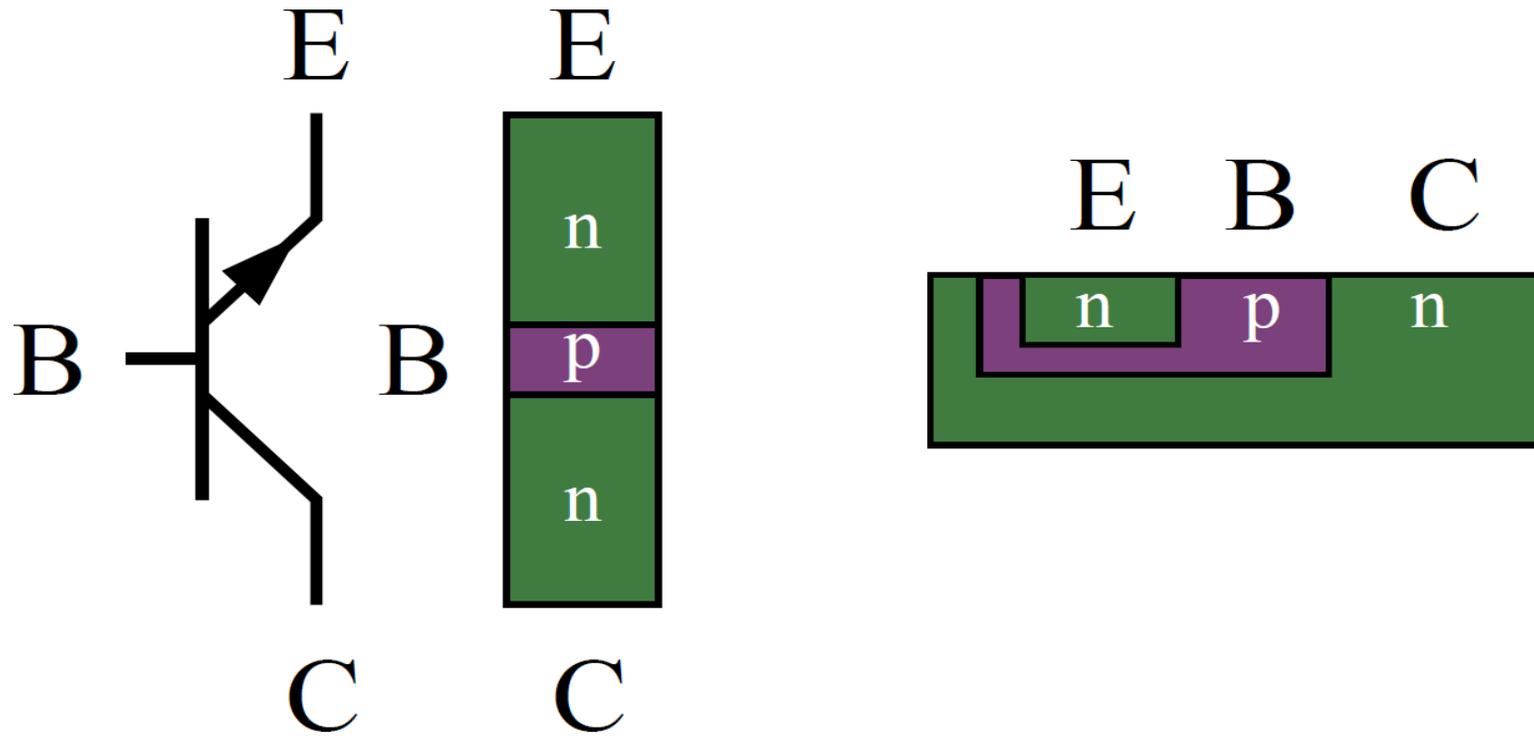
# Diode und Licht



Kennlinie einer lichtempfindlichen Diode: Je mehr Licht einstrahlt desto weiter wird die Kennlinie nach unten verschoben. Bei  $UI < 0$  wird Licht in elektrische Energie umgewandelt

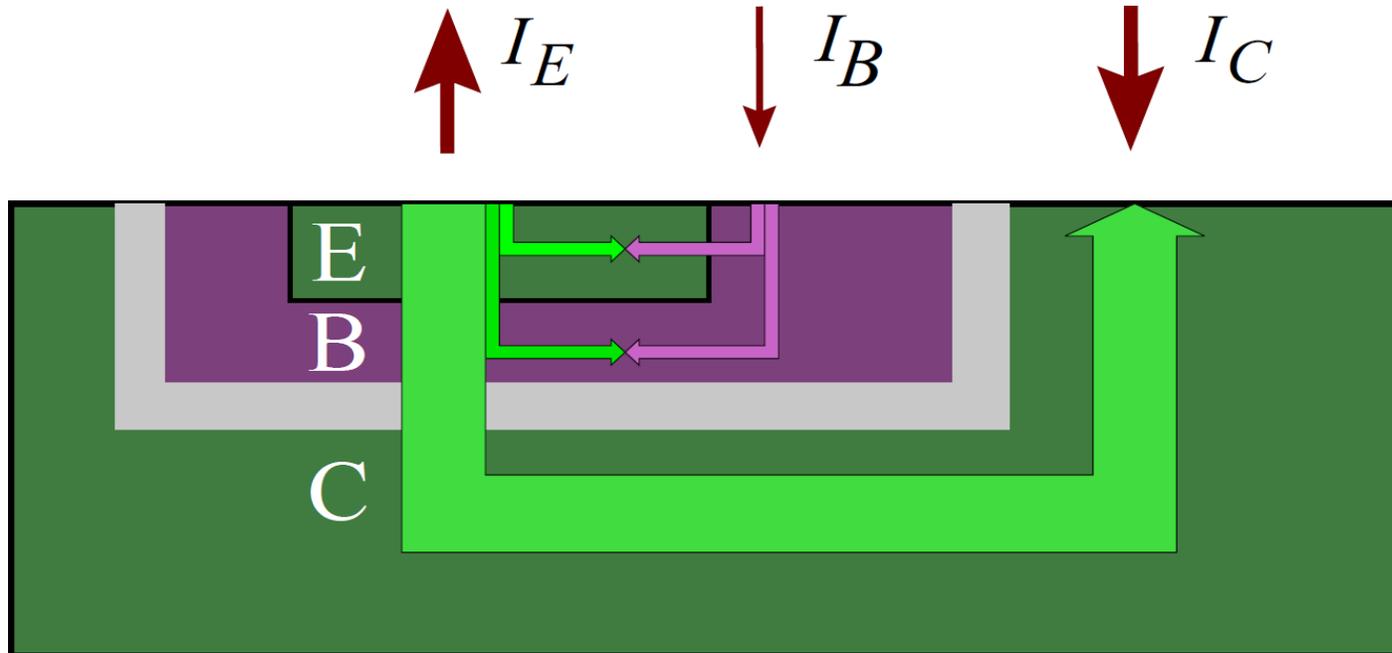


# NPN Transistor



NPN Bipolar-Transistor als Schaltsymbol, Prinzipskizze und im Querschnitt

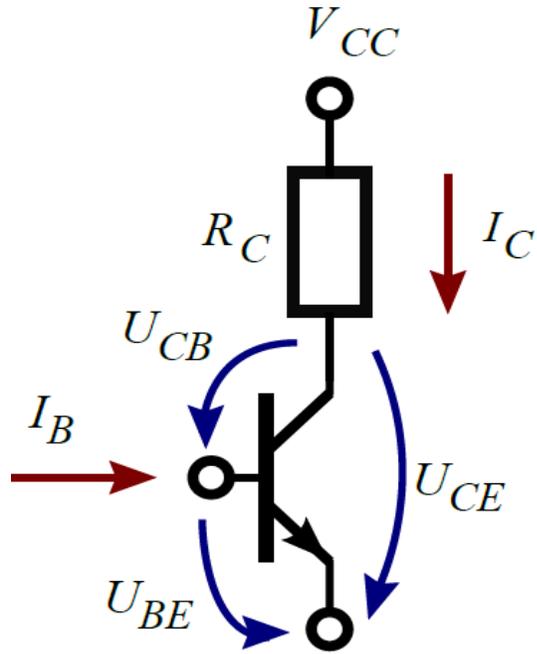
# Ladungsträgerbewegung im Normalbetrieb



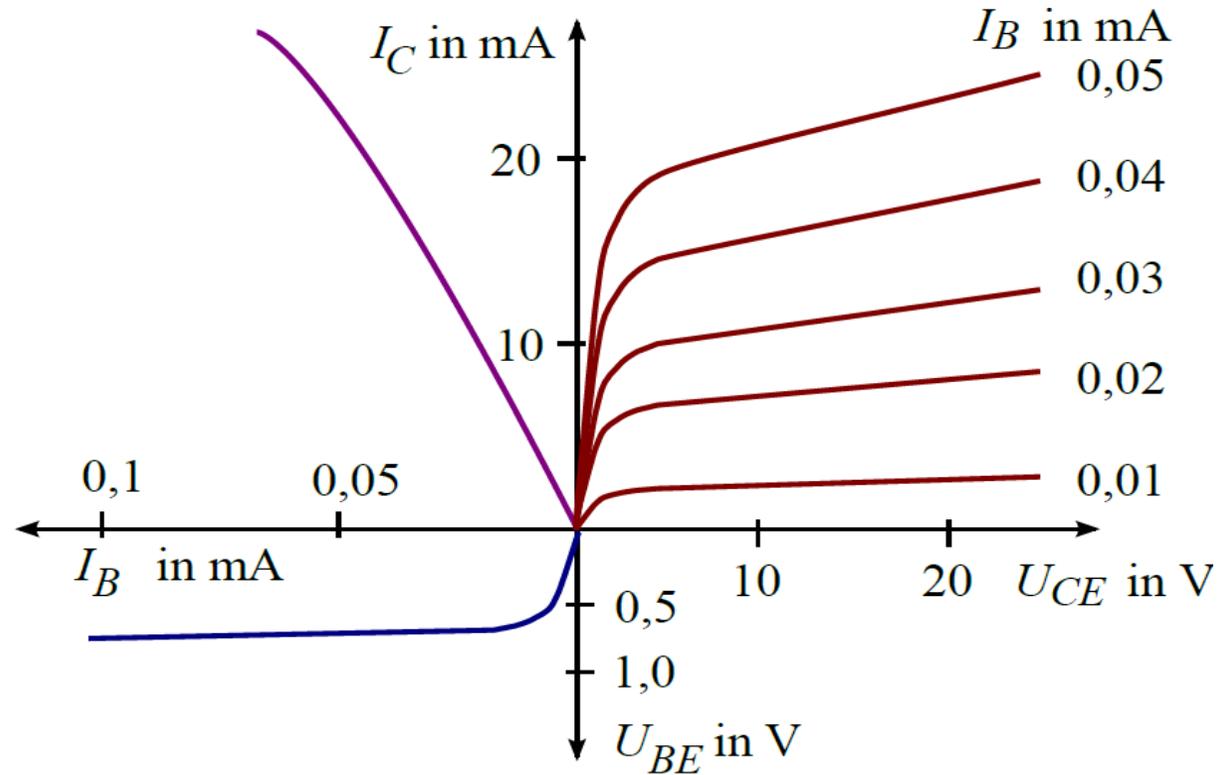
Ladungsträgerbewegungen im Bipolar-Transistor bei gesperrter Basis-Kollektor-Diode. Die Elektronenbewegungen sind hell, die Löcherbewegungen dunkel dargestellt. Die Pfeile oben geben die technischen Stromrichtungen an



# Transistor-Kennfeld



a) Schaltung

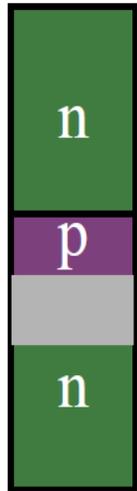


b) Kennfeld



# Betriebszustände

vorwärts



rückwärts



gesperrt



satt



E

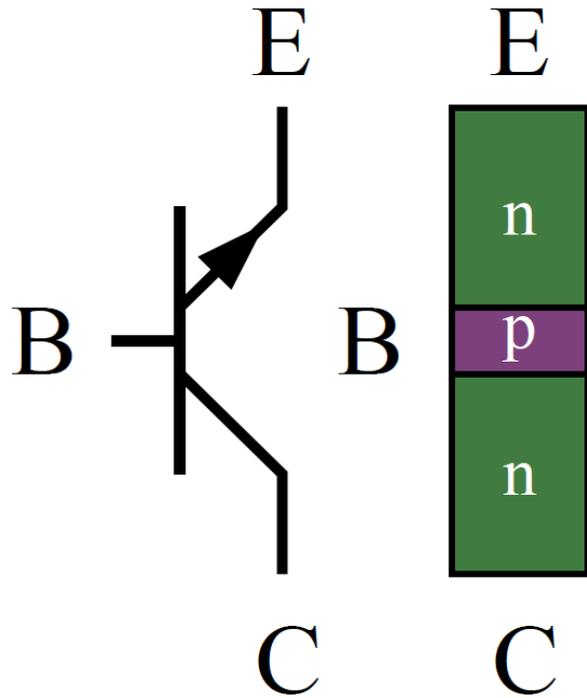
B

C

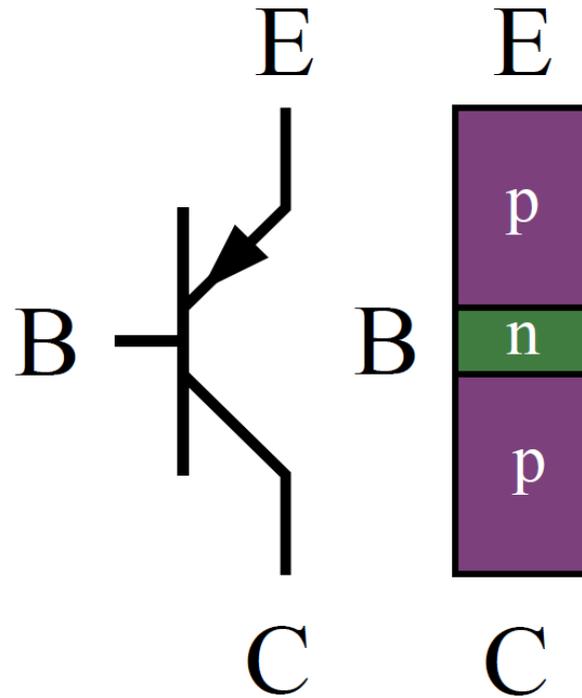
Die Operationsmodi des Transistors von links nach rechts, je nachdem, ob die großen Potenzialbarrieren unten, oben, beidseitig oder gar nicht vorhanden sind. Der Normalbetrieb ist der Vorwärtsbetrieb



# NPN ↔ PNP



a) NPN-Transistor



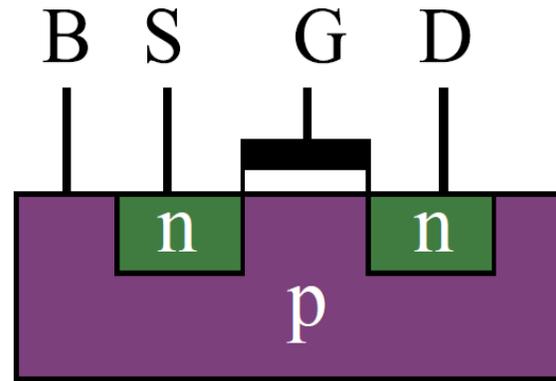
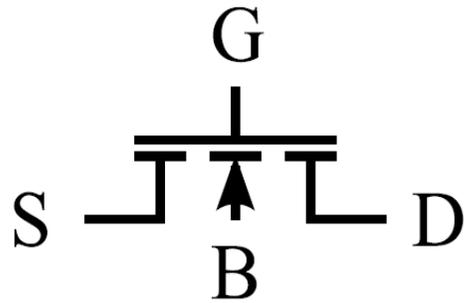
b) PNP-Transistor

NPN- und PNP-Transistor neben ihren Schaltsymbolen. Der Pfeil zeigt immer die Basis-Emitter-, bzw. Emitter-Basis-Diode; in jedem Fall auf ein N-Gebiet

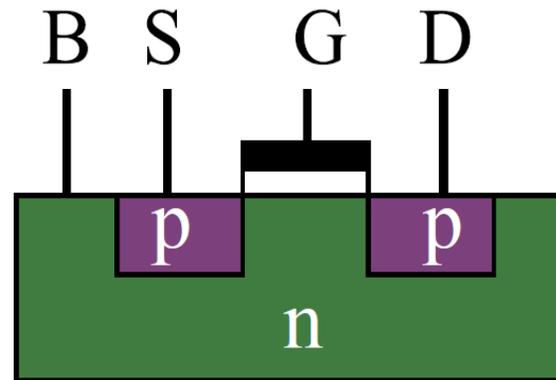
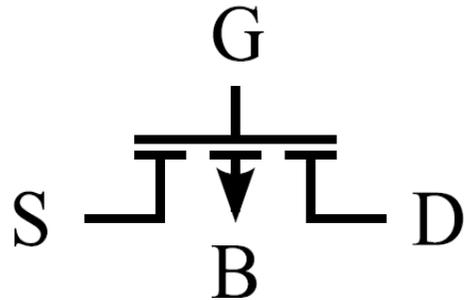


# MOS Transistor

a)



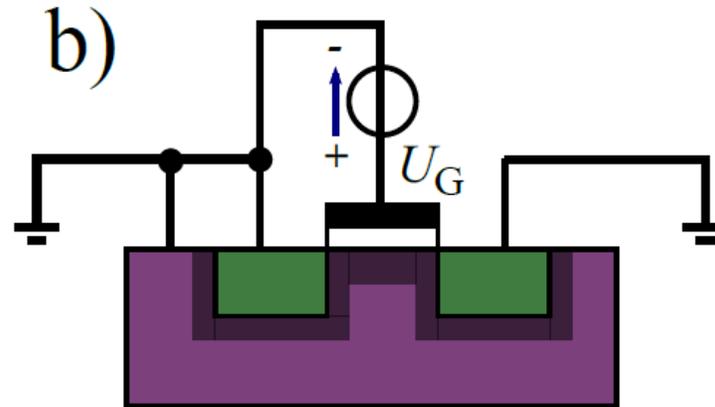
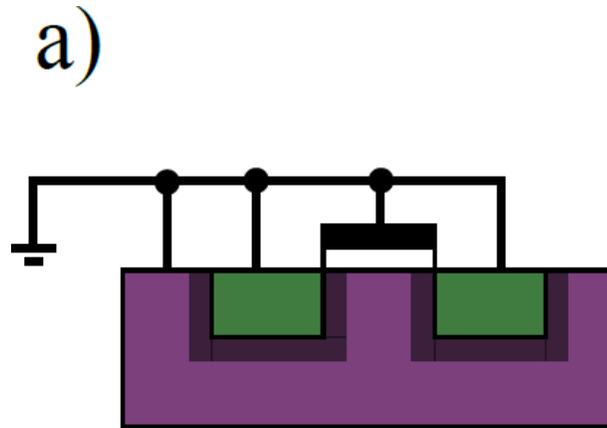
b)



NMOS-Transistor (oben) und PMOS-Transistor (unten) mit den Anschlüssen Body (B), Source (S), Gate (G) und Drain (D). Was Source und was Drain ist, bestimmen die angeschlossenen Potenziale. Die Source ist *Quelle der Ladungsträger*, die Drain *Senke der Ladungsträger*

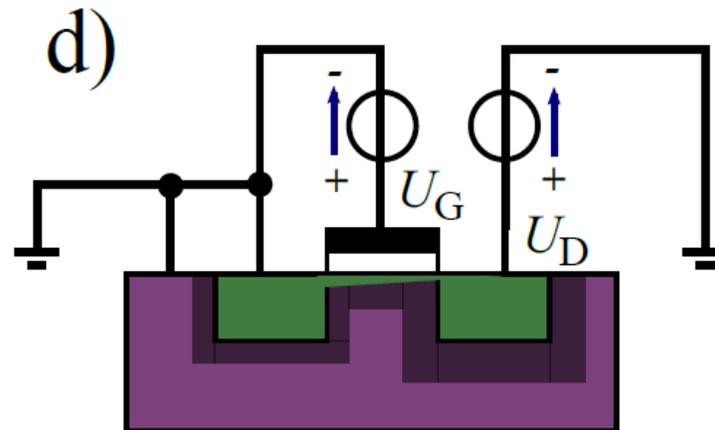
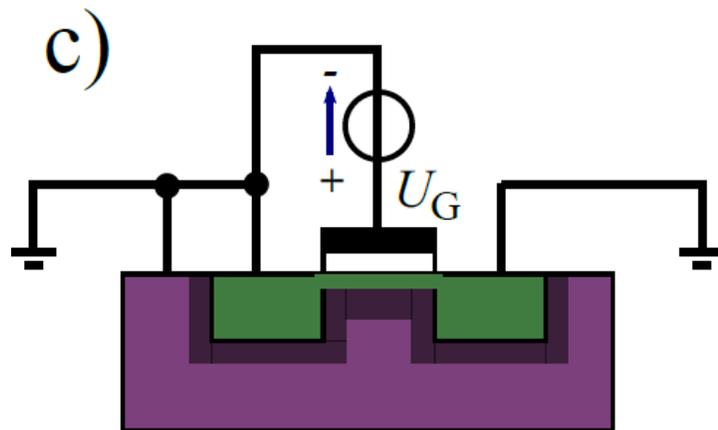


# MOS Funktion



a) ohne externe Spannung PN-Sperrschichten,

b) bei kleiner positiver Gate-Body-Spannung Entstehung einer Verarmungszone unter dem Oxyd,

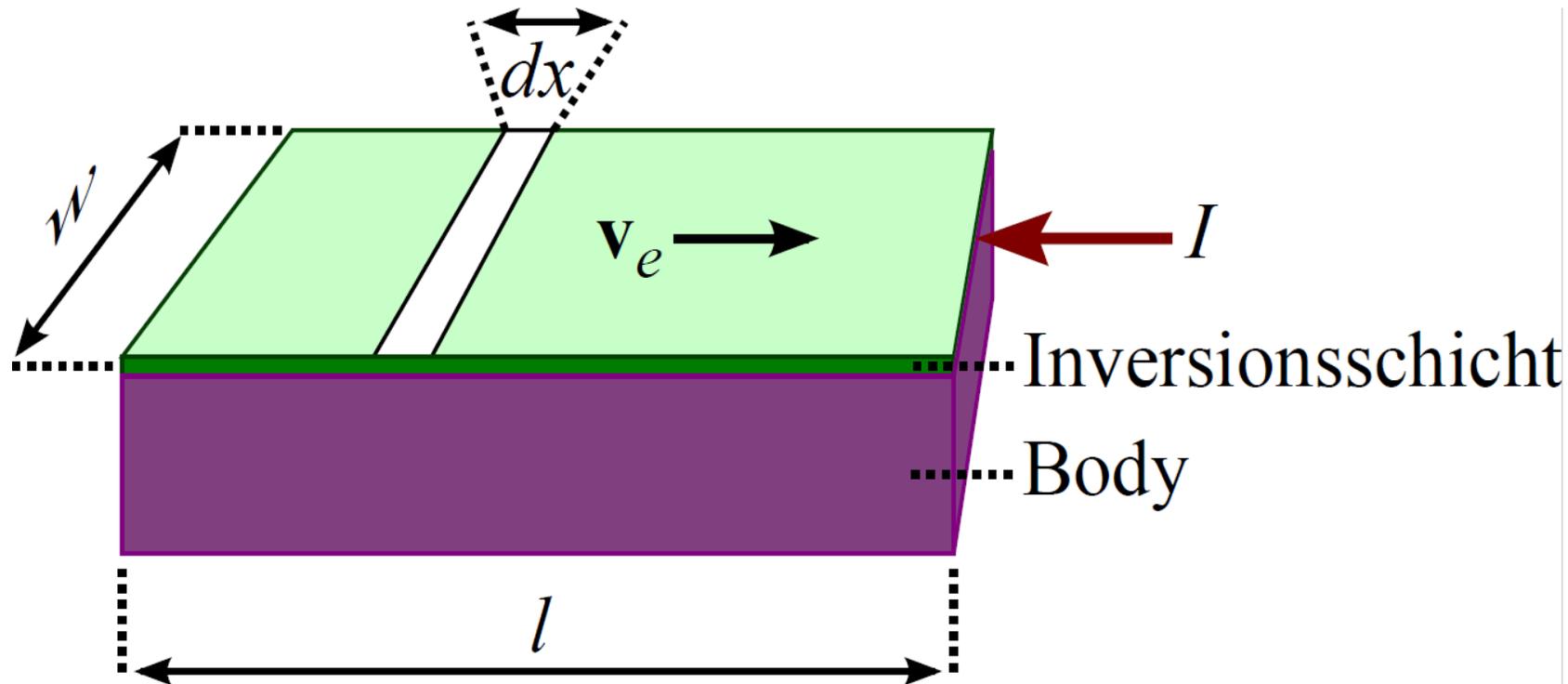


c) bei  $U_{GS} > U_{Th}$  Inversionskanal mit Kontakt zu N-Gebieten

d) bei  $U_{DS} > 0$  Strom von Drain zur Source

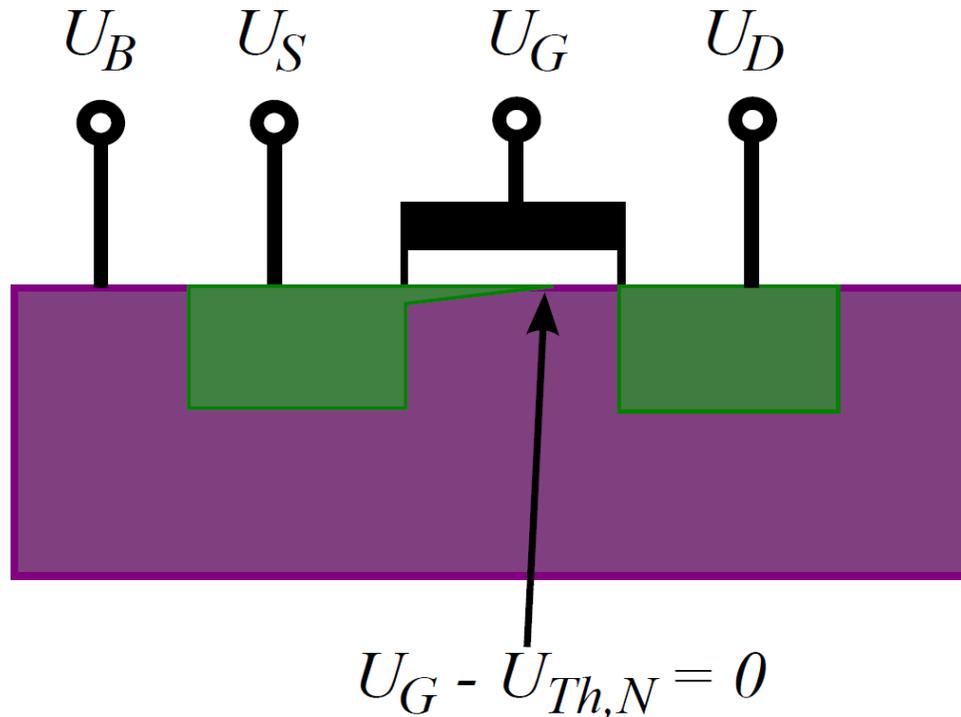


# Zur MOS Anlaufkennlinie



Zur Herleitung der MOS-Kennlinie im Anlauf: Bei einem NMOS-Transistor mit der Weite  $w$  und der Länge  $l$  bewegen sich die Elektronen mit einer Geschwindigkeit  $v$  von der Source zur Drain und ergeben einen Strom  $I$  von der Drain zur Source

# Der abgeschnürte MOS Transistor



Spannungen an einem abgeschnürten NMOS-Transistor:

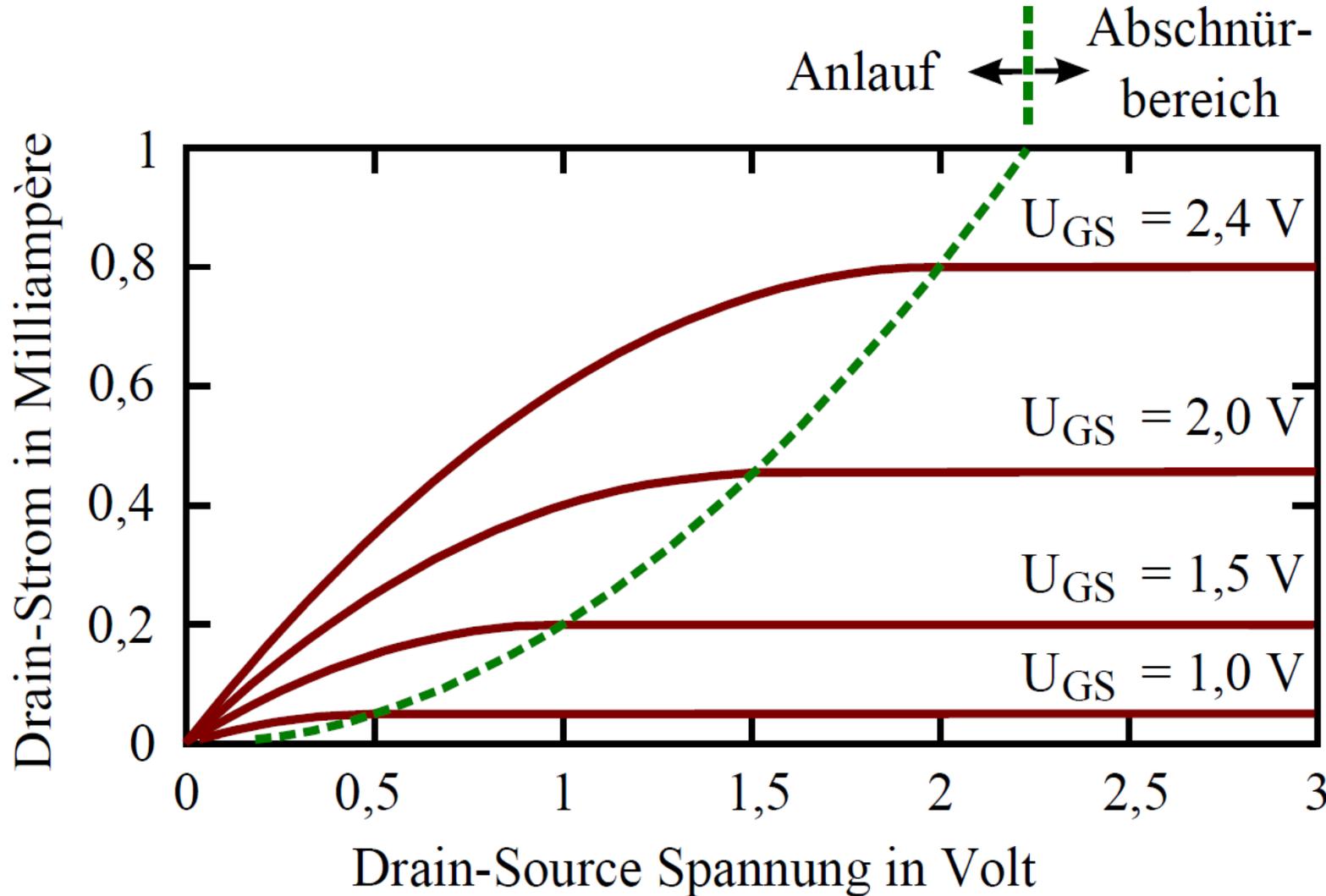
Wenn

$$U_{GD} < U_{Th,N}$$

wird, erreicht der Kanal nicht mehr das Drain-Ende. Das Potenzial am Kanal-Endpunkt hängt nur von  $U_G$  ab



# MOS Kennlinie



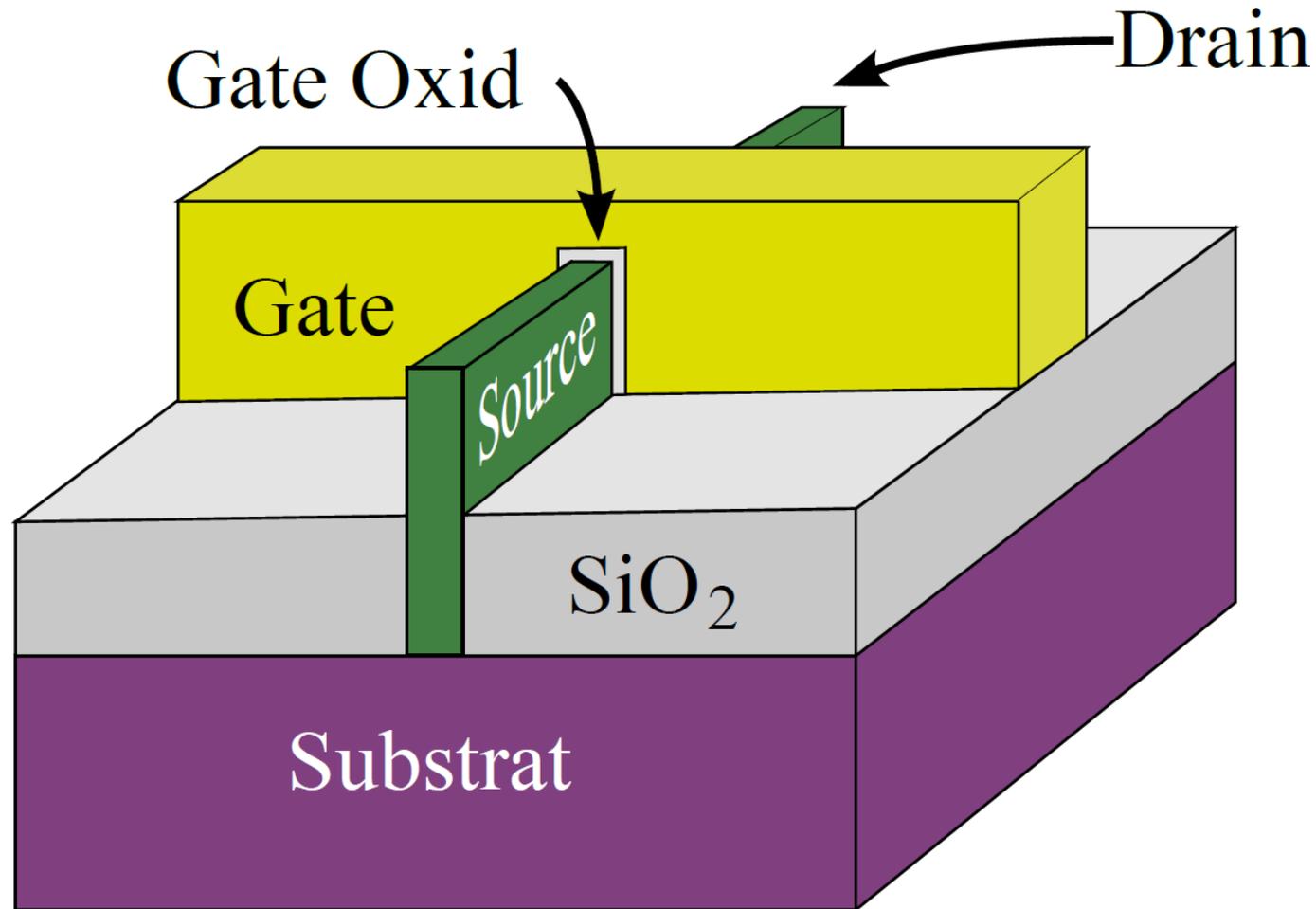
Die Drain-Strom-Spannungs-Kennlinie eines MOS-Transistors in nullter Näherung;

links der gepunkteten Parabel ist er im Anlauf,

rechts im Abschnürbereich



# 3D Transistor



Bei diesem Transistor verläuft der Kanal wie an den Wänden eines Tunnels entlang.  
Der dargestellte Transistor ist etwa 22 nm lang und Teil eines Intel-Prozessors

# Leistungshalbleiter Bauformen



Power-MOS



Thyristoren



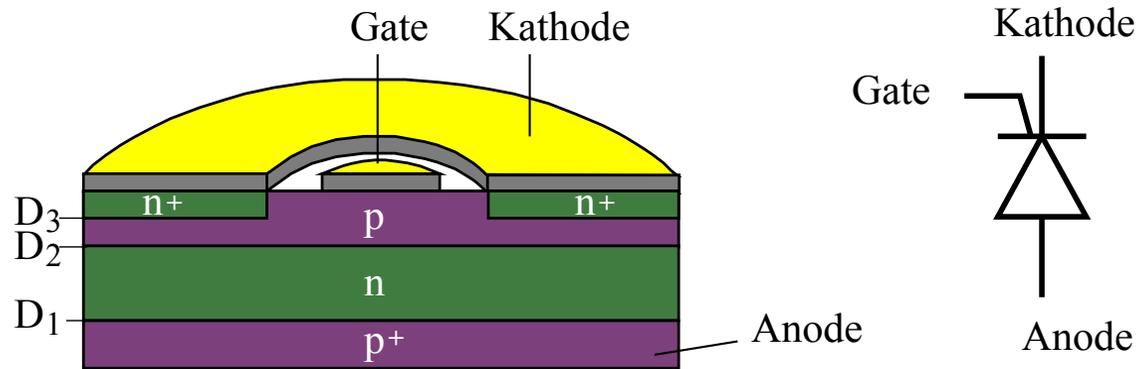
VDMOS



IGBT

Typen und Bauformen  
verschiedener  
Leistungshalbleiter-  
Bauelemente.  
Für alle Typen gibt es  
verschiedene Bauformen

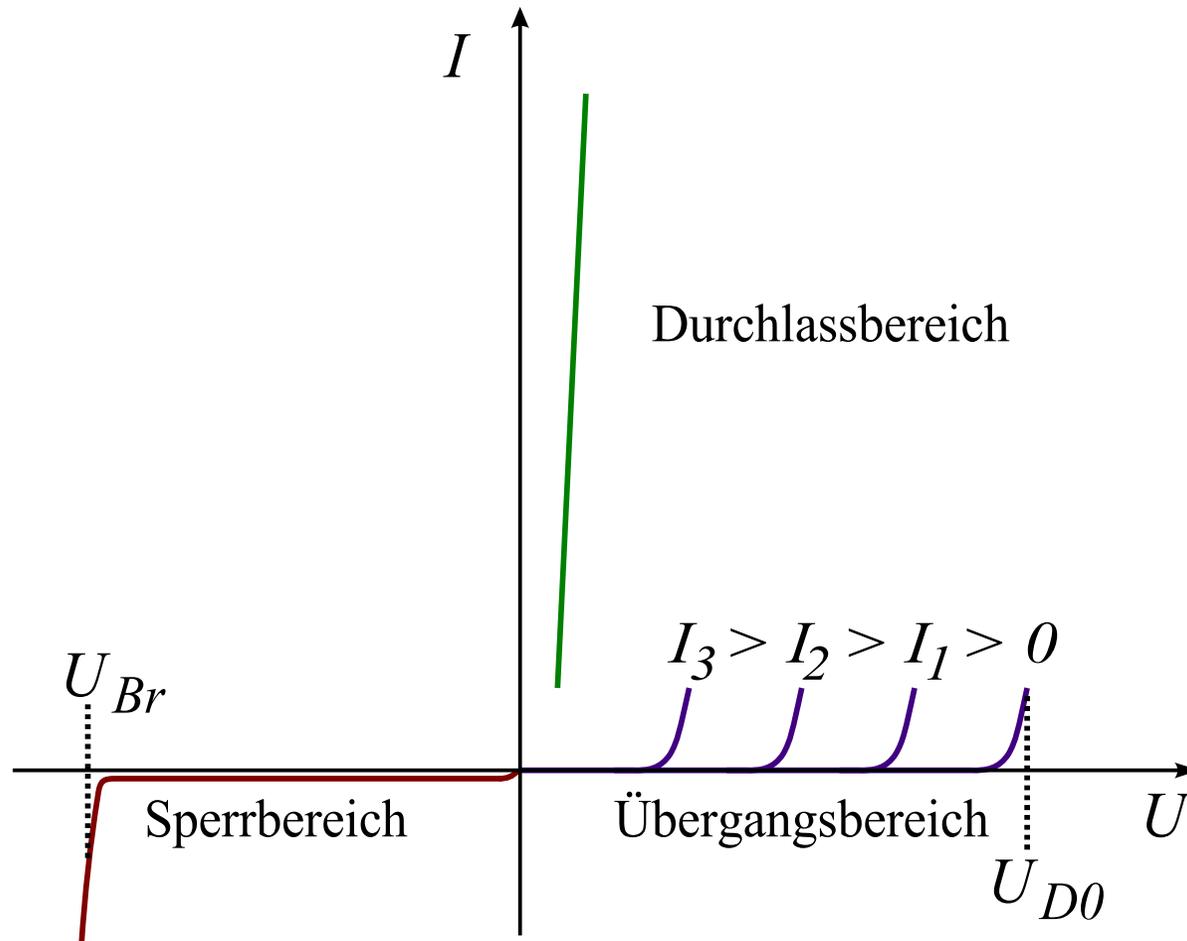
# Thyristor



Der prinzipielle Aufbau eines Thyristors und sein Schaltsymbol. Dieses verdeutlicht seine Funktion als einschaltbare Diode

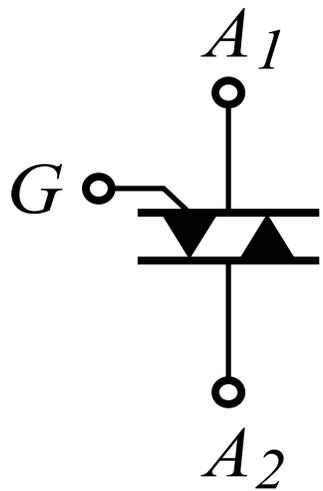


# Thyristorkennlinie

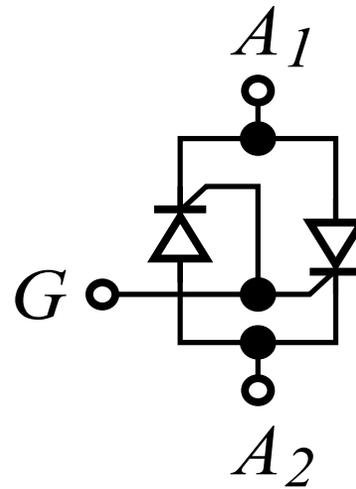


Eine typische Thyristorkennlinie; links unten in Rot der Sperrbereich, rechts in Magenta der Übergangsbereich, gezeichnet für vier Werte des Gate-Stroms, in Grün der Durchlassbereich

# TRIAC

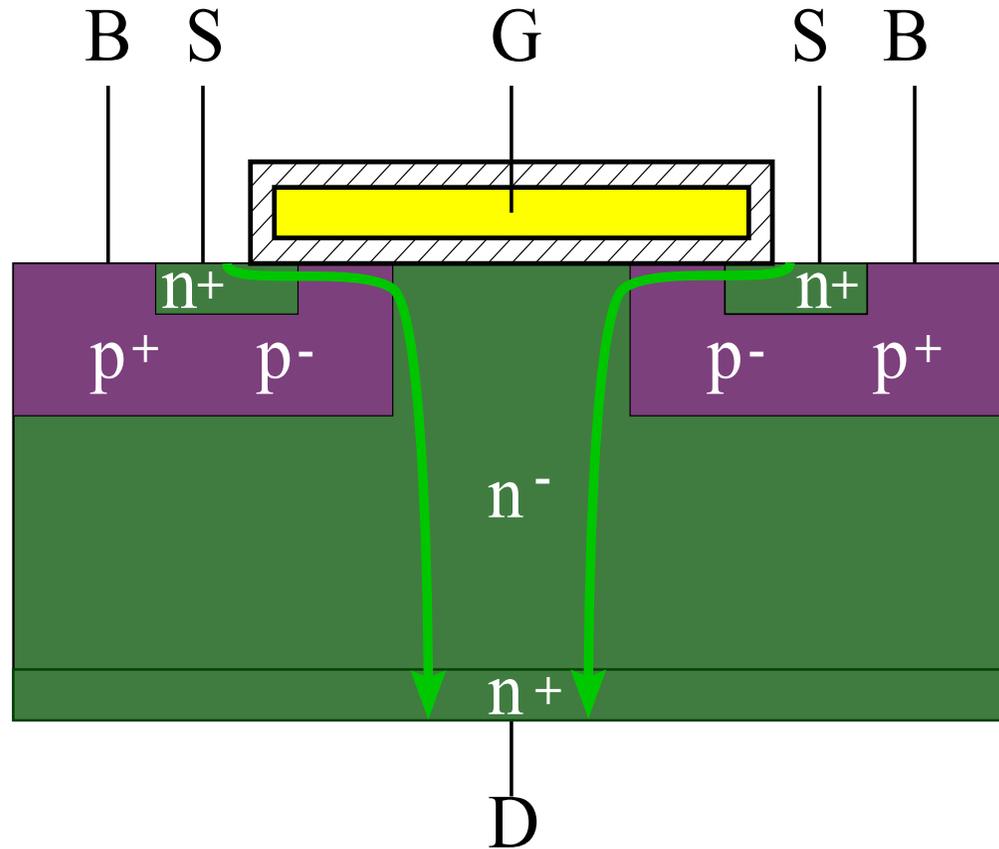


← →  
äquivalent



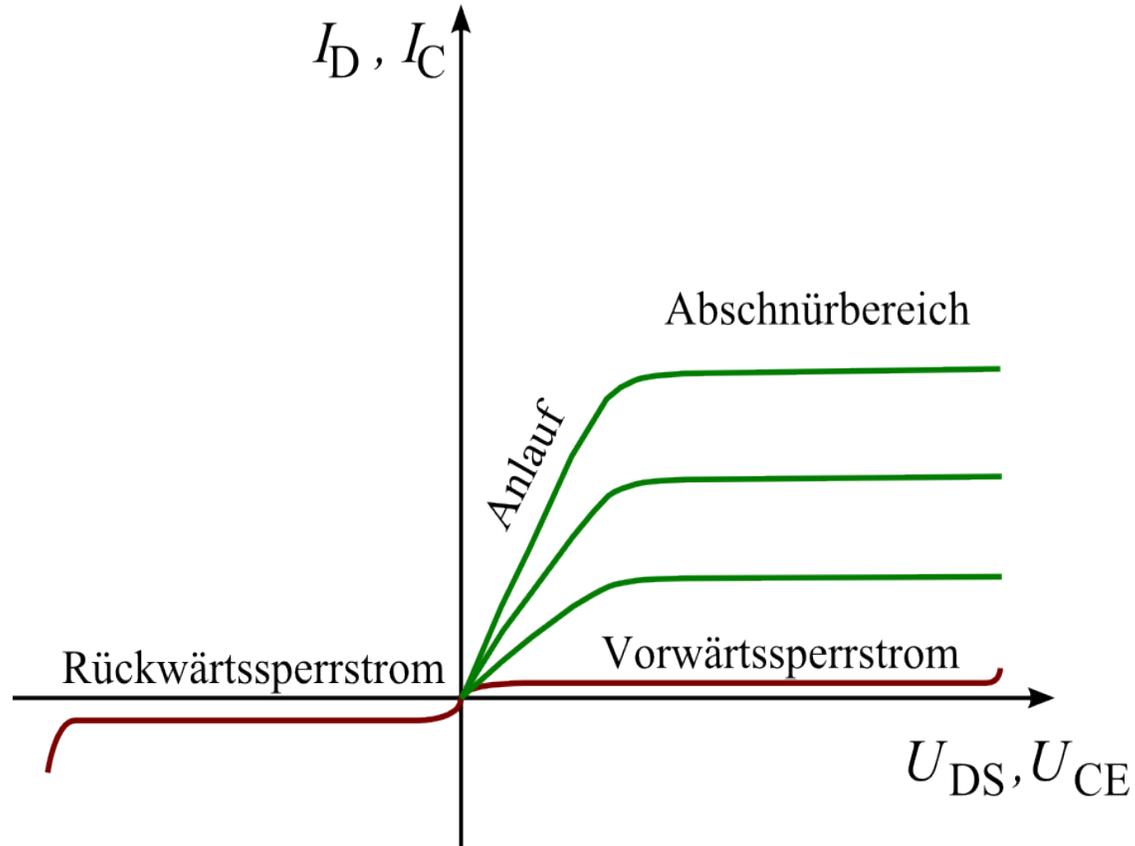
Das Schaltsymbol des  
TRIACs (links)  
und seine interne Struktur  
(rechts)

# VDMOS



Querschnitt durch einen Leistungs-MOS-Transistor vom Typ VDMOS mit den Anschlüssen Body (B), Source (S), Gate (G) und Drain (D). Der schraffierte Bereich ist Siliziumdioxid. Der Weg der Elektronen ist in Grün dargestellt

# VDMOS

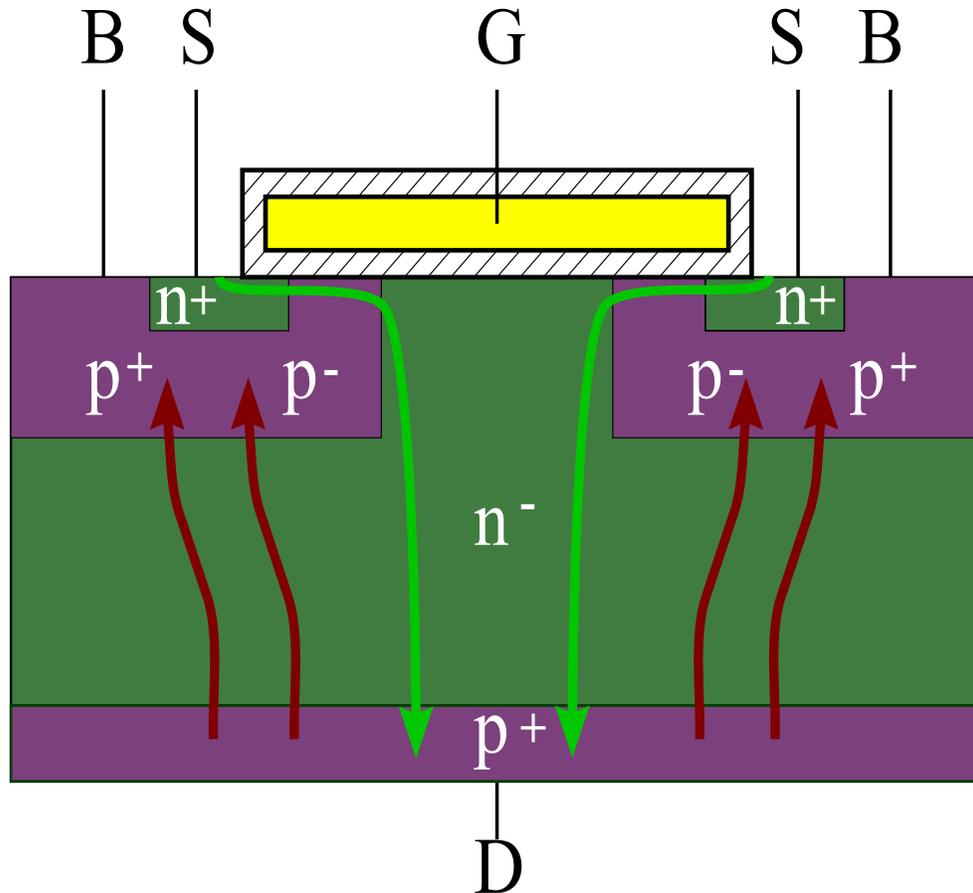


Ausgangskennlinie eines VDMOS-Transistors. Die rot gezeichneten Sperrströme fließen bei

$$U_{GS} = 0.$$

Die grün gezeichneten Linien gehören jeweils zu einem festen, von Null verschiedenen Wert von  $U_{GS}$

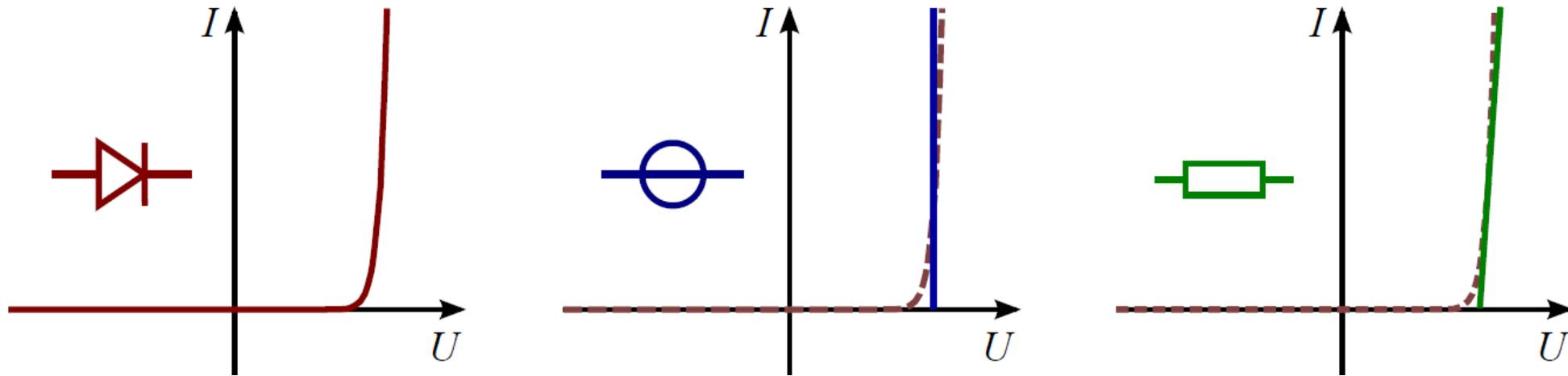
# IGBT



Querschnitt durch einen IGBT mit den Anschlüssen Emitter (E), Gate (G) und Kollektor (C). Der schraffierte Bereich ist Siliziumdioxid. In Grün ist der Weg der Elektronen dargestellt, in Rot der der Löcher

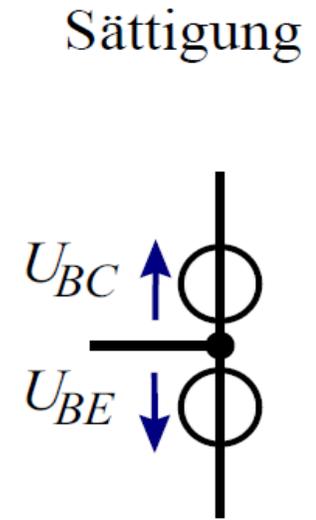
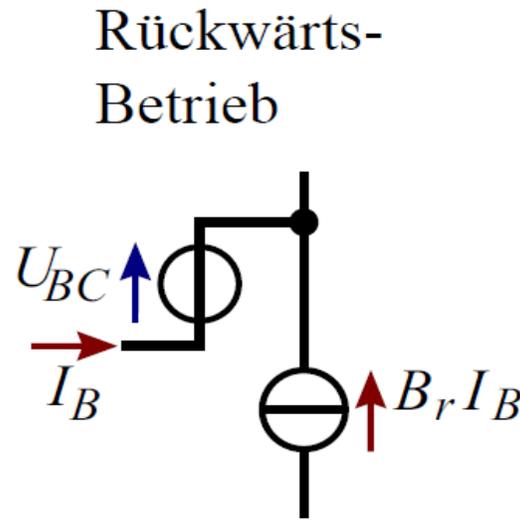
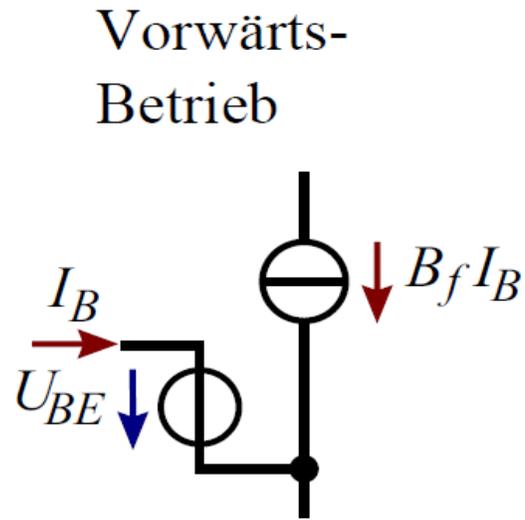
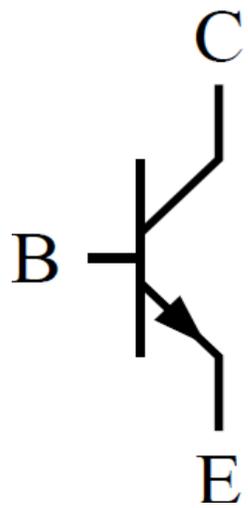


# Ersatzschaltbilder der Diode



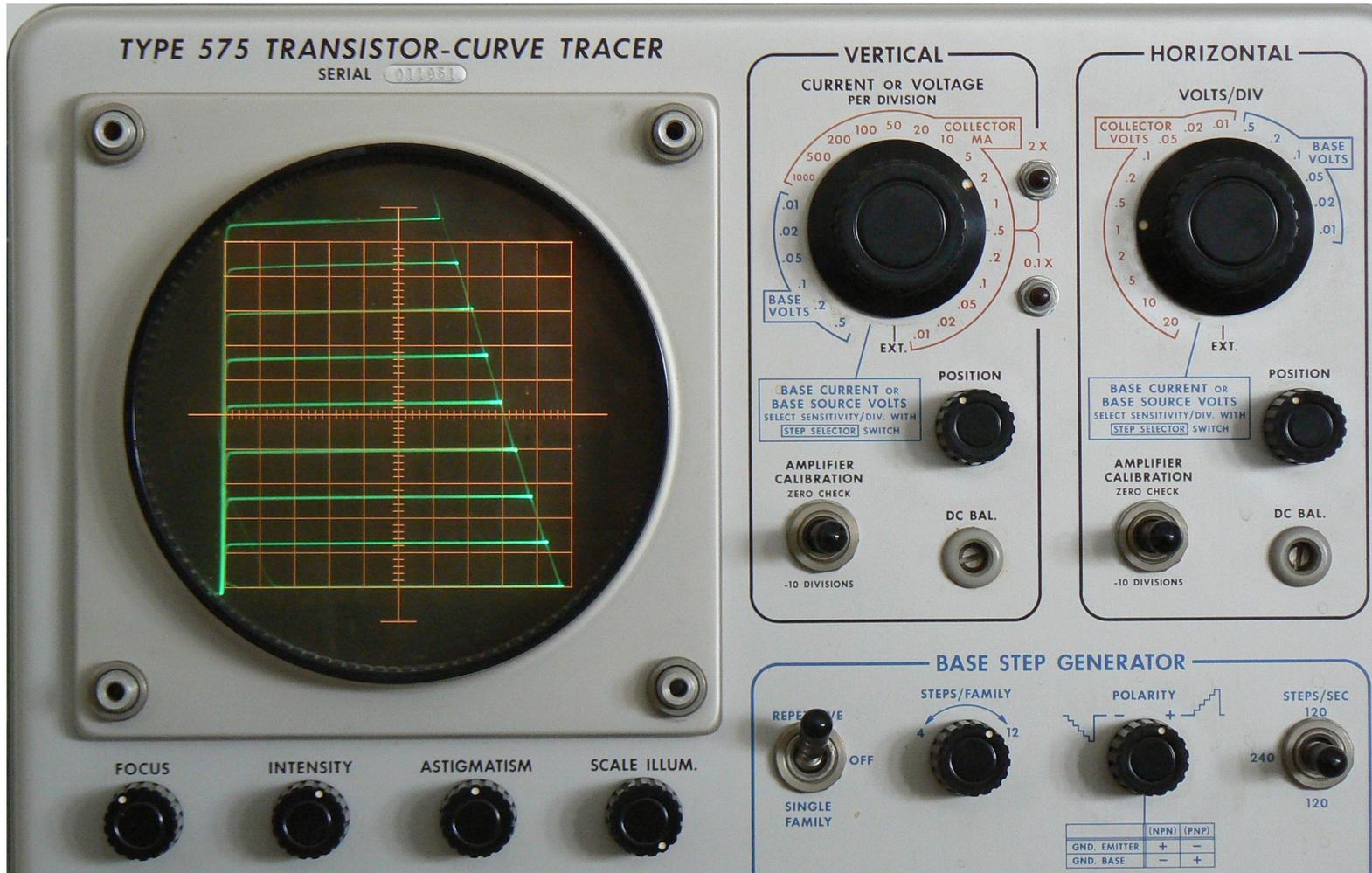
Die Diode und ihre Ersatzschaltbilder: Original, Konstantspannungsquelle, Kleinsignalwiderstand entsprechend den Näherungen nullter und erster Ordnung

# Der NPN Transistor in 0-ter Ordnung



Ersatzschaltbilder des NPN-Transistors nullter Ordnung

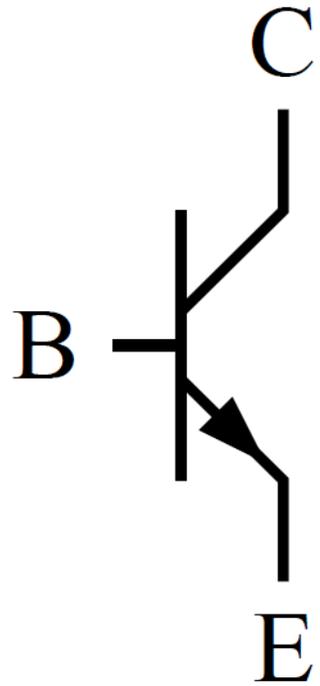
# Messung der Transistorkennlinie



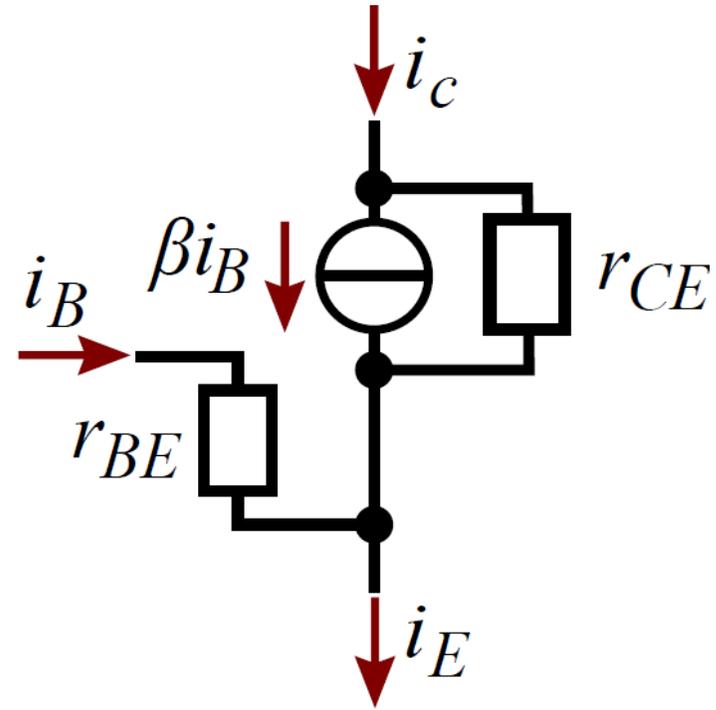
Messung der Kollektor-Emitter-Kennlinien für verschiedene Basisströme am Transistor des Typs BC140



# NPN Kleinsignal-Ersatzschaltbild

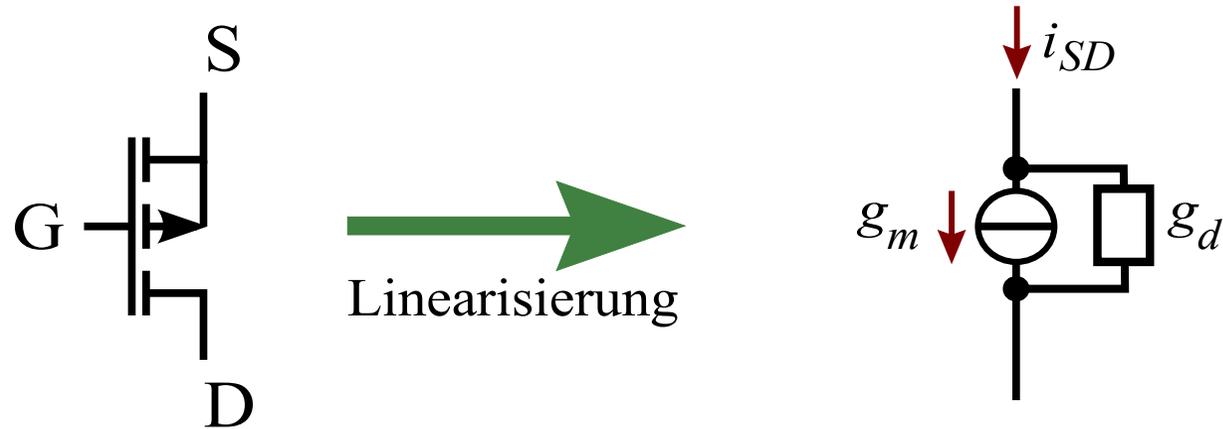


Linearisierung



Kleinsignal-Ersatzschaltbild eines NPN-Transistors im Vorwärtsbetrieb nach der h-Parameter-Matrix

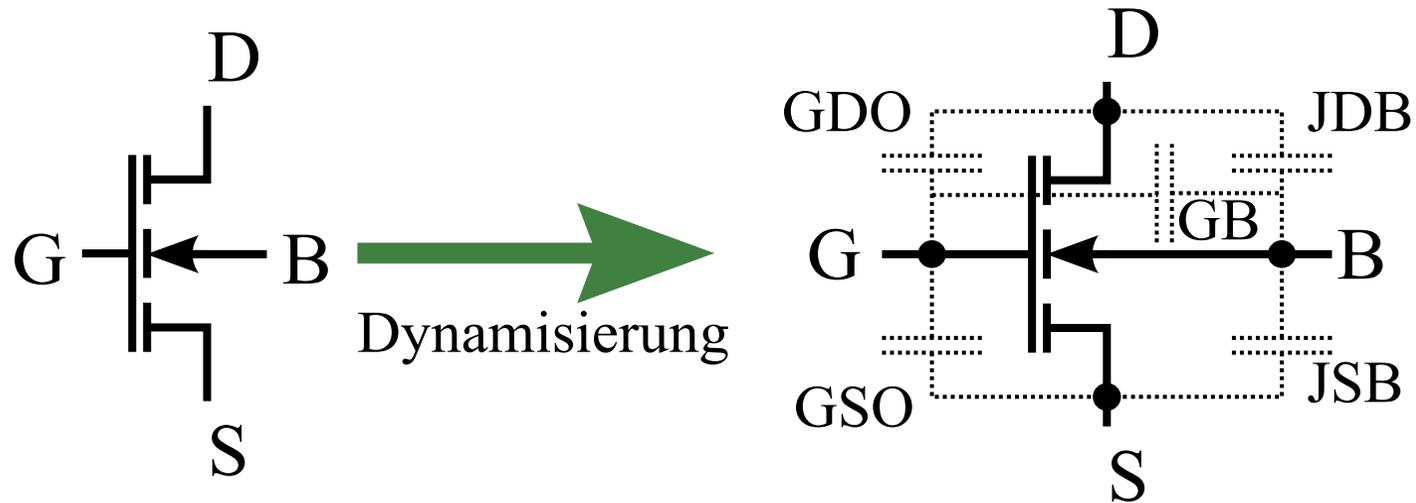
# MOS Kleinsignal-Ersatzschaltbild



Einfaches Kleinsignal-Ersatzschaltbild eines MOS Transistors



# PNP Parasitärkapazitäten



Parasitärkapazitäten eines MOS-Transistors

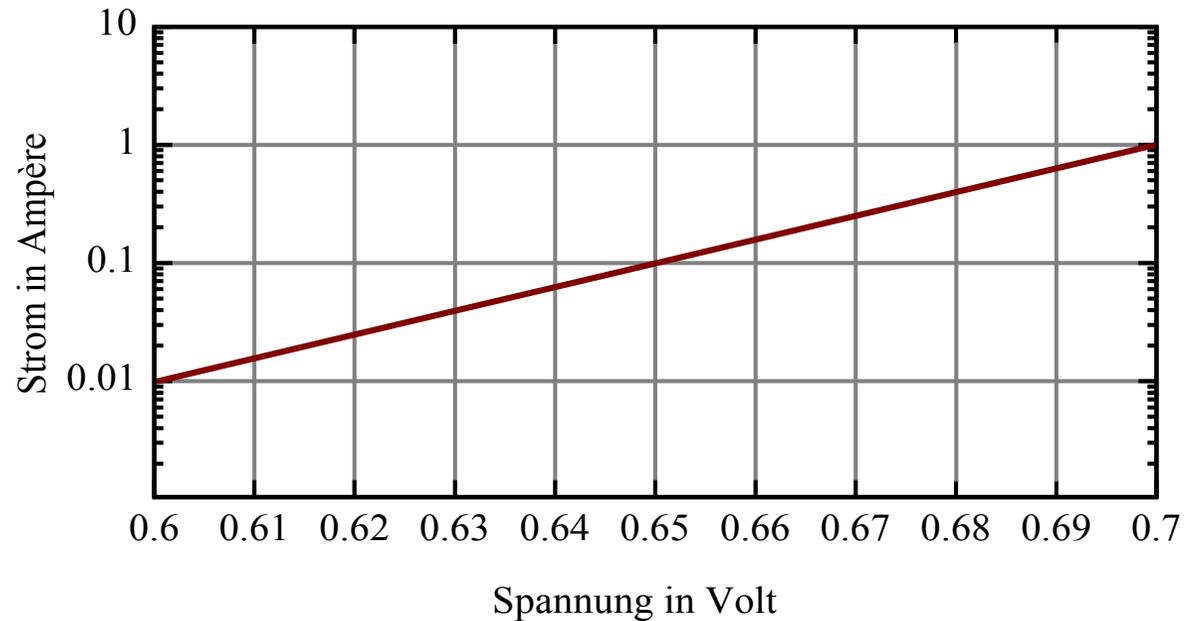
# Solarzellen-Modul



Aufgabe:

Wenn ein Photon wenige Atomradien neben der Sperrschicht ein Elektron-Loch Paar erzeugt, trägt dieses dann zur Stromgewinnung bei?

# Diodenkennlinie

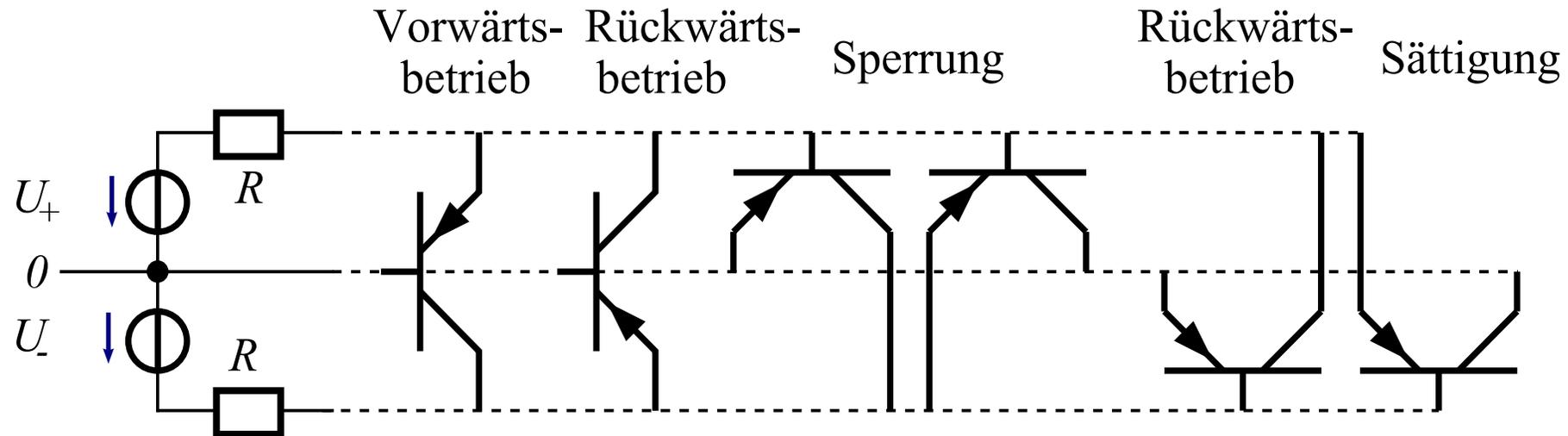


Aufgabe:  
Gemessene  
Strom-Spannungs-  
Kennlinie einer Diode.

Bestimmen Sie den  
Sperrstrom und die  
Temperatur.



# PNP Betriebszustände



Lösung:

Betriebszustände von Bipolar-Transistoren in verschiedenen Konfigurationen.

Vorwärtsbetrieb und Rückwärtsbetrieb sind eindeutig. Für die Sperrung gibt es zwei Möglichkeiten. Was zunächst wie Sättigung aussieht, kann sich als Rückwärtsbetrieb herausstellen