



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

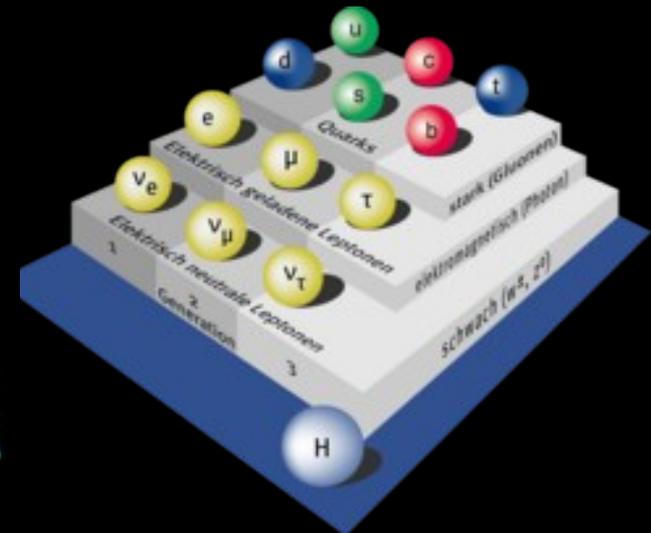
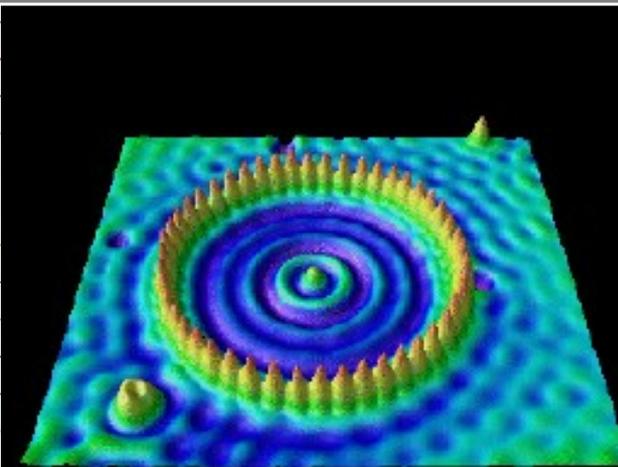
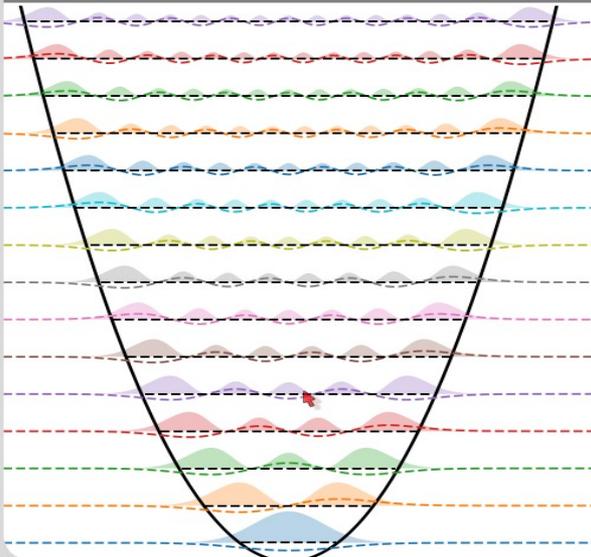
Vorlesung **Moderne Physik (L)**

Anwendungen dotierter Halbleiter und Supraleitung

Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



Vorlesungsevaluation

Vom 29. Juni bis 3. Juli können Sie an einer Online- Umfrage zur Vorlesung und zu den Übungen teilnehmen.

Dazu diese Links verwenden

[Vorlesungsevaluation](#)

[Evaluation der Übungen für LA](#)

oder

[Evaluation der Übungen für Geo/Met](#)

(die gleichen Links finden Sie auf der Ilias-Seite der Vorlesung)

Das Übungs-Team und ich bitten um rege Teilnahme !

Bewegung von Elektronen im Festkörper

Durch Bragg-Reflexion an den Grenzen der Brillouin-Zonen wird die Dispersionsrelation, d. h. der Zusammenhang zwischen Energie $E(k)$ und Wellenzahl k , im Vergleich zum freien Teilchen modifiziert:

Die Elektronenmasse m_e wird im Gitter ersetzt durch die effektive Masse $m^*(k) = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2}$.

– Elektrische Leitfähigkeit σ von Metallen:
$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} = \frac{ne^2\tau}{m^*} \vec{E}$$

\vec{j} : Stromdichte, \vec{E} : elektrische Feldstärke, n : Elektronendichte, τ : mittlere Zeit bis zum nächsten Stoß, m^* : effektive Elektron-Masse

* Wegen Pauli-Prinzip: nur Elektronen nahe der Fermi-Energie können im elektrischen Feld Energie gewinnen, wenn freie Zustände bei $E \geq E_F$ vorhanden sind

* $\rho = 1/\sigma$ steigt für große Temperaturen proportional zu T

– Elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern (d.h. Bandlücke $E_g \approx k_B T$)

* Elektronen-Leitung im Leitungsband

* Löcherleitung im Valenzband

* Leitfähigkeit im Halbleiter:
$$\sigma = \underbrace{\frac{ne^2\tau_n}{m_n^*}}_{e^- \text{ im LB}} + \underbrace{\frac{pe^2\tau_p}{m_p^*}}_{\text{Löcher im VB}}$$

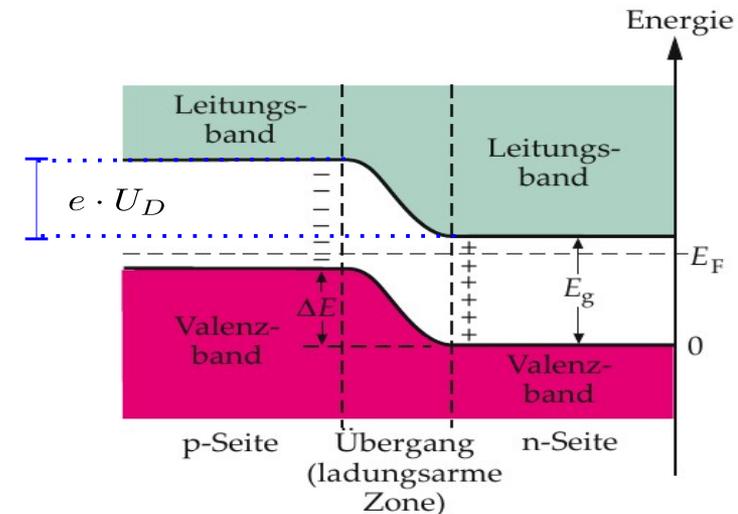
· n, p : Dichte der Elektronen / Löcher

– Dotierte Halbleiter:

- * Zahl der Elektronen / Löcher beeinflussen durch Zugabe von Donatoren (Gruppe V im Periodensystem) bzw. Akzeptoren (Gruppe III)
- * \Rightarrow n- oder p-leitende Halbleiter
- * Wichtig: Anregung von e^- ins LB erfolgt thermisch: $n \sim e^{-\Delta E/k_B T}$
 - ΔE : Energielücke zwischen aufnehmenden und abgebenden Niveau

– p-n-Übergang:

- * Diffusion von Elektronen und Löchern in den jeweils angrenzenden Bereich erzeugt ladungsträger-verarmte Zone
- * Raumladung verursacht durch zurückgebliebene Atomrümpfe verursacht eine Gegenspannung
- * Energie der Elektronen ändert sich: Verbiegung der Bandkanten
- * Diffusionsspannung kann durch äußere Spannung vergrößert oder verkleinert und damit die Ausdehnung der ladungsträger-verarmten Zone beeinflusst werden.



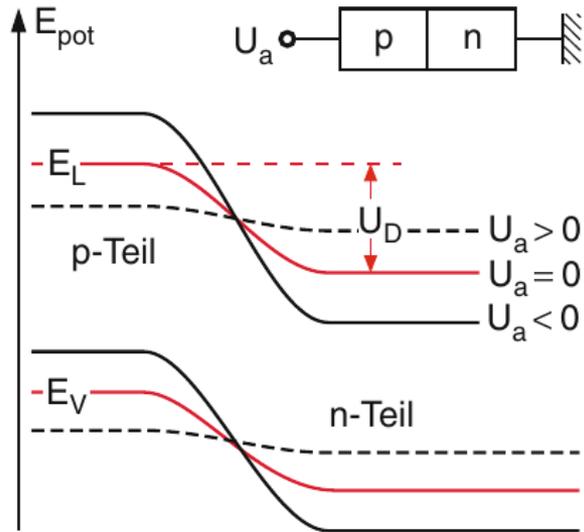
Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) **Grundlagen der Festkörperphysik**
- 11) Kern- und Teilchenphysik
- 12) Ausblick

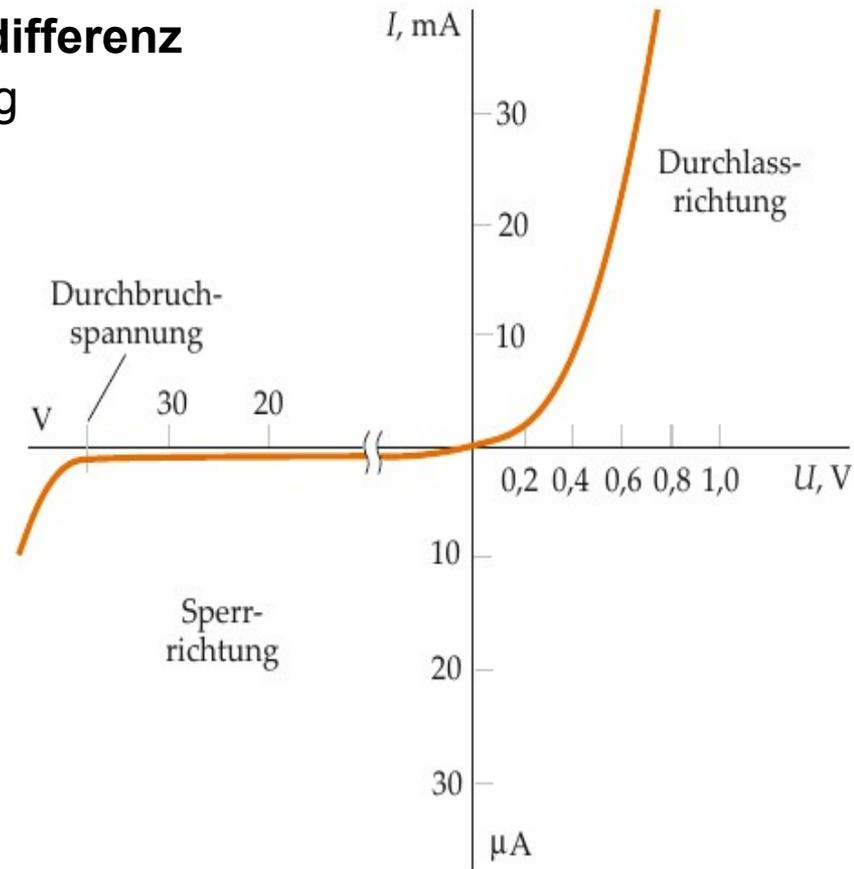
Halbeiteranwendungen

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung



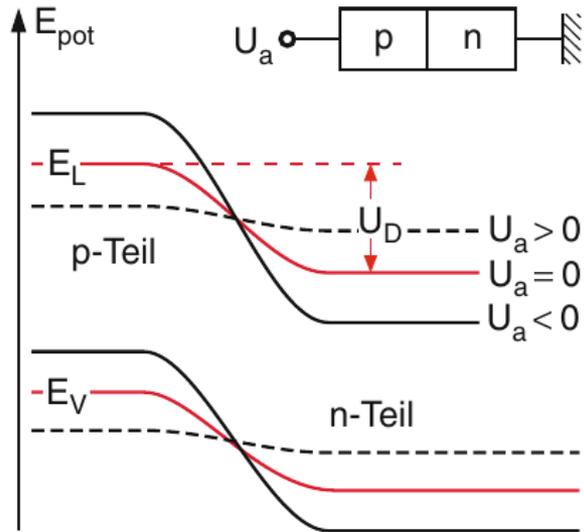
p-n-Übergang mit äußerer Spannung



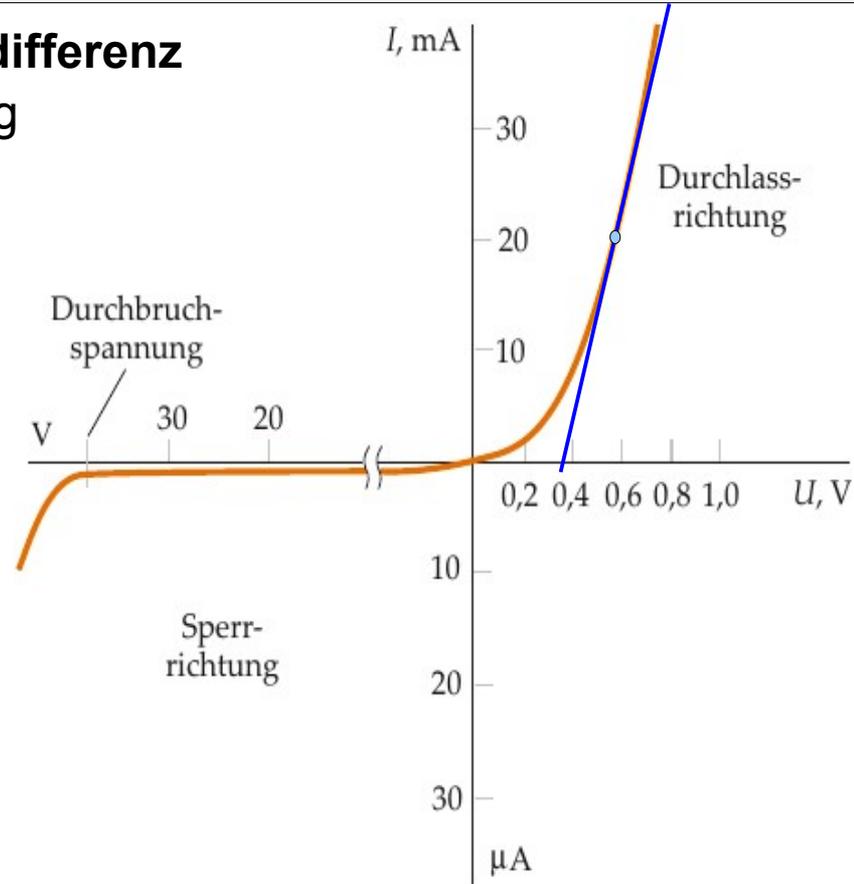
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung



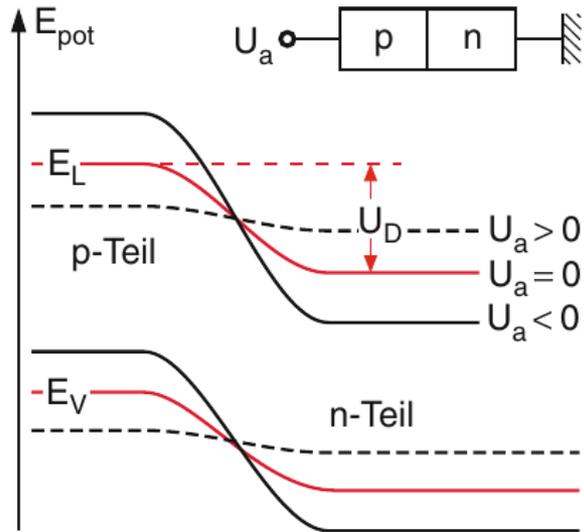
p-n-Übergang mit äußerer Spannung



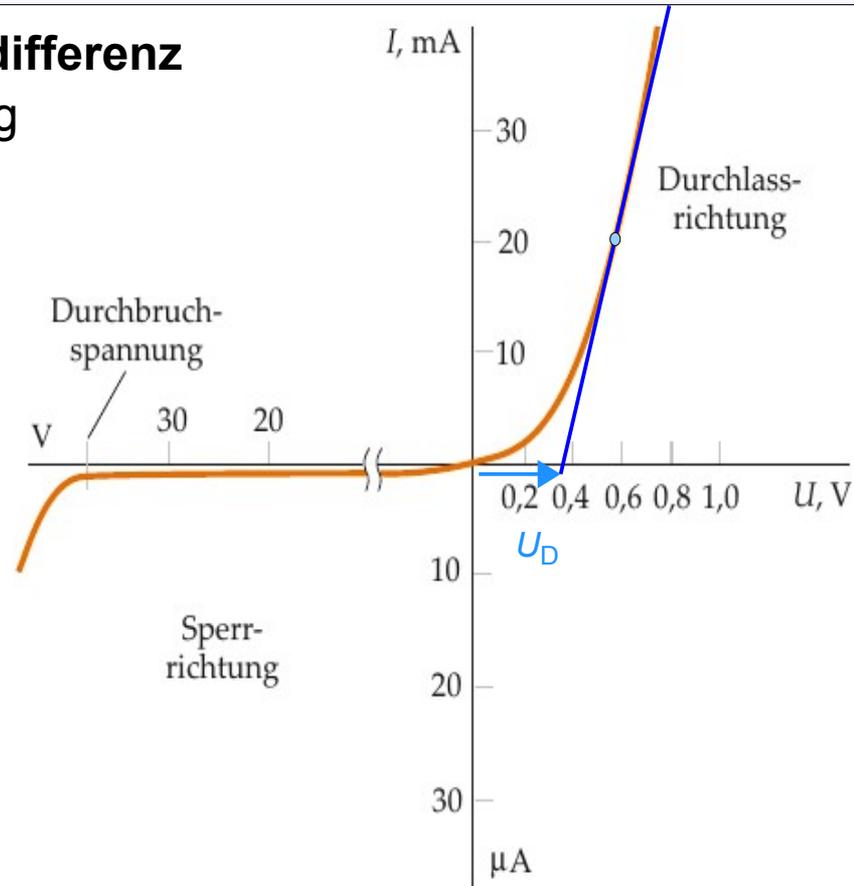
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung



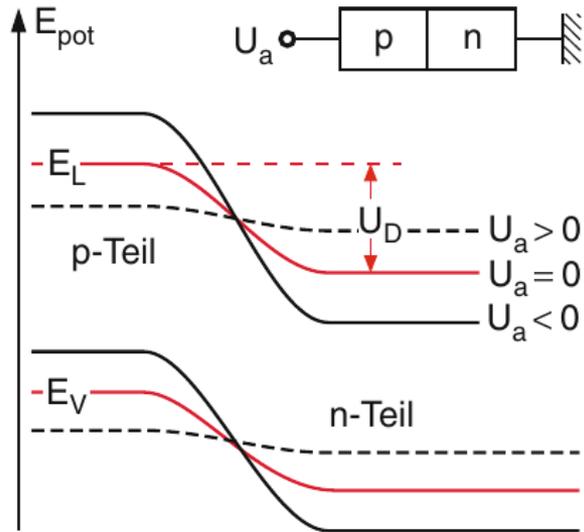
p-n-Übergang mit äußerer Spannung



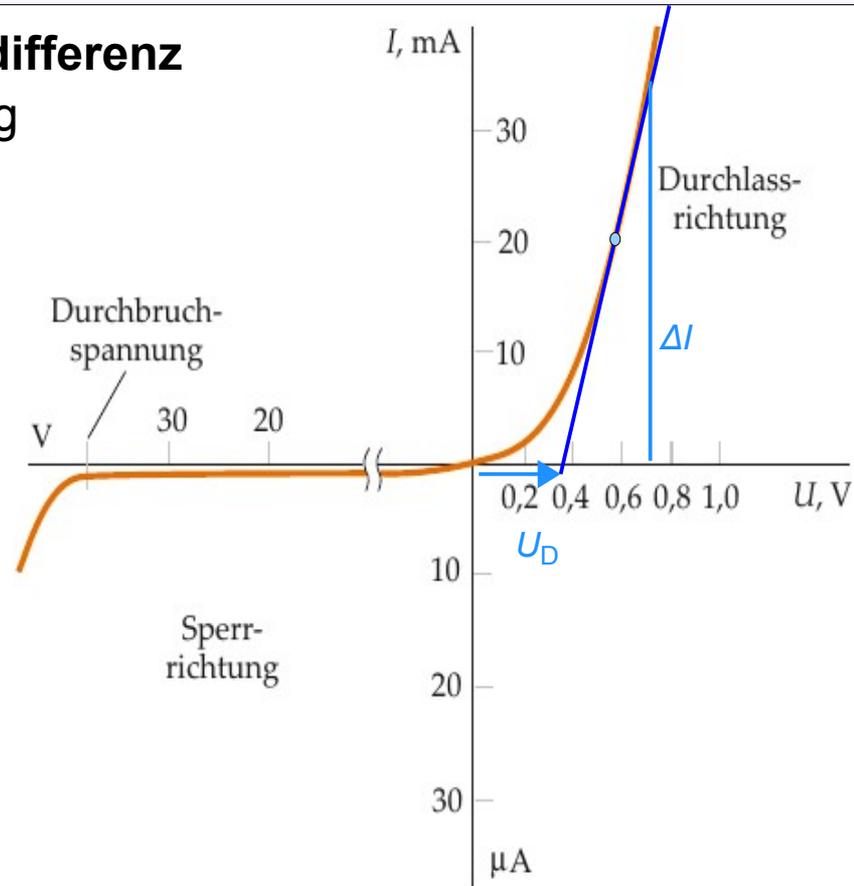
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung



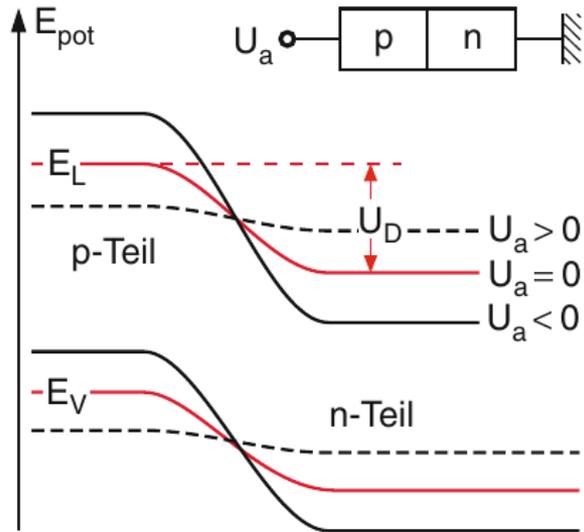
p-n-Übergang mit äußerer Spannung



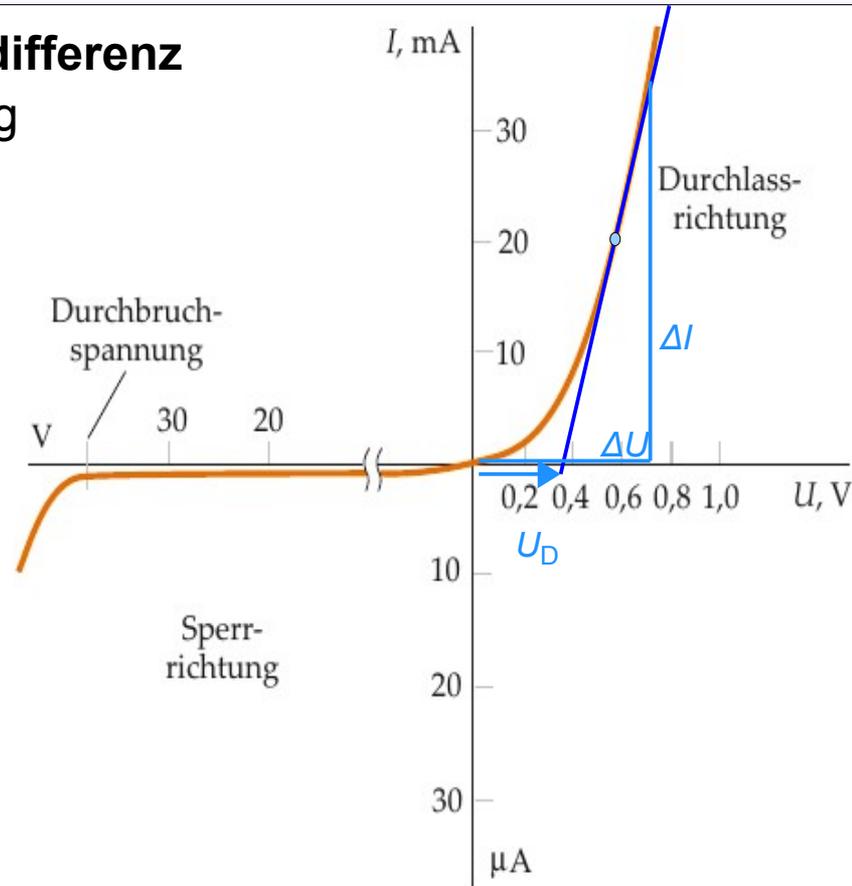
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung



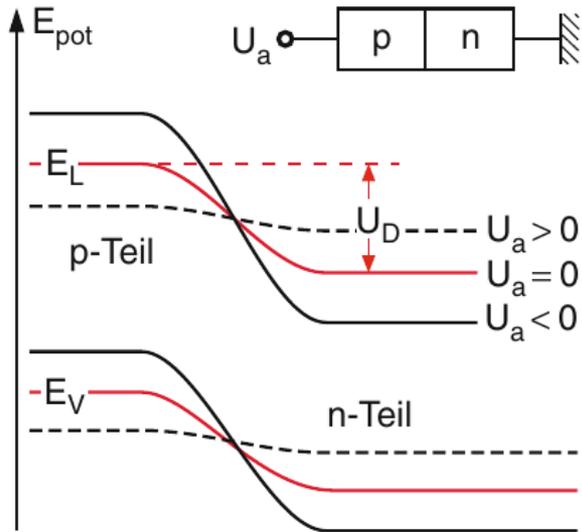
p-n-Übergang mit äußerer Spannung



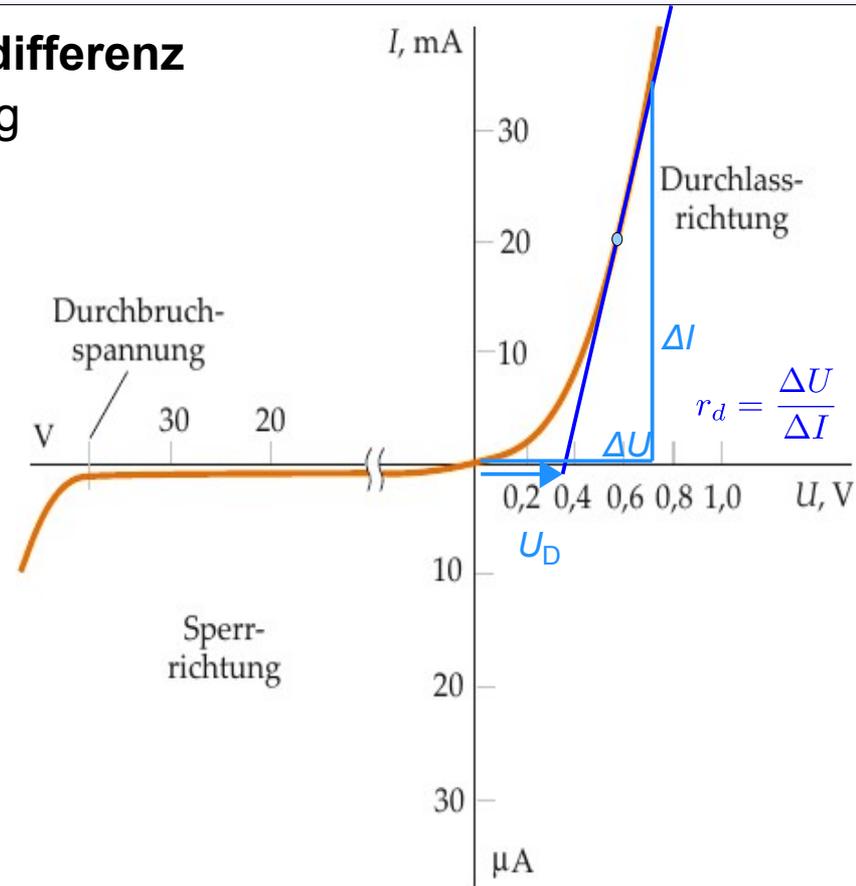
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung



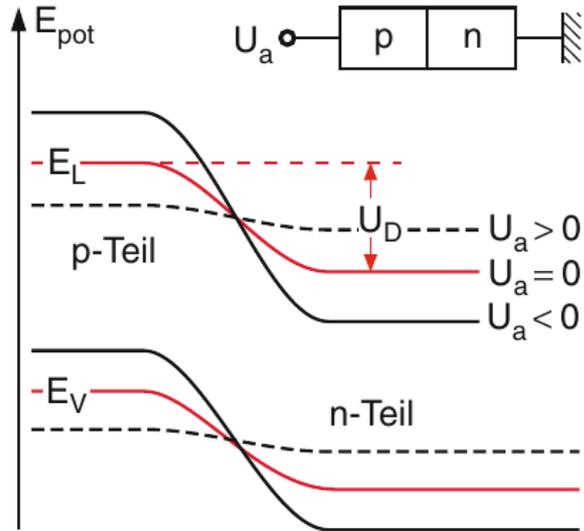
p-n-Übergang mit äußerer Spannung



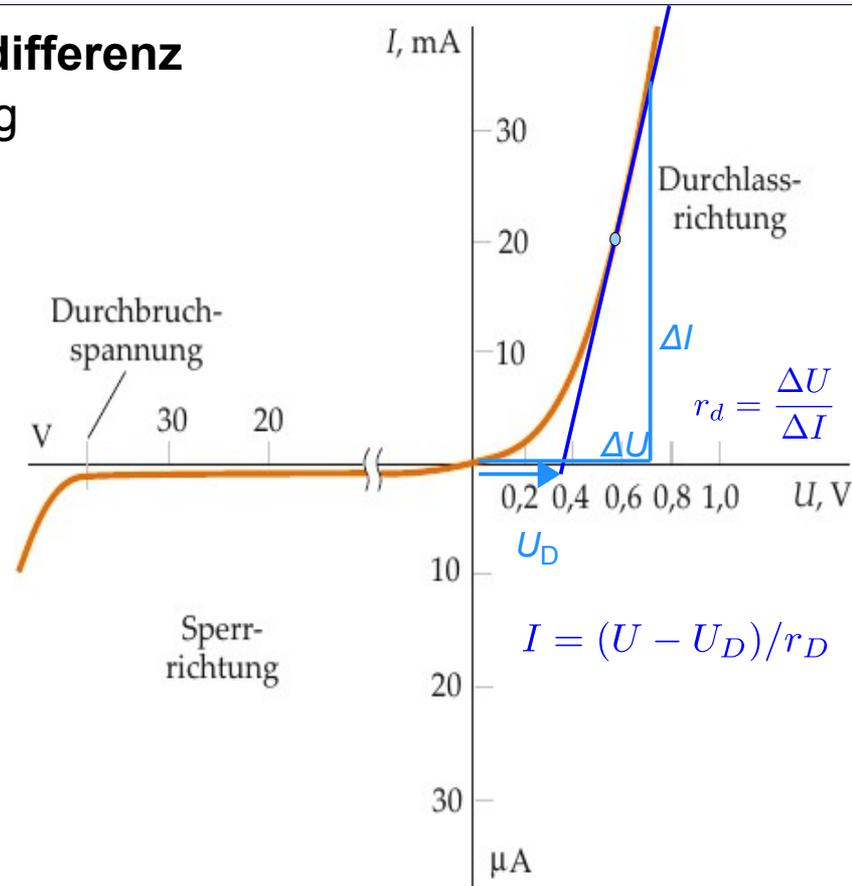
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung



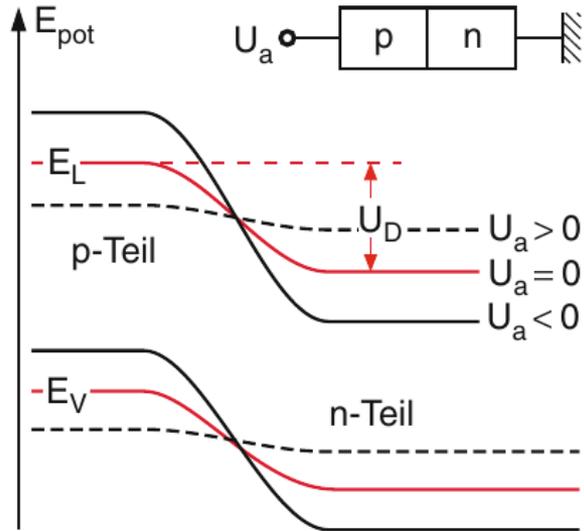
p-n-Übergang mit äußerer Spannung



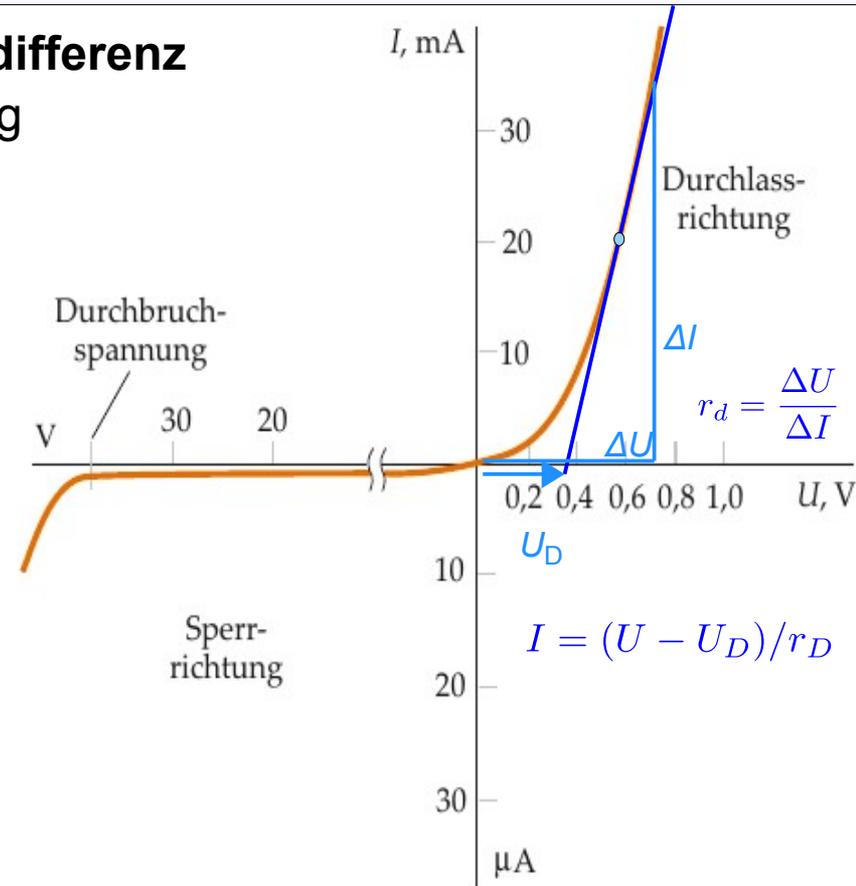
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung

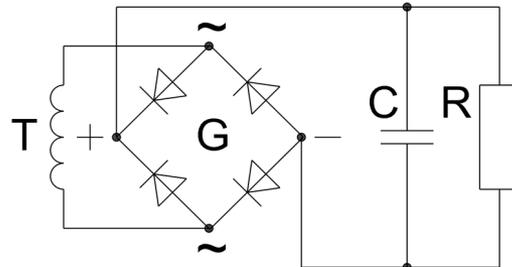


p-n-Übergang mit äußerer Spannung



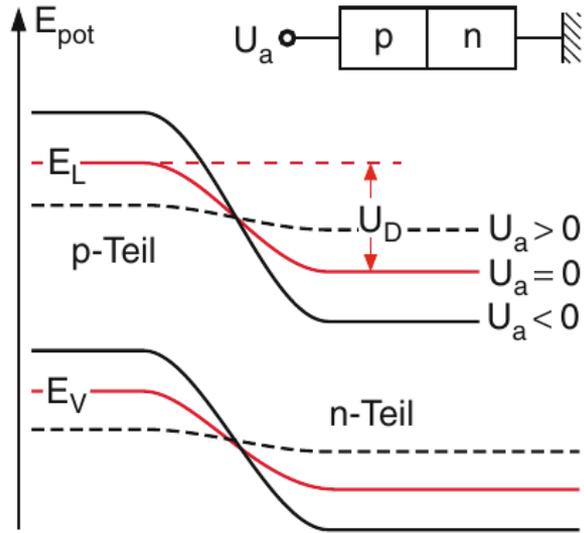
Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

→ Anwendung als Gleichrichter-Diode

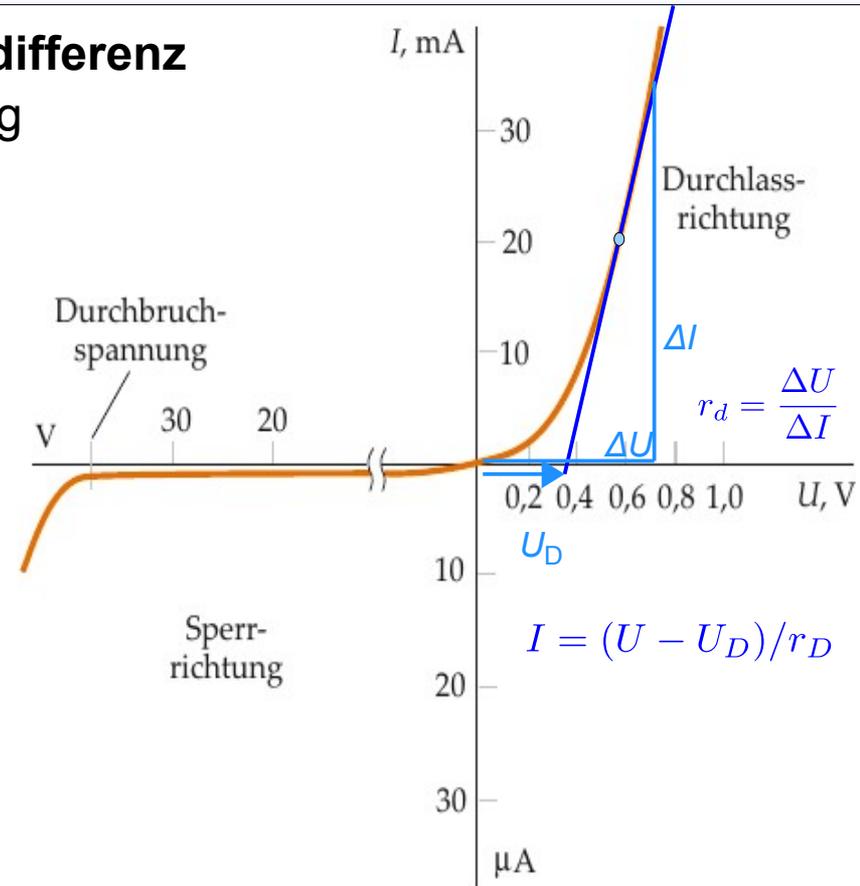


Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte äußere Spannung kann Potentialdifferenz verstärken oder aufheben - je nach Polung

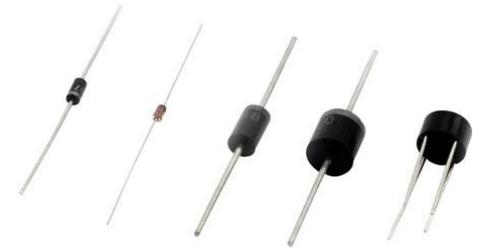
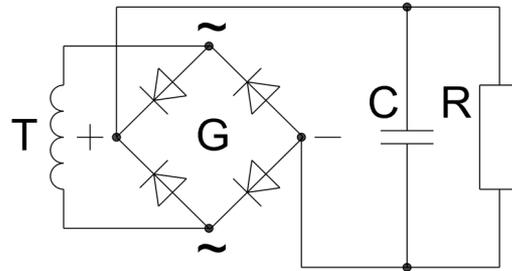


p-n-Übergang mit äußerer Spannung



Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode

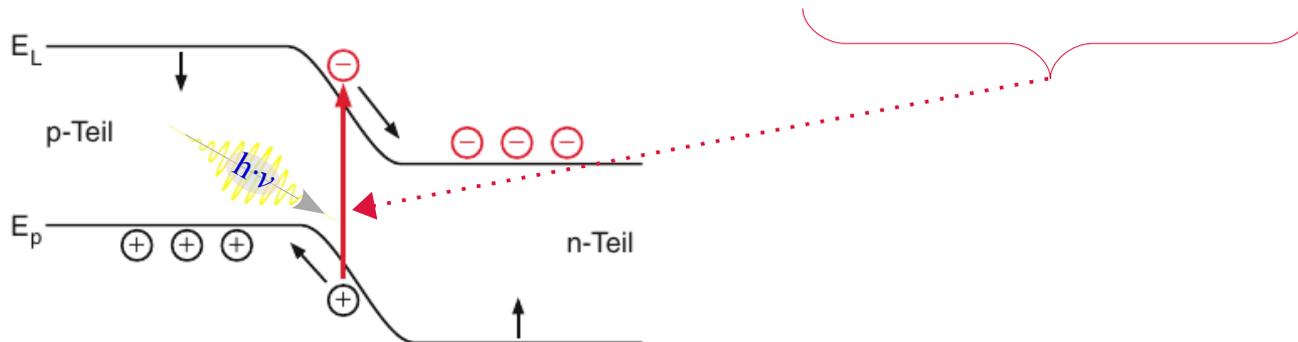
→ Anwendung als Gleichrichter-Diode



Anwendung p-n-Übergang: Fotodiode

Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren durch Anregung von Elektronen ins VB

→ **Photostrom durch „inneren Photoeffekt“**

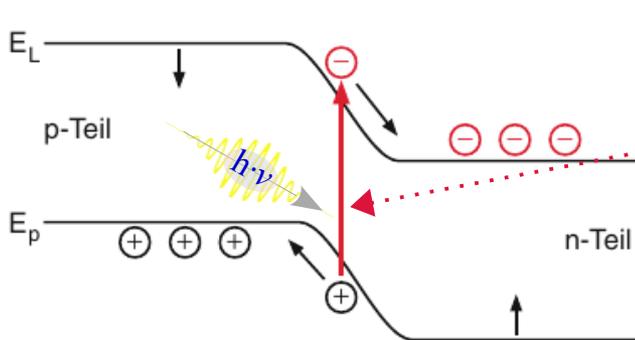


Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren durch Absorption von Photonen.

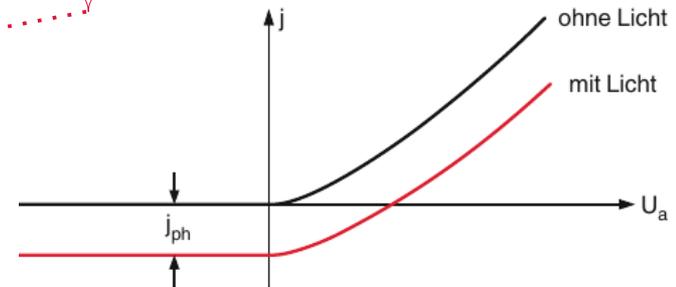
Anwendung p-n-Übergang: Fotodiode

Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren durch Anregung von Elektronen ins VB

→ **Photostrom durch „inneren Photoeffekt“**



Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren durch Absorption von Photonen.

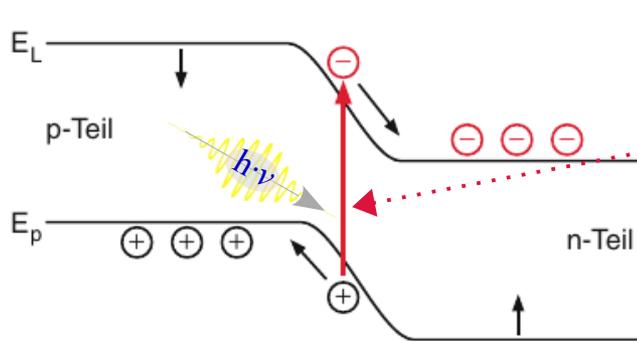


Strom-Spannungs-Charakteristik mit und ohne Beleuchtung

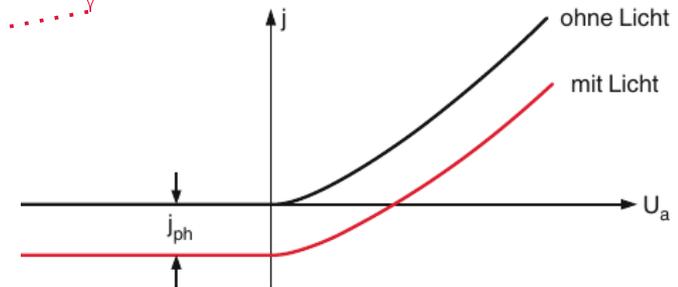
Anwendung p-n-Übergang: Fotodiode

Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren durch Anregung von Elektronen ins VB

→ **Photostrom durch „inneren Photoeffekt“**

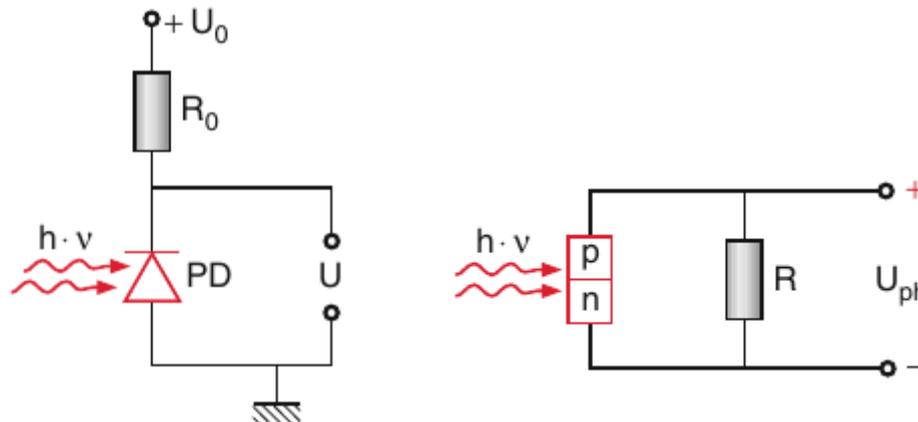


Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren durch Absorption von Photonen.



Strom-Spannungs-Charakteristik mit und ohne Beleuchtung

Lichtsensor und Solarzelle

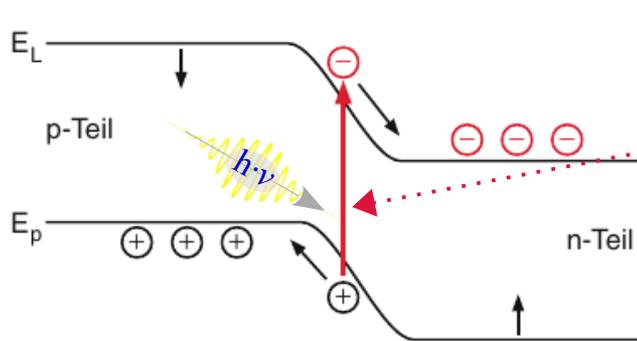


Schaltung als Photowiderstand bzw. als Photospannungsquelle

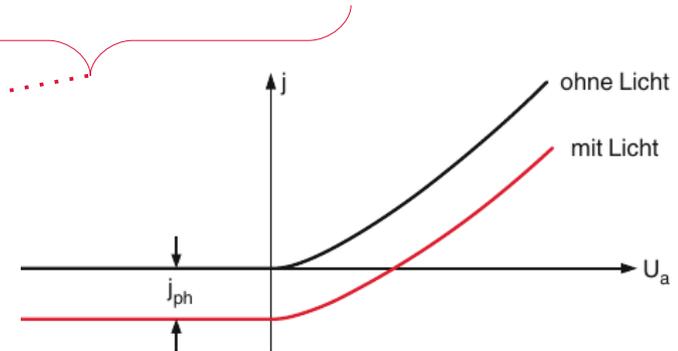
Anwendung p-n-Übergang: Fotodiode

Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren durch Anregung von Elektronen ins VB

→ **Photostrom durch „inneren Photoeffekt“**

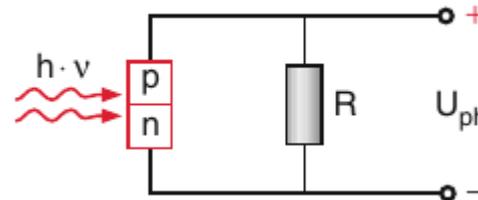
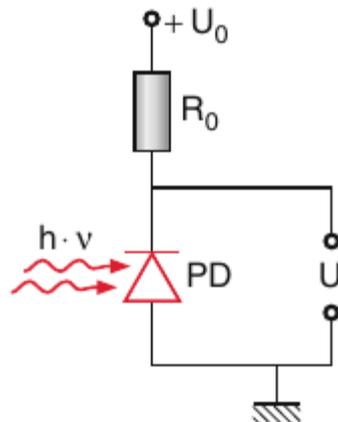


Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren durch Absorption von Photonen.

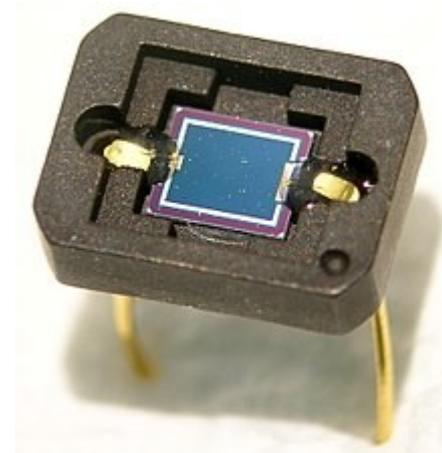


Strom-Spannungs-Charakteristik mit und ohne Beleuchtung

Lichtsensor und Solarzelle



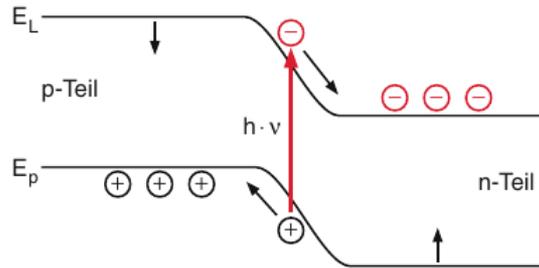
Schaltung als Photowiderstand bzw. als Photospannungsquelle



Anwendung p-n-Übergang: Solarzelle

Großflächige Anwendung des inneren Photoeffekts:

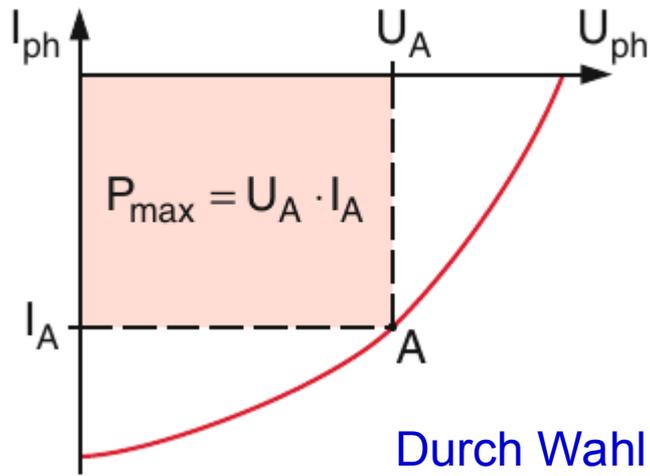
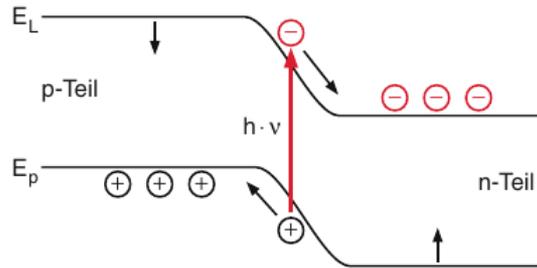
Solarzelle



Anwendung p-n-Übergang: Solarzelle

Großflächige Anwendung des inneren Photoeffekts:

Solarzelle

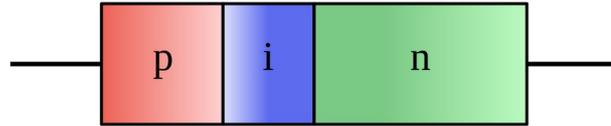


Durch Wahl eines eines optimalen Verbraucher-Widerstands kann die abgegebene Leistung maximiert werden.

Anwendung p-n-Übergang: p-i-n - Diode

Mit einer speziellen Abfolge der Schichten

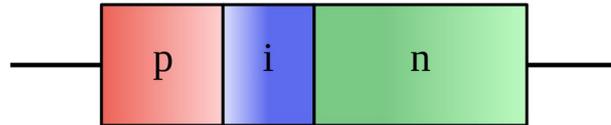
positiv intrinsisch negativ



Anwendung p-n-Übergang: p-i-n - Diode

Mit einer speziellen Abfolge der Schichten

positiv intrinsisch negativ



erhält man eine Diode mit **besonders**

breiter ladungsträgerverarmter Zone,

insb. wenn man eine Sperrspannung
(sog. „Bias-Spannung“) anlegt.

Anwendung p-n-Übergang: p-i-n - Diode

Mit einer speziellen Abfolge der Schichten

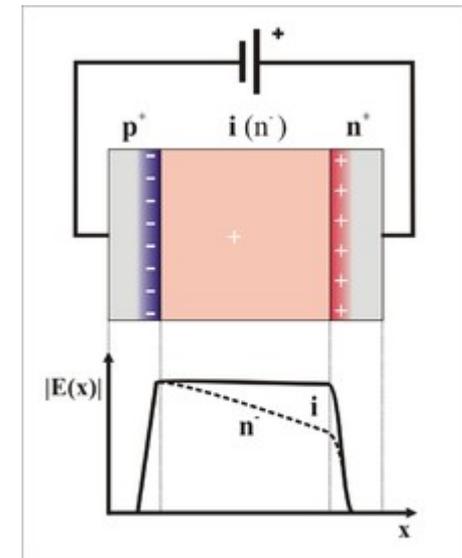
positiv intrinsisch negativ



erhält man eine Diode mit **besonders**

breiter ladungsträgerverarmter Zone,

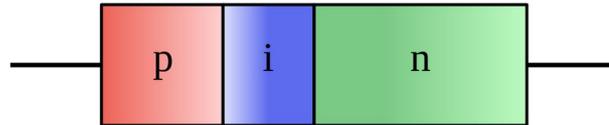
insb. wenn man eine Sperrspannung
(sog. „Bias-Spannung“) anlegt.



Anwendung p-n-Übergang: p-i-n - Diode

Mit einer speziellen Abfolge der Schichten

positiv intrinsisch negativ



erhält man eine Diode mit besonders

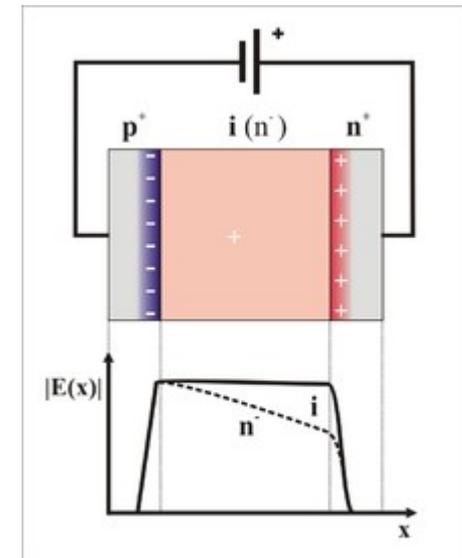
breiter ladungsträgerverarmter Zone,

insb. wenn man eine Sperrspannung
(sog. „Bias-Spannung“) anlegt.

Vorteil:

thermisch erzeugte Elektron-Lochpaare
diffundieren zur p- bzw. n-Seite

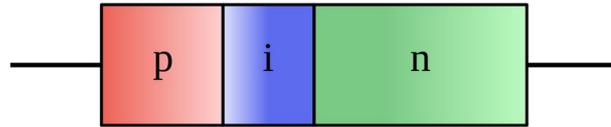
→ hohe Empfindlichkeit bei kleiner Rauschrate



Anwendung p-n-Übergang: p-i-n - Diode

Mit einer speziellen Abfolge der Schichten

positiv intrinsisch negativ



erhält man eine Diode mit besonders

breiter ladungsträgerverarmter Zone,

insb. wenn man eine Sperrspannung
(sog. „Bias-Spannung“) anlegt.

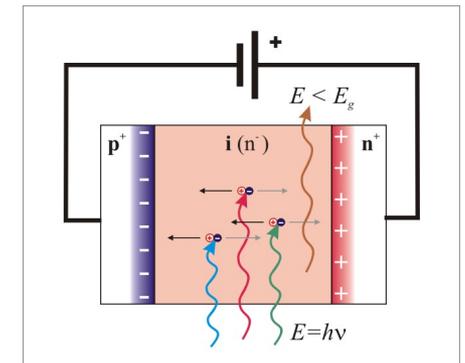
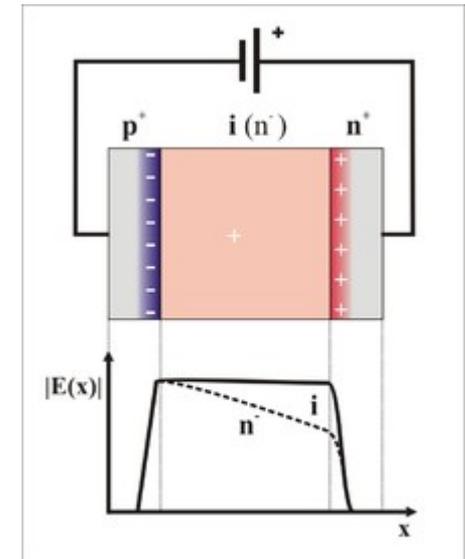
Vorteil:

thermisch erzeugte Elektron-Lochpaare
diffundieren zur p- bzw. n-Seite

→ hohe Empfindlichkeit bei kleiner Rauschrate

pin-Dioden sind daher besonders geeignet als

- **Photo-Sensoren** bis hin zu Röntgen-Strahlung
- **Detektoren für ionisierende Teilchenstrahlung**
(schelle geladene Teilchen wie α - oder β -Strahlung)



Anwendung p-n-Übergang: Strahlungsdetektor

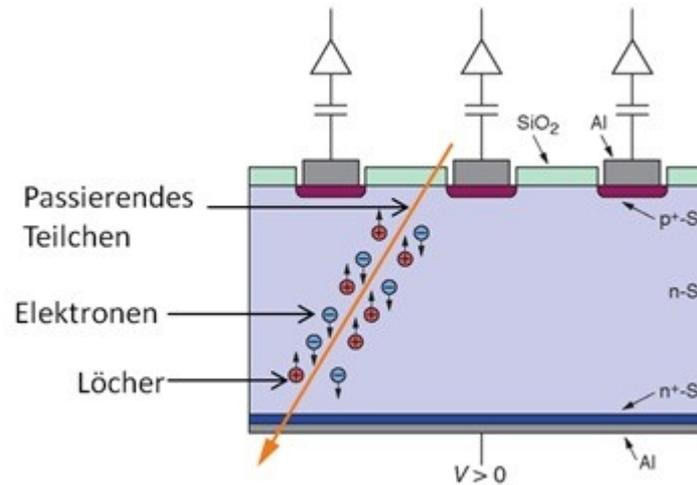
Detektoren für ionisierende Strahlung:

Schnelle geladene Teilchen durchdringen Materie;
in der Verarmungszone eines p-n-Übergangs werden
Elektron-Loch-Paare erzeugt → Stromfluss als Nachweis

Anwendung p-n-Übergang: Strahlungsdetektor

Detektoren für ionisierende Strahlung:

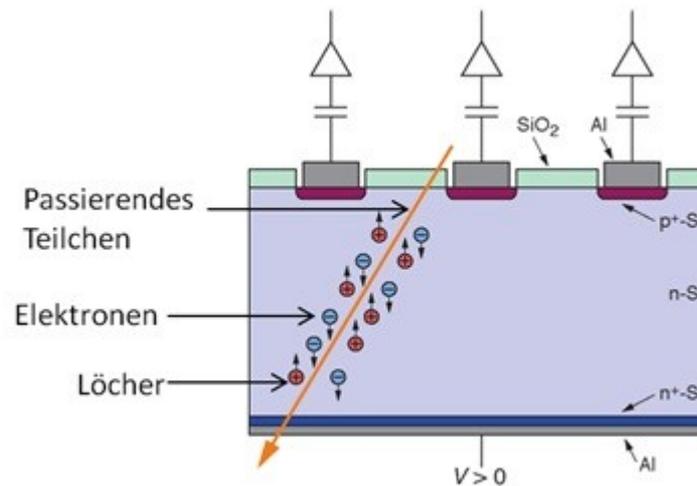
Schnelle geladene Teilchen durchdringen Materie;
in der Verarmungszone eines p-n-Übergangs werden
Elektron-Loch-Paare erzeugt → Stromfluss als Nachweis



Anwendung p-n-Übergang: Strahlungsdetektor

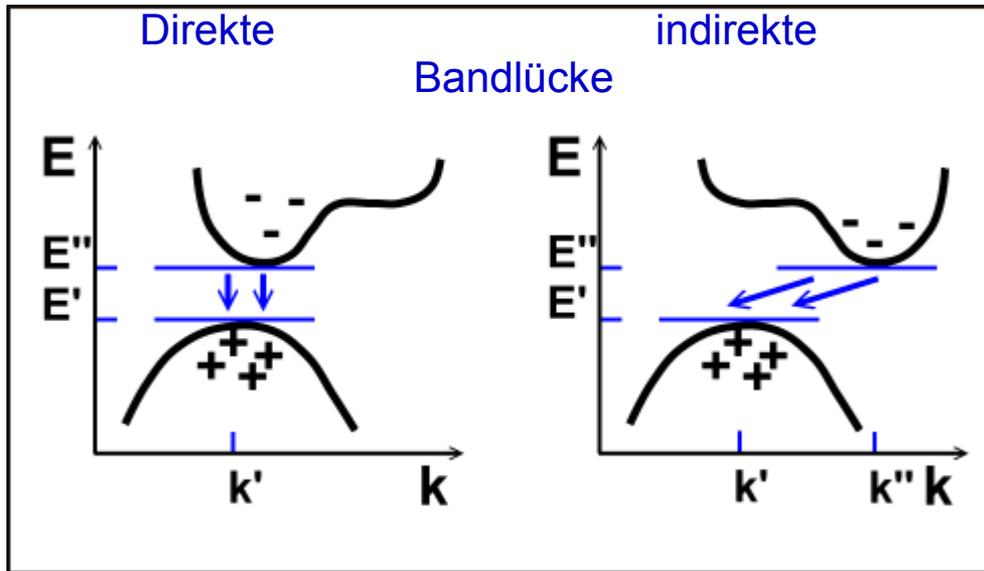
Detektoren für ionisierende Strahlung:

Schnelle geladene Teilchen durchdringen Materie;
in der Verarmungszone eines p-n-Übergangs werden
Elektron-Loch-Paare erzeugt → Stromfluss als Nachweis



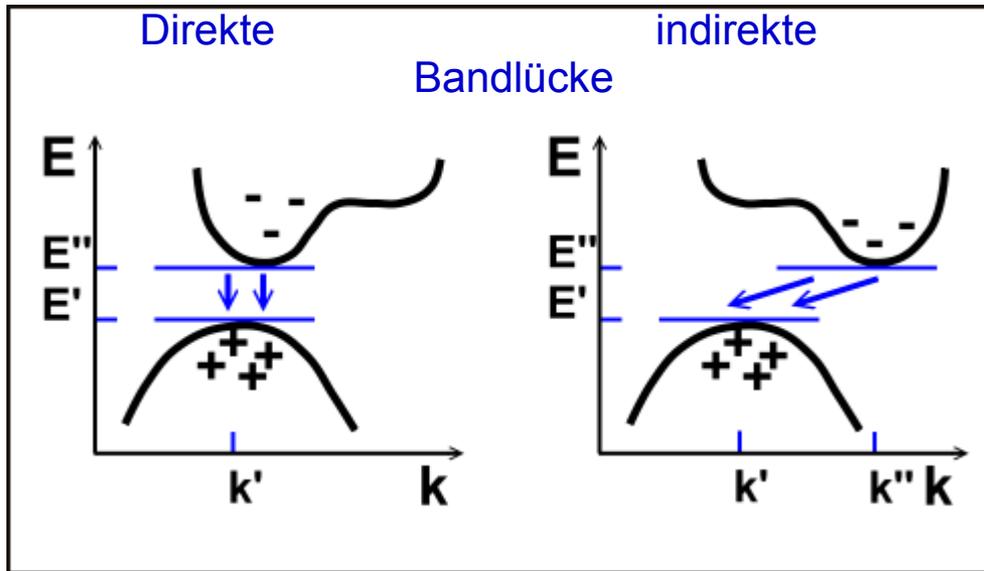
- unterschiedliche Dotierung → großer Verarmungsbereich bei Anlegen einer Spannung in Sperr-Richtung
- Strukturierung der Anschlüsse als Pixel oder Streifen → gute Ortsauflösung

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



Photon-Emission ist wahrscheinlicher, wenn kein Impulsübertrag auf ein Phonon notwendig ist !

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



Photon-Emission ist wahrscheinlicher, wenn kein Impulsübertrag auf ein Phonon notwendig ist !

Impulsbetrachtung:

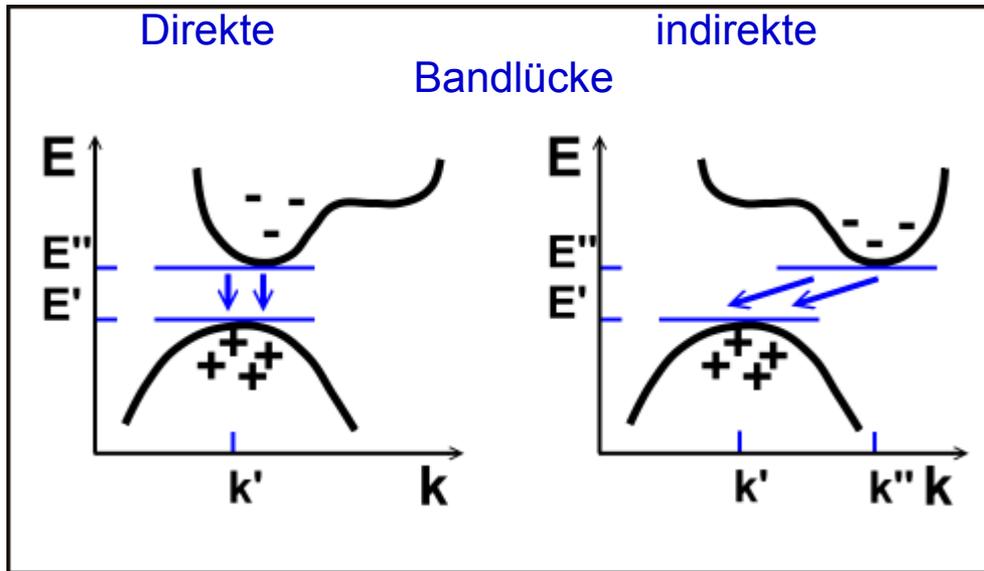
– Elektron $E=1$ eV

$$p_e = \sqrt{2m_e E} = 2 \cdot 511000 \cdot 1 \text{ eV}^2 / c^2 = 1011 \text{ eV}/c$$

– Photon $E = 1$ eV

$$p_\gamma = E/c = 1 \text{ eV}/c$$

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



Photon-Emission ist wahrscheinlicher, wenn kein Impulsübertrag auf ein Phonon notwendig ist !

Impulsbetrachtung:

– Elektron $E=1$ eV

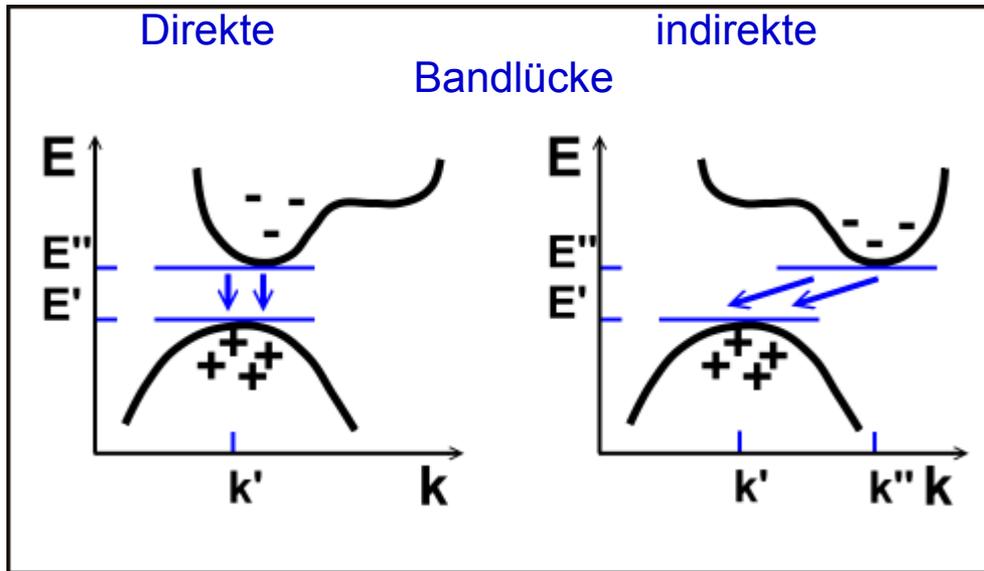
$$p_e = \sqrt{2m_e E} = 2 \cdot 511000 \cdot 1 \text{ eV}^2 / c^2 = 1011 \text{ eV}/c$$

– Photon $E = 1$ eV

$$p_\gamma = E/c = 1 \text{ eV}/c$$

→ Photonen entsprechen quasi senkrechten Linien im $E(k)$ Diagramm

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



Photon-Emission ist wahrscheinlicher, wenn kein Impulsübertrag auf ein Phonon notwendig ist !

Impulsbetrachtung:

– Elektron $E=1$ eV

$$p_e = \sqrt{2m_e E} = 2 \cdot 511000 \cdot 1 \text{ eV}^2 / c^2 = 1011 \text{ eV}/c$$

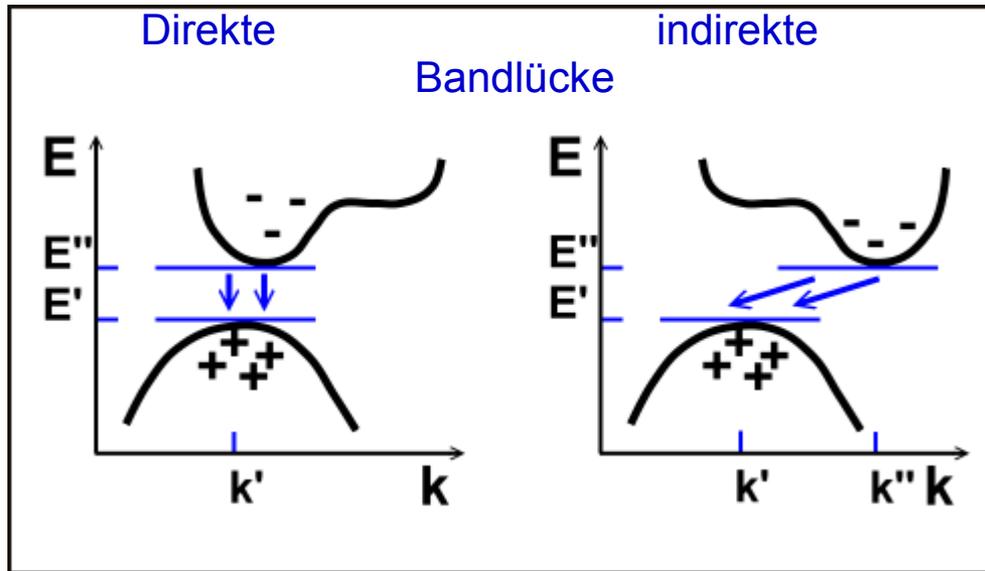
– Photon $E = 1$ eV

$$p_\gamma = E/c = 1 \text{ eV}/c$$

→ Photonen entsprechen quasi senkrechten Linien im $E(k)$ Diagramm

Verwendung von Halbleitern mit direkter Bandlücke für Leuchtdioden (**Light Emitting Diode = LED**) !
Material und Dotierung bestimmen Farbe !

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



Photon-Emission ist wahrscheinlicher, wenn kein Impulsübertrag auf ein Phonon notwendig ist !

Impulsbetrachtung:

– Elektron $E=1$ eV

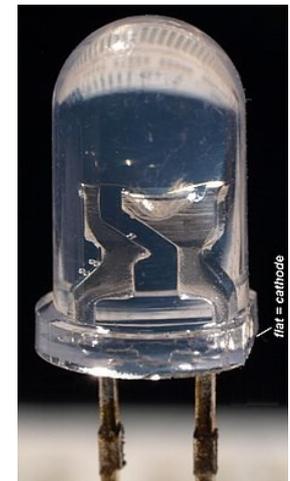
$$p_e = \sqrt{2m_e E} = 2 \cdot 511000 \cdot 1 \text{ eV}^2 / c^2 = 1011 \text{ eV}/c$$

– Photon $E = 1$ eV

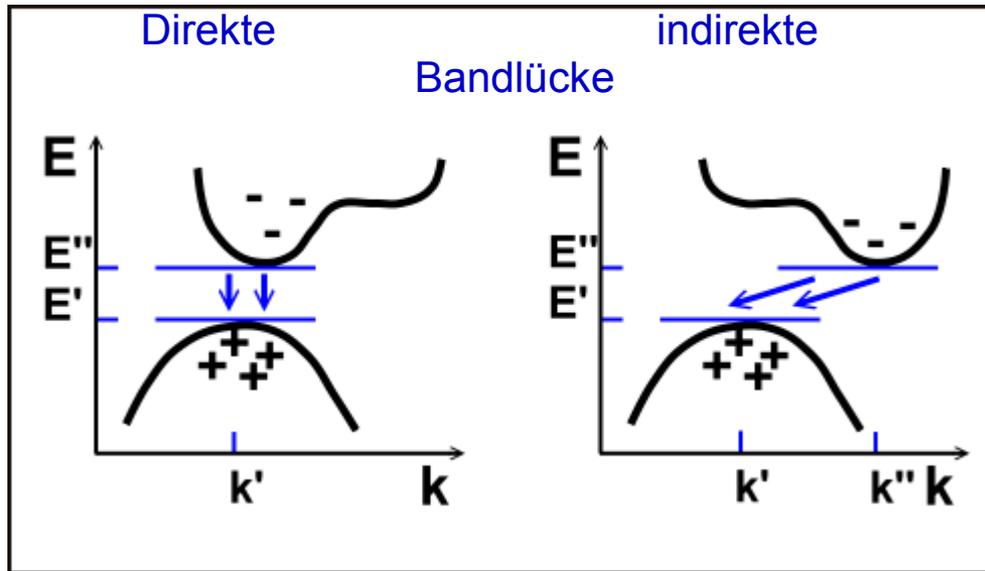
$$p_\gamma = E/c = 1 \text{ eV}/c$$

→ Photonen entsprechen quasi senkrechten Linien im $E(k)$ Diagramm

Verwendung von Halbleitern mit direkter Bandlücke für Leuchtdioden (**Light Emitting Diode = LED**) !
Material und Dotierung bestimmen Farbe !



Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



Photon-Emission ist wahrscheinlicher, wenn kein Impulsübertrag auf ein Phonon notwendig ist !

Verwendung von Halbleitern mit direkter Bandlücke für Leuchtdioden (**Light Emitting Diode = LED**) !
Material und Dotierung bestimmen Farbe !

Si hat eine indirekte Bandlücke, ist daher ungeeignet !

Impulsbetrachtung:

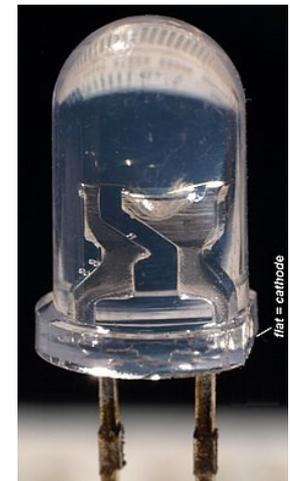
– Elektron $E=1$ eV

$$p_e = \sqrt{2m_e E} = 2 \cdot 511000 \cdot 1 \text{ eV}^2 / c^2 = 1011 \text{ eV}/c$$

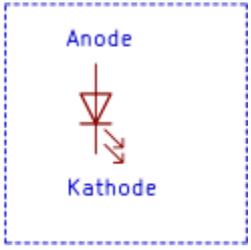
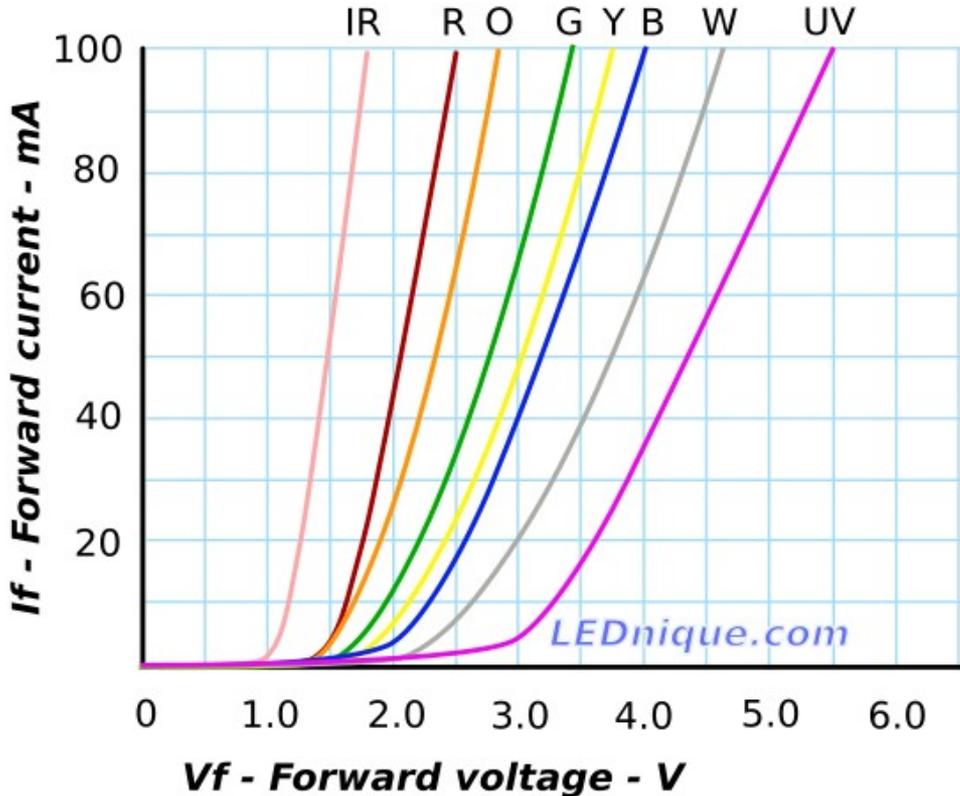
– Photon $E = 1$ eV

$$p_\gamma = E/c = 1 \text{ eV}/c$$

→ Photonen entsprechen quasi senkrechten Linien im $E(k)$ Diagramm

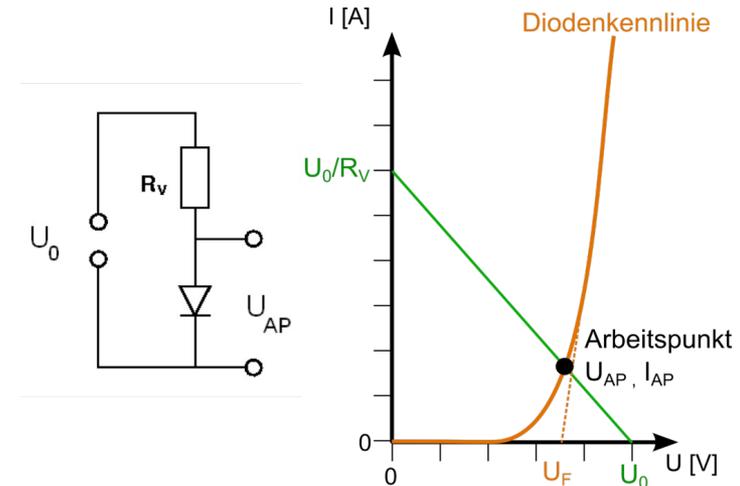
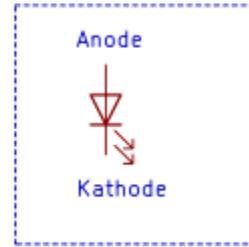
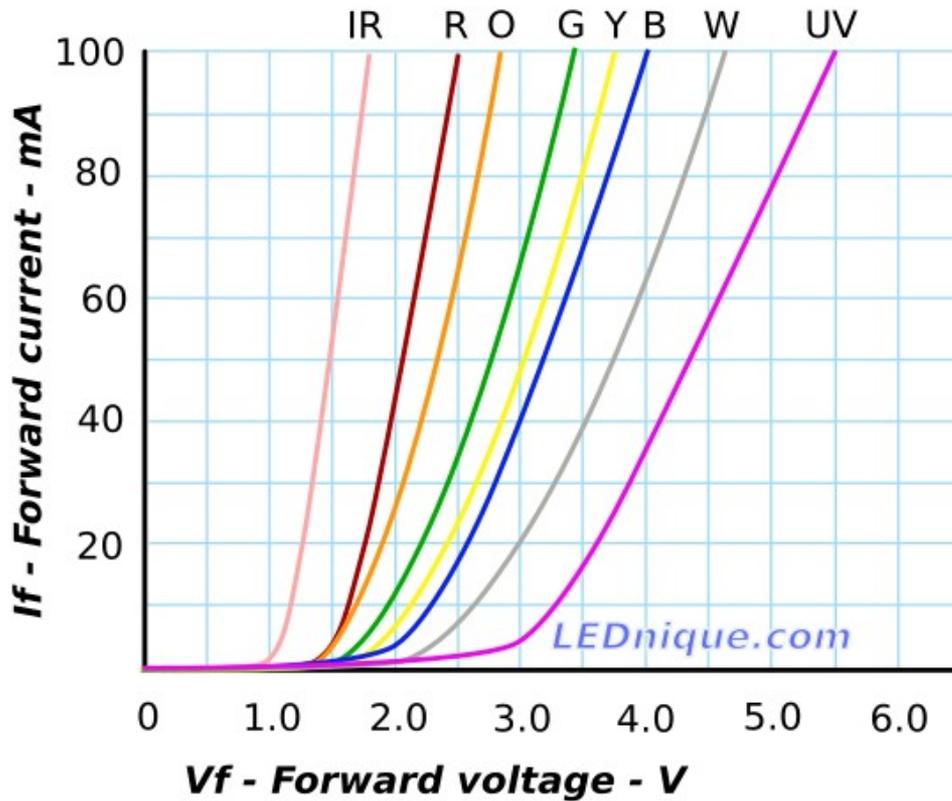


Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode (2)



Durchlassspannung der Diode steigt mit Lichtfrequenz !

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode (2)

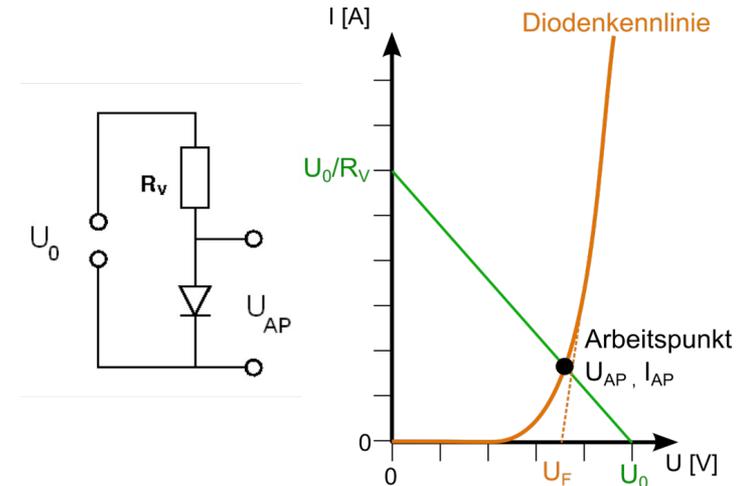
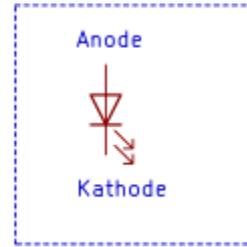
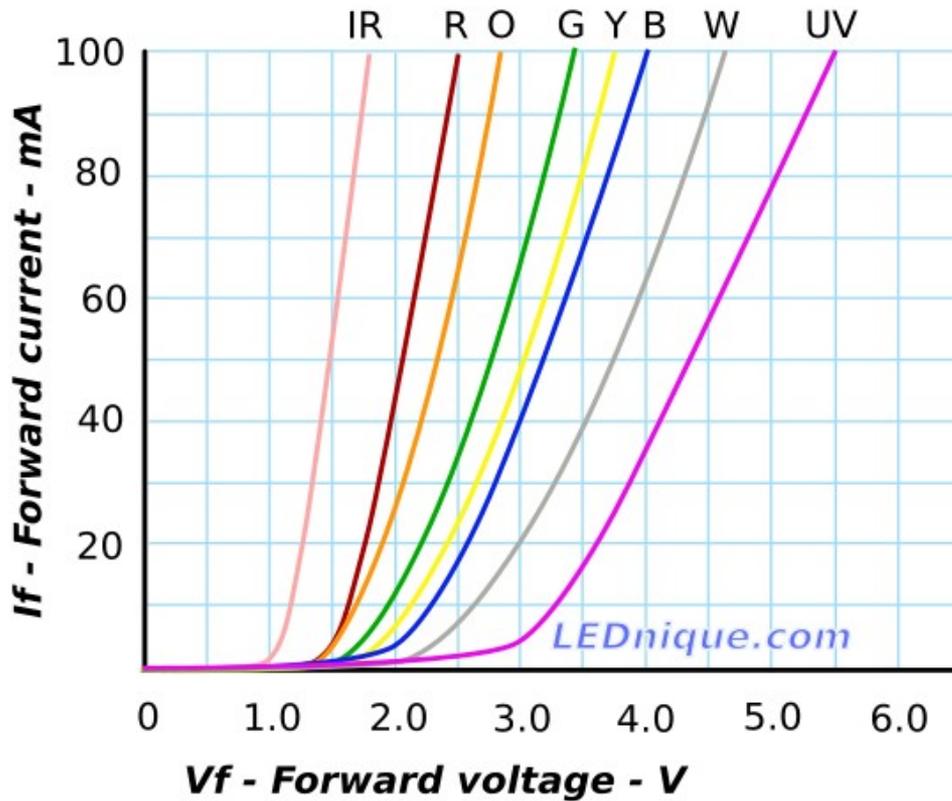


Durchlassspannung der Diode steigt mit Lichtfrequenz !

Kennlinie verläuft sehr steil

→ Vorwiderstand zur Strombegrenzung vorsehen !

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode (2)



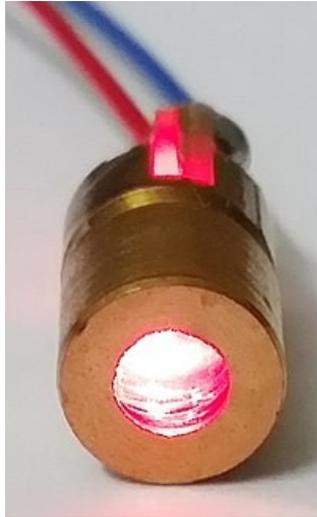
Durchlassspannung der Diode steigt mit Lichtfrequenz !

→ Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mit Hilfe verschiedenfarbiger Leuchtdioden.

Kennlinie verläuft sehr steil

→ Vorwiderstand zur Strombegrenzung vorsehen !

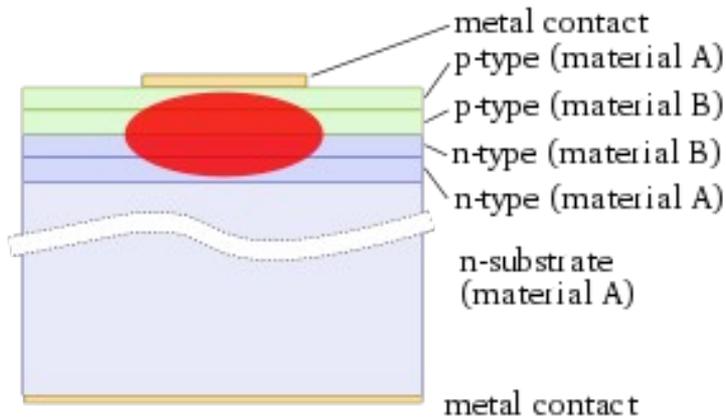
Halbleiter-Laser



Prinzip:

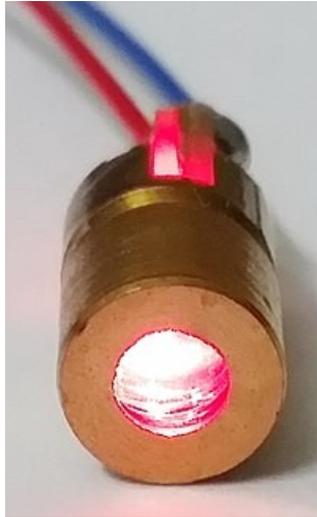
Leuchtdiode mit

- schmaler ladungsträgerverarmter Zone
- verspiegelten Endflächen



Abfolge der Schichten in einer modernen „double-hetero“ (DH) - Struktur eines Halbleiter-Lasers

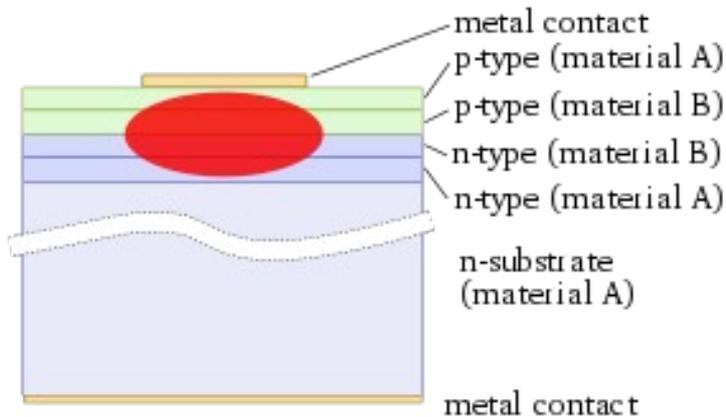
Halbleiter-Laser



Prinzip:

Leuchtdiode mit

- schmaler ladungsträgerverarmter Zone
- verspiegelten Endflächen



Abfolge der Schichten in einer modernen „double-hetero“ (DH) - Struktur eines Halbleiter-Lasers

Vorteile:

- sehr kostengünstig (~1€)
- Betrieb mit Niederspannung
- Leistungen von 10^{-4} – 10 W pro Emitterschicht
- hohe (~50%) Energieeffizienz



Achtung: trotzdem gefährlich !
Laserschutzverordnung !

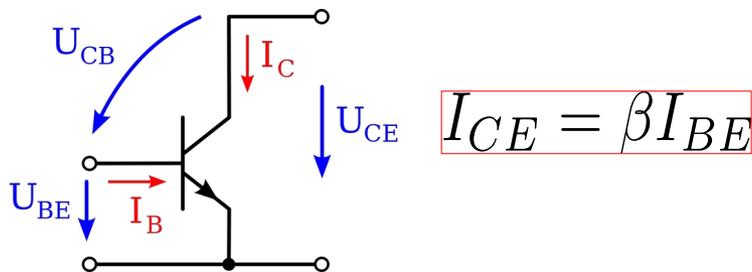
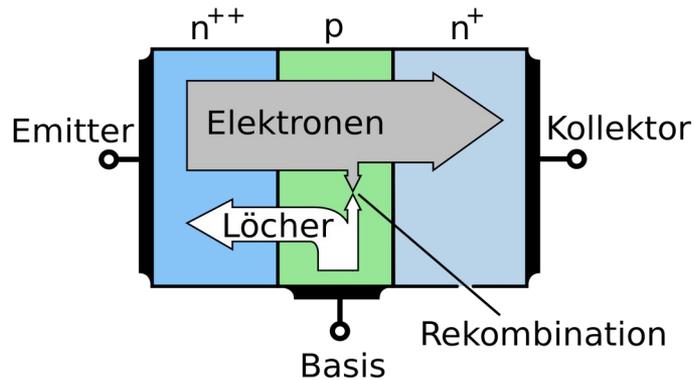
Leistungsangaben der Hersteller
nicht immer vertrauenswürdig !

Zwei PN-Übergänge: der Bipolartransistor

Kleiner Strom von der Basis zum Emmitter

steuert sehr viel größeren Strom vom Kollektor zum Emmitter

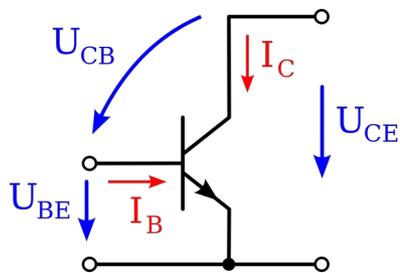
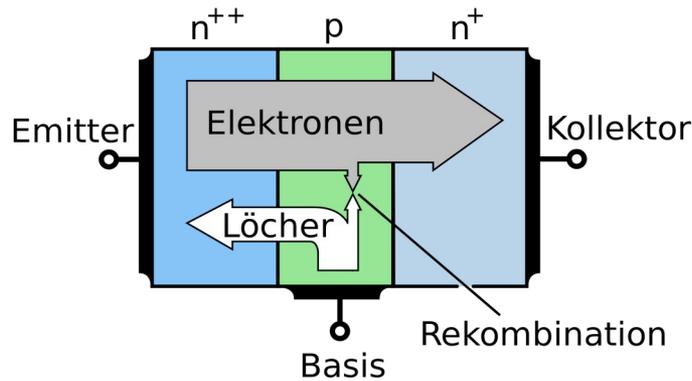
Der erste kommerziell erhältliche Transistortyp



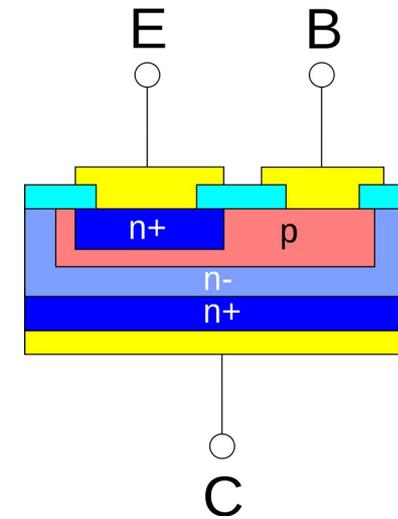
Zwei PN-Übergänge: der Bipolartransistor

Kleiner Strom von der Basis zum Emmitter
steuert sehr viel größeren Strom vom Kollektor zum Emmitter

Der erste kommerziell erhältliche Transistortyp



$$I_{CE} = \beta I_{BE}$$

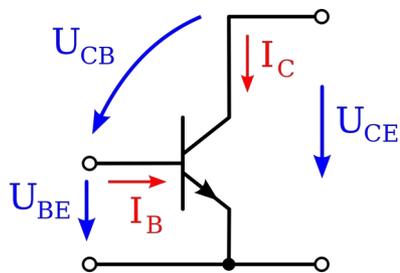
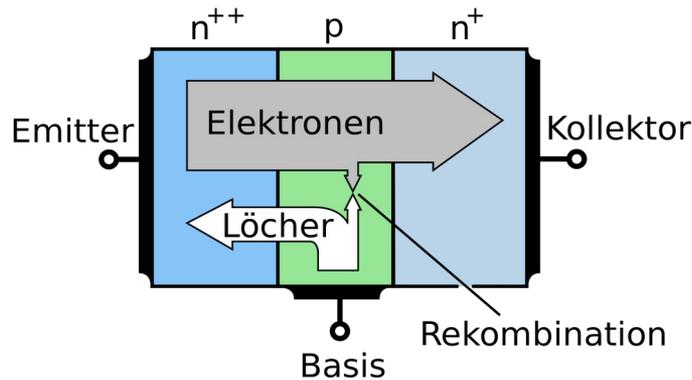


realistischere Darstellung
der Abfolge der Schichten;
es gibt auch Transistoren
mit Schichtfolge pnp

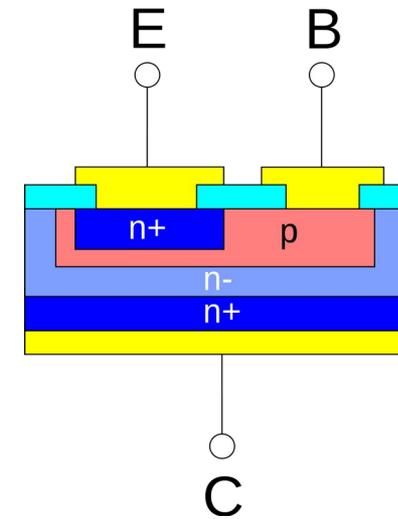
Zwei PN-Übergänge: der Bipolartransistor

Kleiner Strom von der Basis zum Emmitter
steuert sehr viel größeren Strom vom Kollektor zum Emmitter

Der erste kommerziell erhältliche Transistortyp



$$I_{CE} = \beta I_{BE}$$

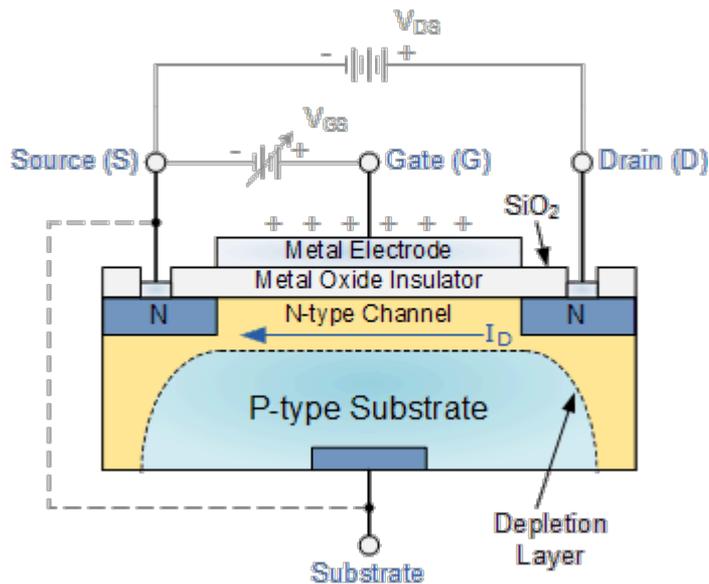


realistischere Darstellung
der Abfolge der Schichten;
es gibt auch Transistoren
mit Schichtfolge pnp

Einsatz als Verstärker oder elektronischer Schalter

Der Feld-Effekt-Transistor (FET)

Feldeffekt-Transistor = spannungsgesteuerter Widerstand,
- hier mit isolierter Gate-Elektrode Metall-Oxid-Schicht FET (MOSFET)

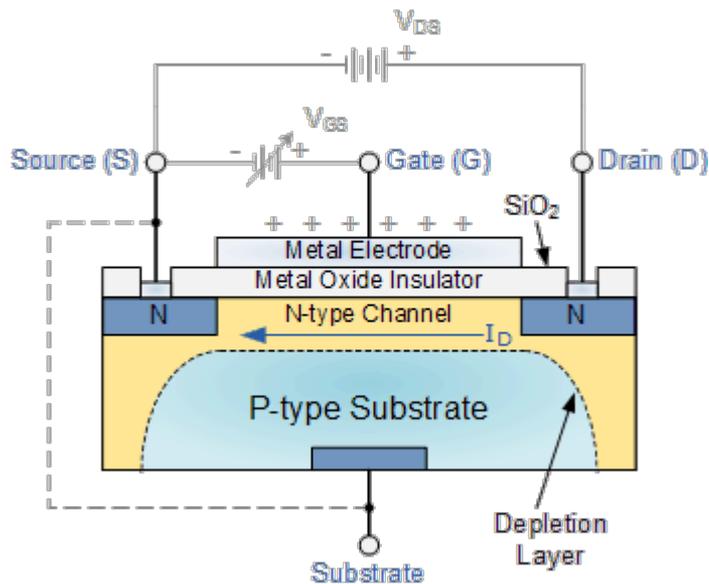


Elektrisches Feld an der isolierten Gate-Elektrode steuert Strom von Source → Drain

Vorteil des MOSFET: sehr hoher Innenwiderstand, d.h. leistungslose Steuerung

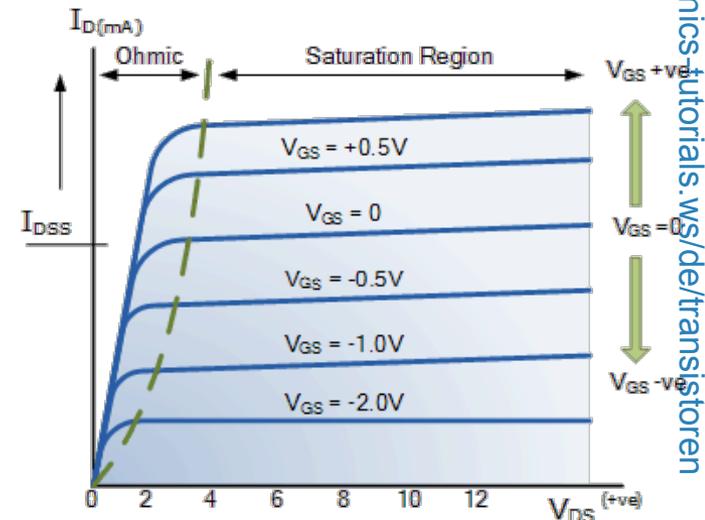
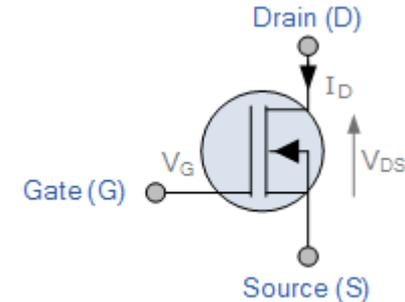
Der Feld-Effekt-Transistor (FET)

Feldeffekt-Transistor = spannungsgesteuerter Widerstand,
- hier mit isolierter Gate-Elektrode Metall-Oxid-Schicht FET (MOSFET)



Elektrisches Feld an der isolierten Gate-Elektrode steuert Strom von Source → Drain

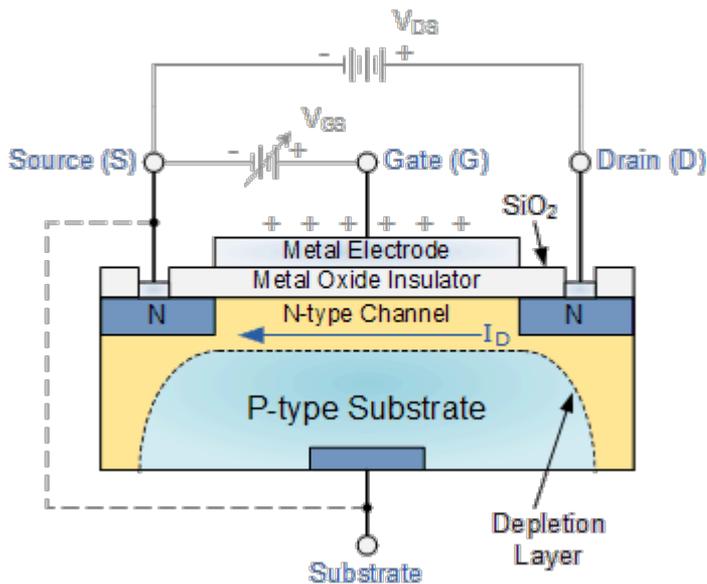
Vorteil des MOSFET: sehr hoher Innenwiderstand, d.h. leistungslose Steuerung



Symbol und Kennlinienfeld

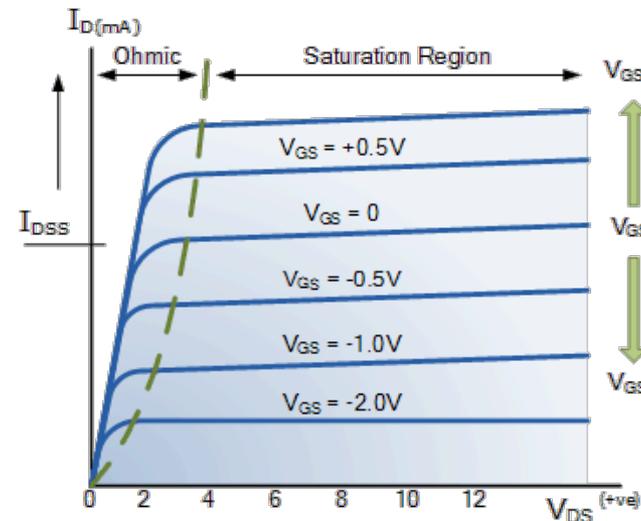
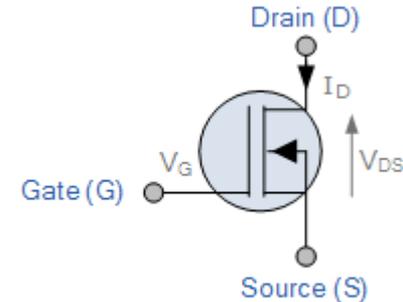
Der Feld-Effekt-Transistor (FET)

Feldeffekt-Transistor = spannungsgesteuerter Widerstand,
- hier mit isolierter Gate-Elektrode Metall-Oxid-Schicht FET (MOSFET)



Elektrisches Feld an der isolierten Gate-Elektrode steuert Strom von Source → Drain

Vorteil des MOSFET: sehr hoher Innenwiderstand, d.h. leistungslose Steuerung



Symbol und Kennlinienfeld

Einsatz als elektronischer Schalter in Digitalanwendungen
oder auch als Verstärker für kleine Signale

Pause

und Zeit für Fragen ?

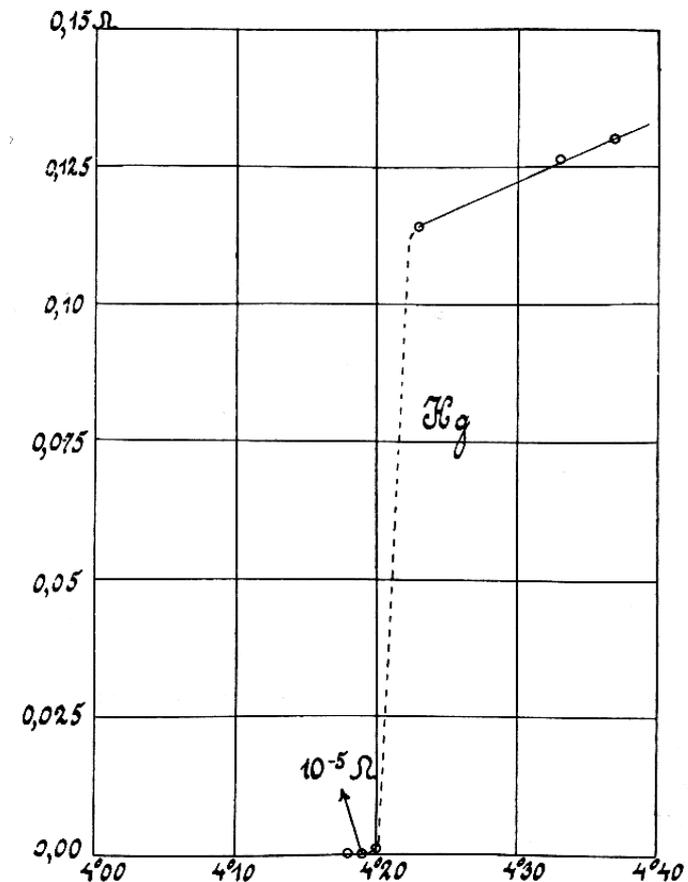
Supraleitung

Überraschende experimentelle Beobachtung

Heike Kamerlingh Onnes (1911) (Nobelpreis 1913)

Quecksilber verliert unterhalb einer für das Material charakteristischen Temperatur T_c („Sprungtemperatur“) den elektrischen Widerstand, d. h.

Leitfähigkeit $\sigma \rightarrow \infty$



Onnes, KAWA, December 30, 1911

Überraschende experimentelle Beobachtung

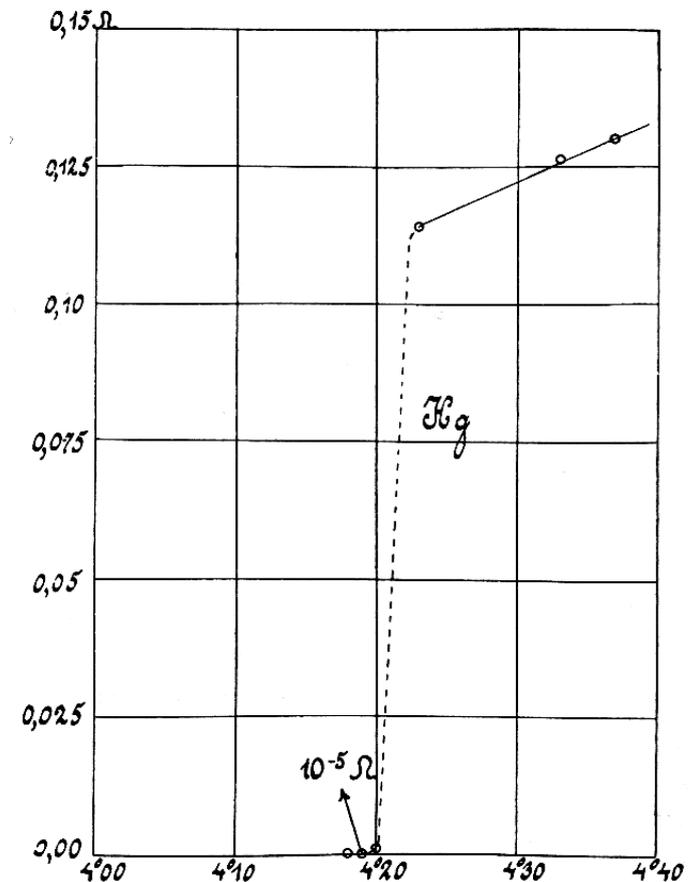
Heike Kamerlingh Onnes (1911) (Nobelpreis 1913)

Quecksilber verliert unterhalb einer für das Material charakteristischen Temperatur T_c („**Sprungtemperatur**“) den elektrischen Widerstand, d. h.

Leitfähigkeit $\sigma \rightarrow \infty$

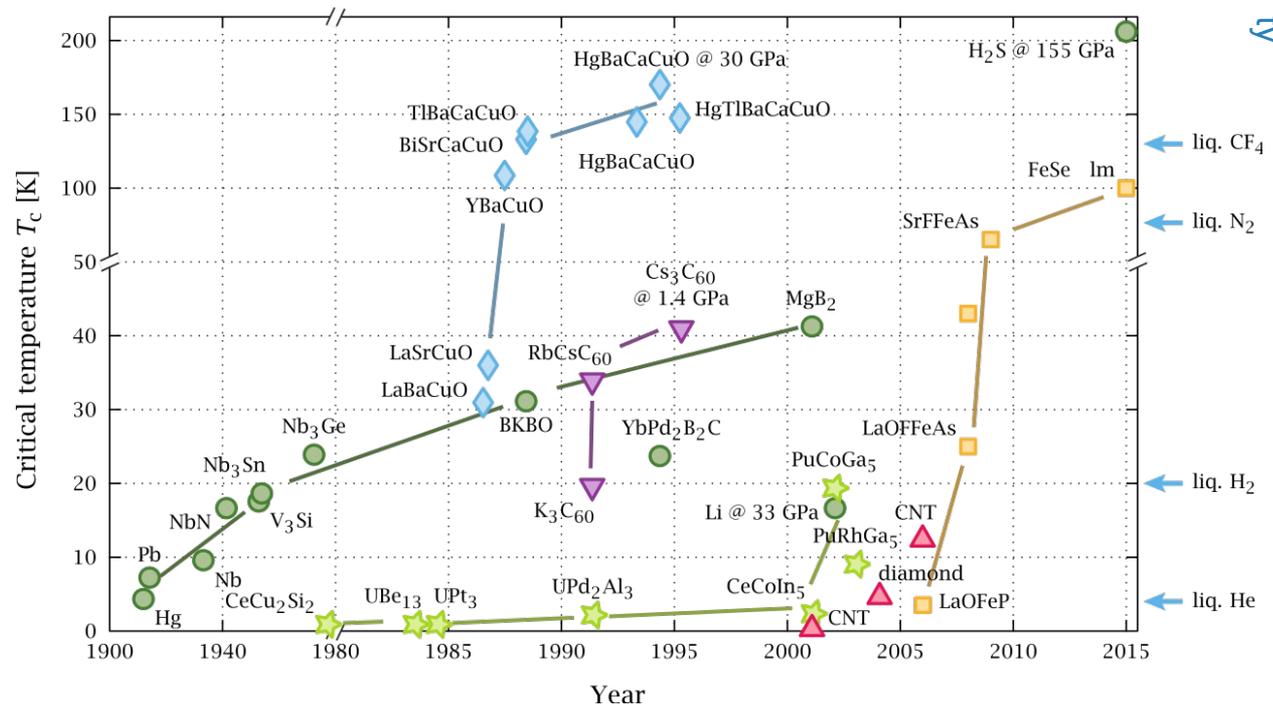


Heike Kamerlingh Onnes



Onnes, KAWA, December 30, 1911

Supraleitung wurde bis heute bei einer großen Anzahl
Metallen, Legierungen und Verbindungen beobachtet.

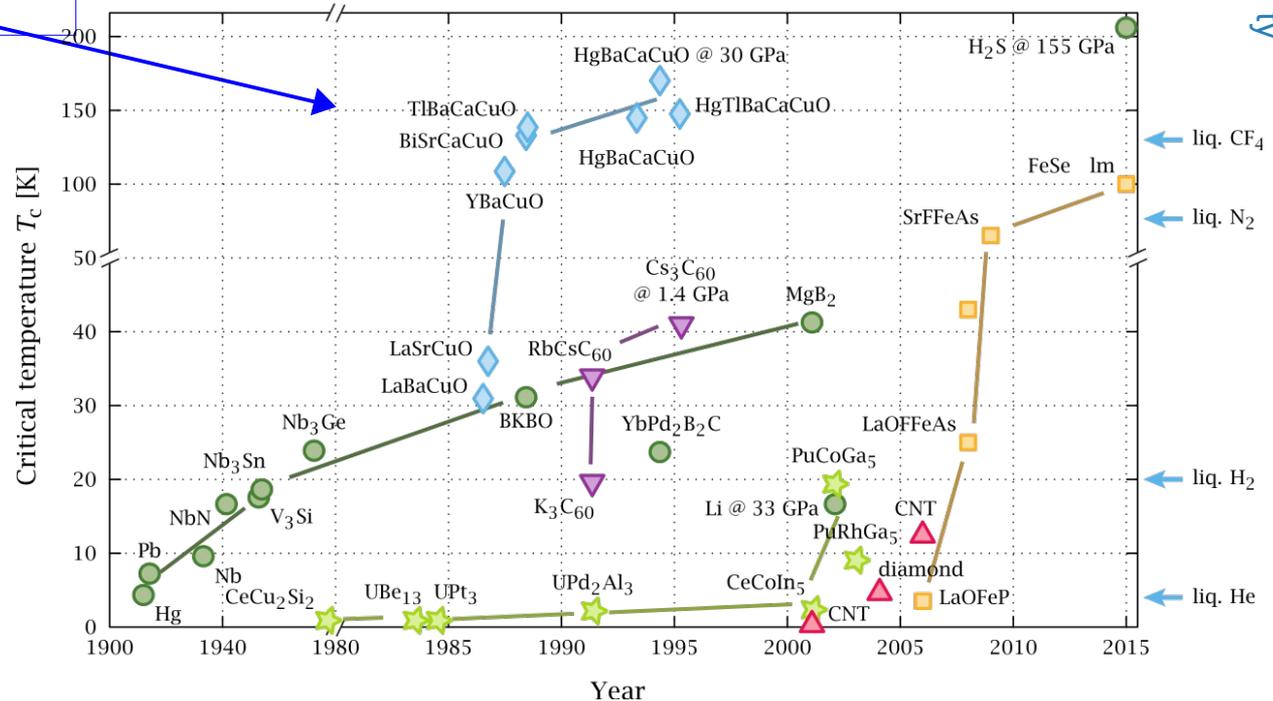


Es gibt verschiedene Arten von Supraleitern

- die dunkelgrünen Punkte bezeichnen „konventionelle“ Supraleiter, die theoretisch gut verstanden sind („BCS-Theorie“)

Supraleitung wurde bis heute bei einer großen Anzahl
Metallen, Legierungen und Verbindungen beobachtet.

Neue Klasse von
Hochtemperatursupraleitern



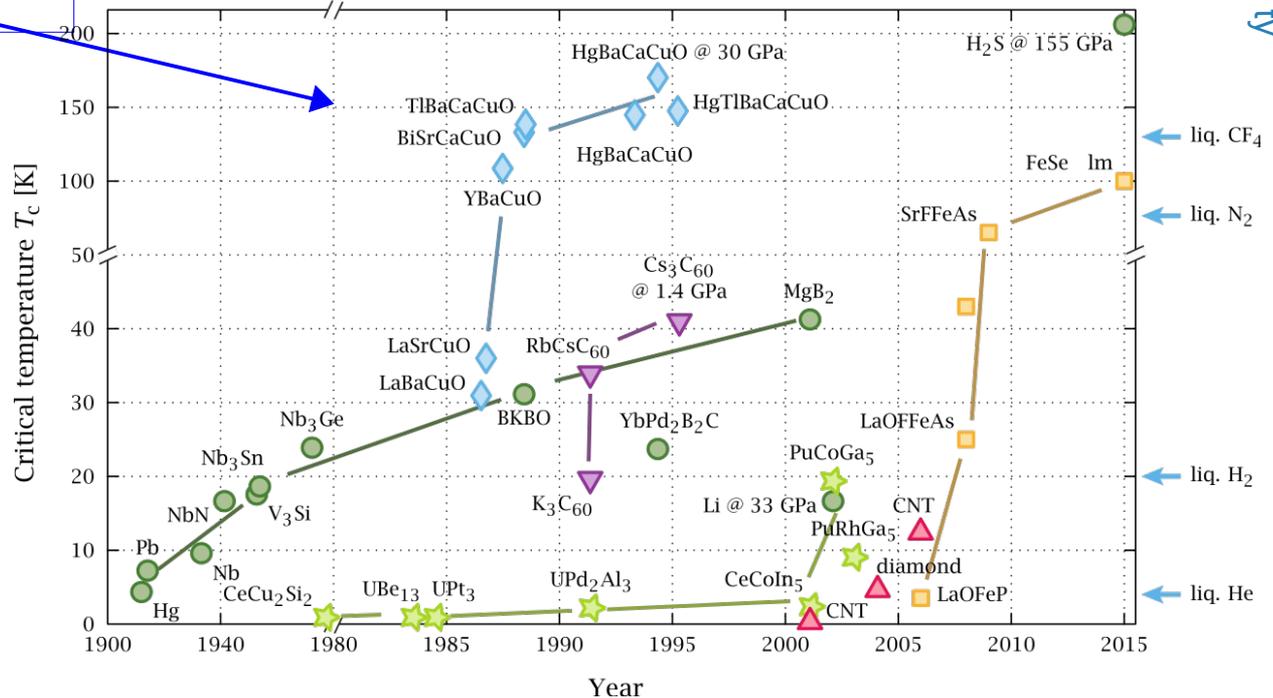
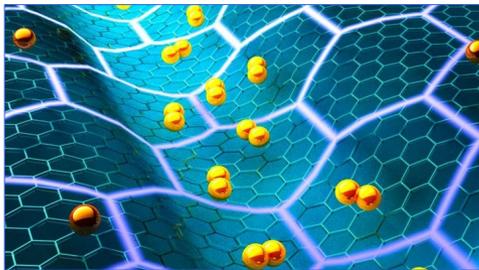
Es gibt verschiedene Arten von Supraleitern

- die dunkelgrünen Punkte bezeichnen „konventionelle“ Supraleiter, die theoretisch gut verstanden sind („BCS-Theorie“)

Supraleitung wurde bis heute bei einer großen Anzahl Metallen, Legierungen und Verbindungen beobachtet.

Neue Klasse von **Hochtemperatursupraleitern**

2018: auch zwei Lagen aus Graphen (einlagige Graphit-Schicht) zeigen Supraleitung

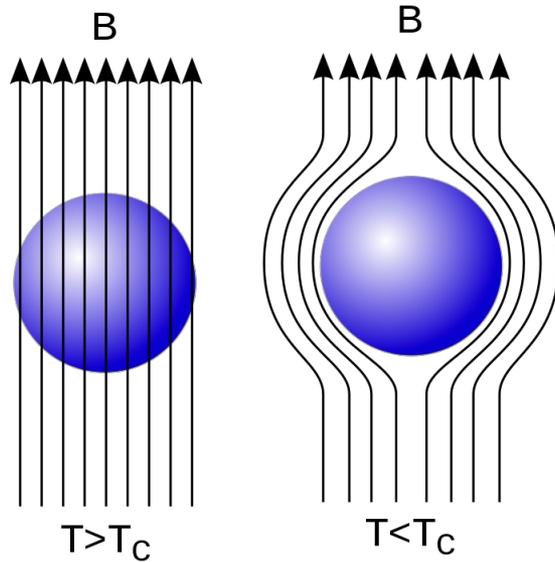


<https://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity>

Es gibt verschiedene Arten von Supraleitern

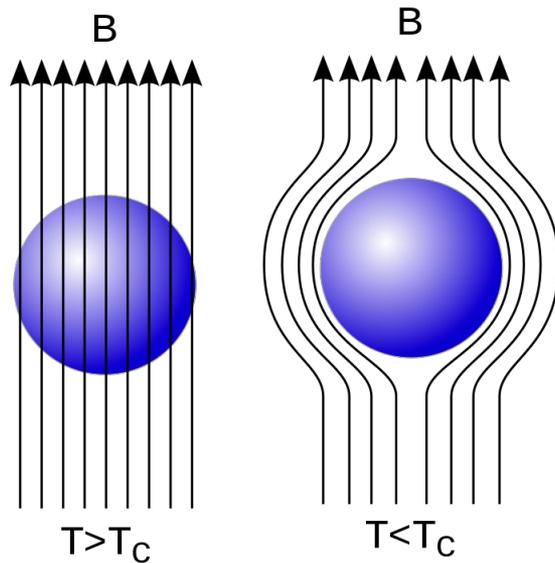
- die dunkelgrünen Punkte bezeichnen „konventionelle“ Supraleiter, die theoretisch gut verstanden sind („BCS-Theorie“)

Charakteristisches Merkmal:



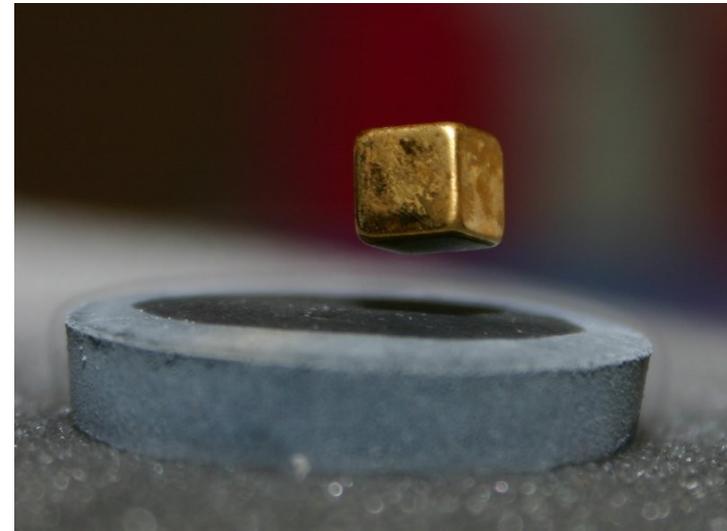
Magnetfelder (unterhalb einer kritischen Stärke) werden aus Supraleitern herausgedrängt
Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Charakteristisches Merkmal:



Magnetfelder (unterhalb einer kritischen Stärke) werden aus Supraleitern herausgedrängt
Meißner-Ochsenfeld-Effekt

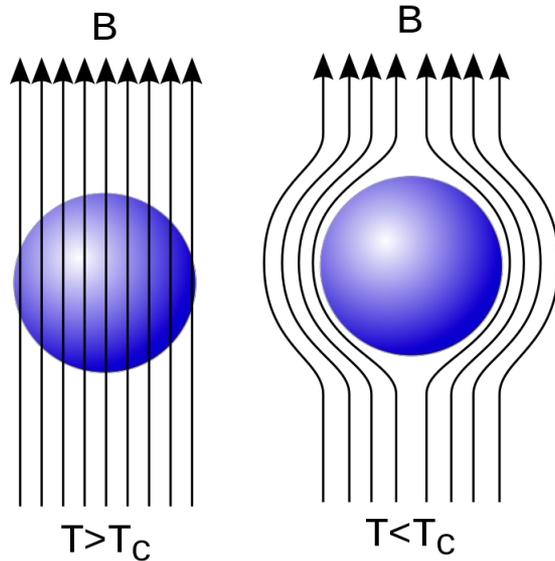
Spektakulärer Effekt:



Gemäß der Lenz'schen Regel werden im idealen Leiter Oberflächenströme induziert, die Magnetfeldänderungen entgegen wirken

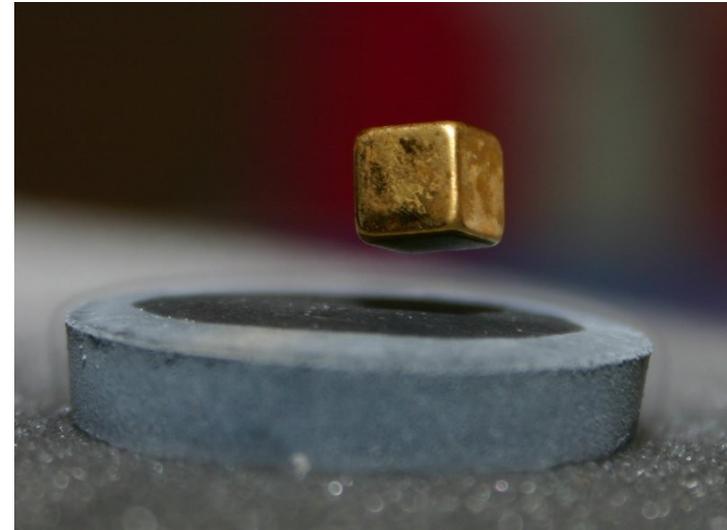
→ supraleitende Probe schwebt über einem Magneten

Charakteristisches Merkmal:



Magnetfelder (unterhalb einer kritischen Stärke) werden aus Supraleitern herausgedrängt
Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Spektakulärer Effekt:



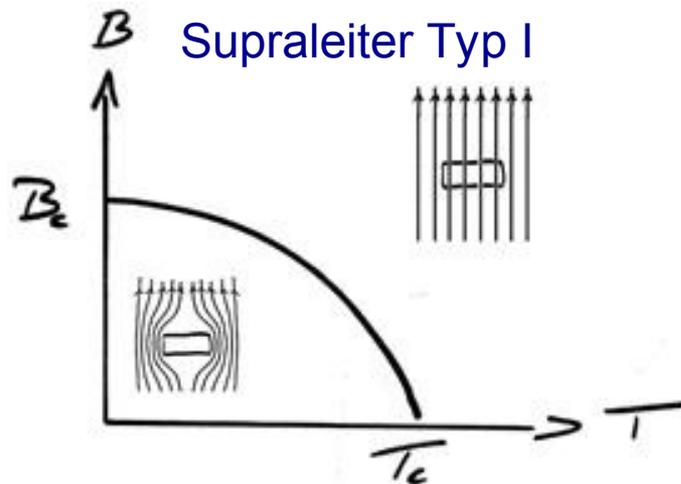
Gemäß der Lenz'schen Regel werden im idealen Leiter Oberflächenströme induziert, die Magnetfeldänderungen entgegen wirken

→ supraleitende Probe schwebt über einem Magneten

Das Innere von Supraleitern ist frei von magnetischen Feldern

Die Sprungtemperatur hängt vom angelegten Magnetfeld ab:

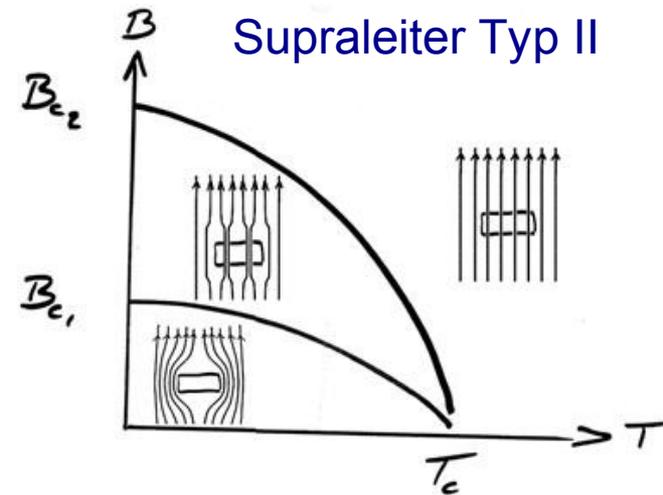
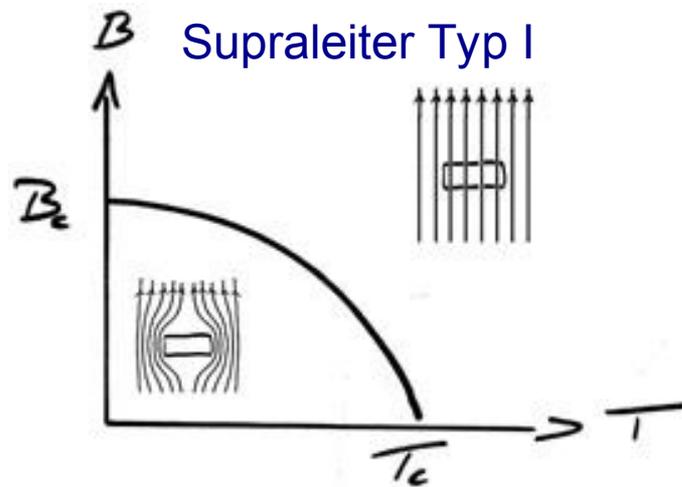
- bei größerem Magnetfeld sinkt die Sprungtemperatur
- oberhalb einer kritischen Feldstärke des B-Felds ist keine Supraleitung mehr möglich.



→ da Ströme Magnetfelder erzeugen,
begrenzt dieser Effekt die maximale Stromstärke

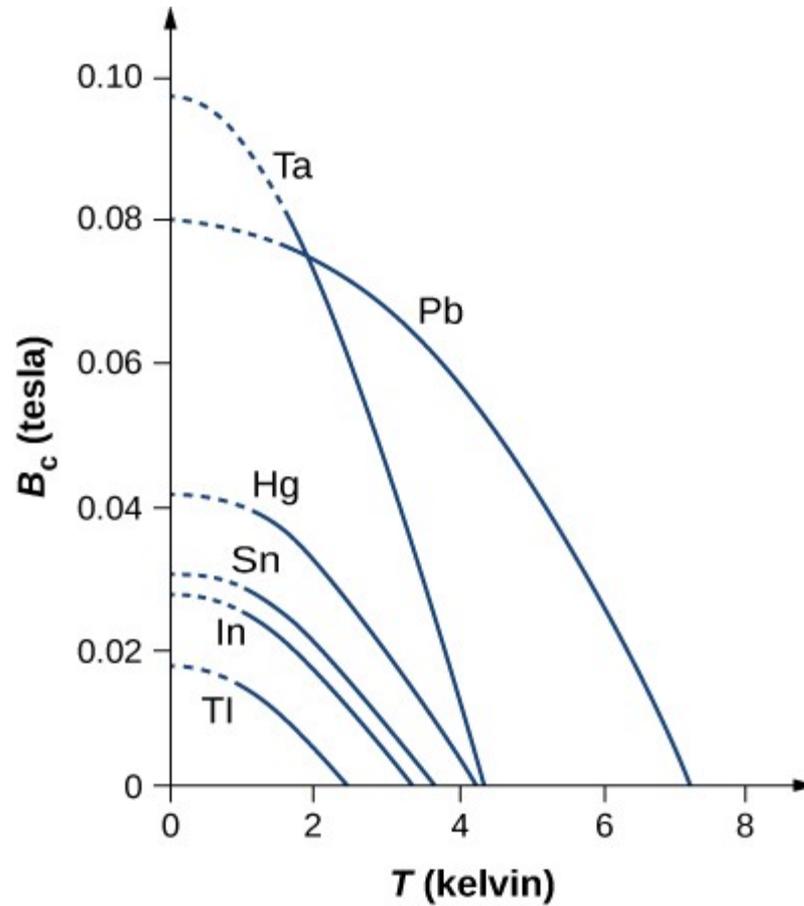
Die Sprungtemperatur hängt vom angelegten Magnetfeld ab:

- bei größerem Magnetfeld sinkt die Sprungtemperatur
- oberhalb einer kritischen Feldstärke des B-Felds ist keine Supraleitung mehr möglich.



→ da Ströme Magnetfelder erzeugen, begrenzt dieser Effekt die maximale Stromstärke

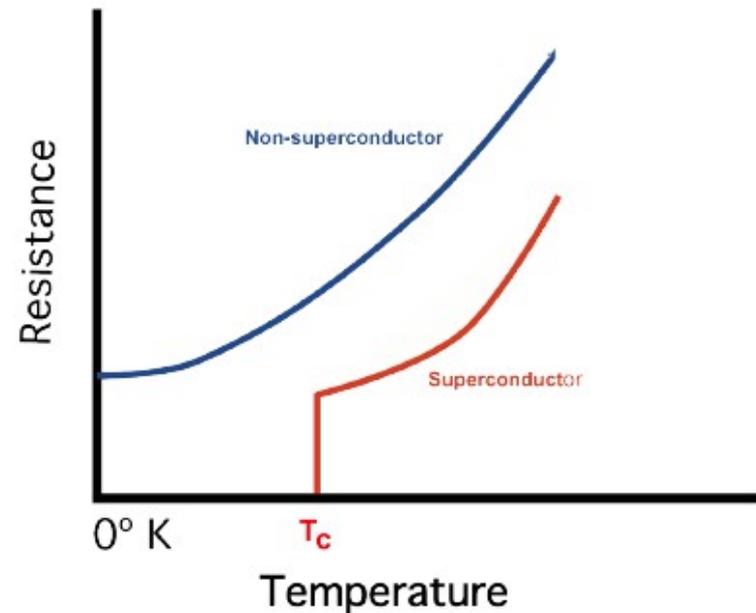
Bei **Typ II-Supraleitern** ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt nicht vollständig
→ Magnetfeld im Leiter möglich (wichtig für den Bau supraleitender Magnete)



https://phys.libretexts.org/@api/deki/files/9846/CNX_UPPhysics_42_08_TempDep.jpg?revision=1

Kritische Magnetfeldstärken und Sprungtemperatur für verschiedene Supraleiter

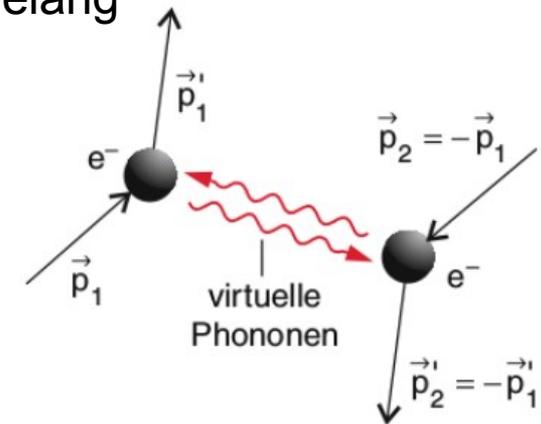
Elektrische Leitfähigkeit $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m^*}$



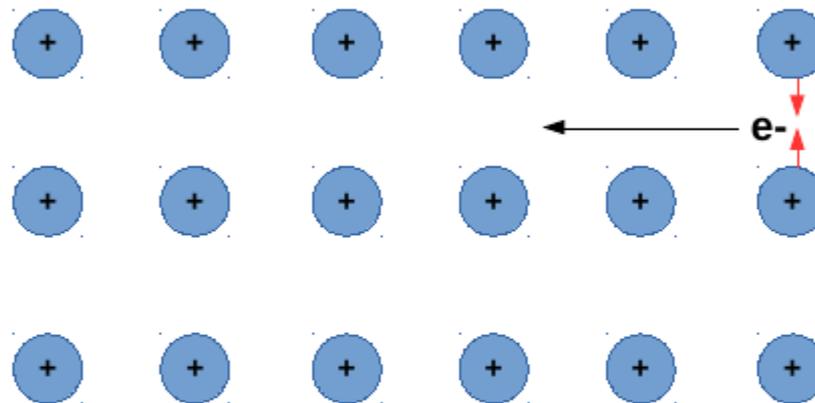
Die theoretische Beschreibung für metallische Supraleiter gelang Bardeen, Cooper und Schrieffer (BCS-Theorie, 1957):

Wechselwirkung von Phononen (Gitterschwingungen) mit Elektronen erzeugt (schwach) gebundene Elektron-Paar

- ein bosonischer Zustand statt zwei Fermionen, ein Cooper-Paar mit abgesenkter Gesamtenergie, bewegt sich reibungsfrei im Gitter

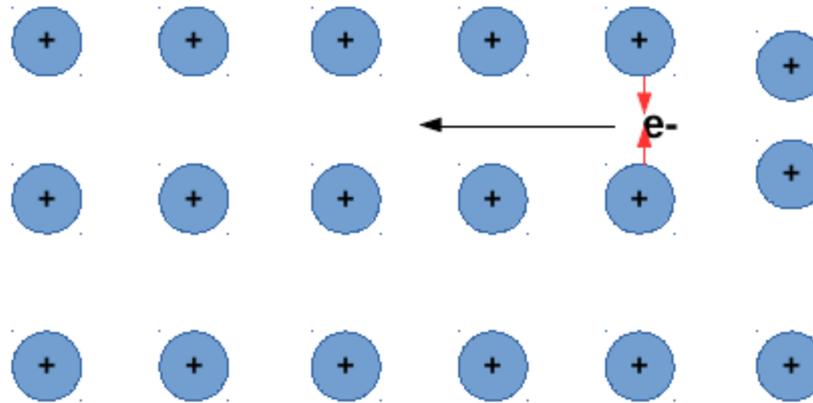


Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?



Coulombkräfte
zwischen Gitter
und
Elektron

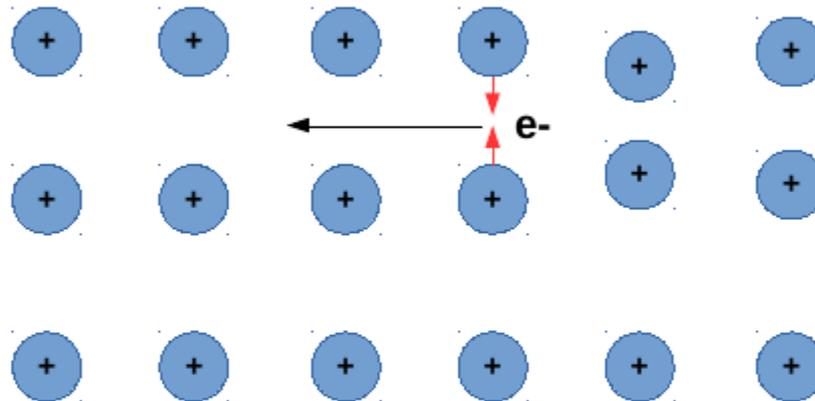
Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?



Coulombkräfte
zwischen Gitter
und
Elektron

→ Deformation des
Gitters

Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?

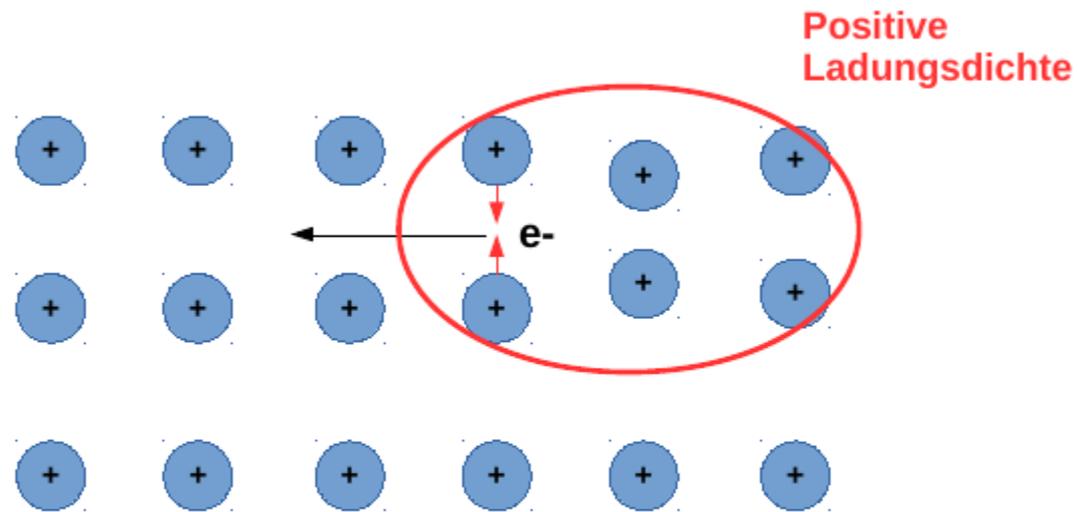


**Coulombkräfte
zwischen Gitter und
Elektron**

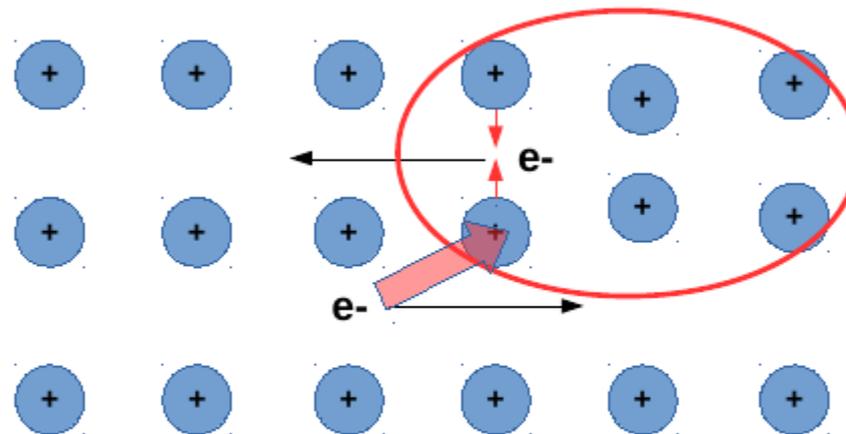
→ **Deformation des
Gitters**

→ **Deformation bleibt
nach Durchgang des
 e^- wegen Trägheit
der Atomrümpfe
bestehen**

Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?



Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?

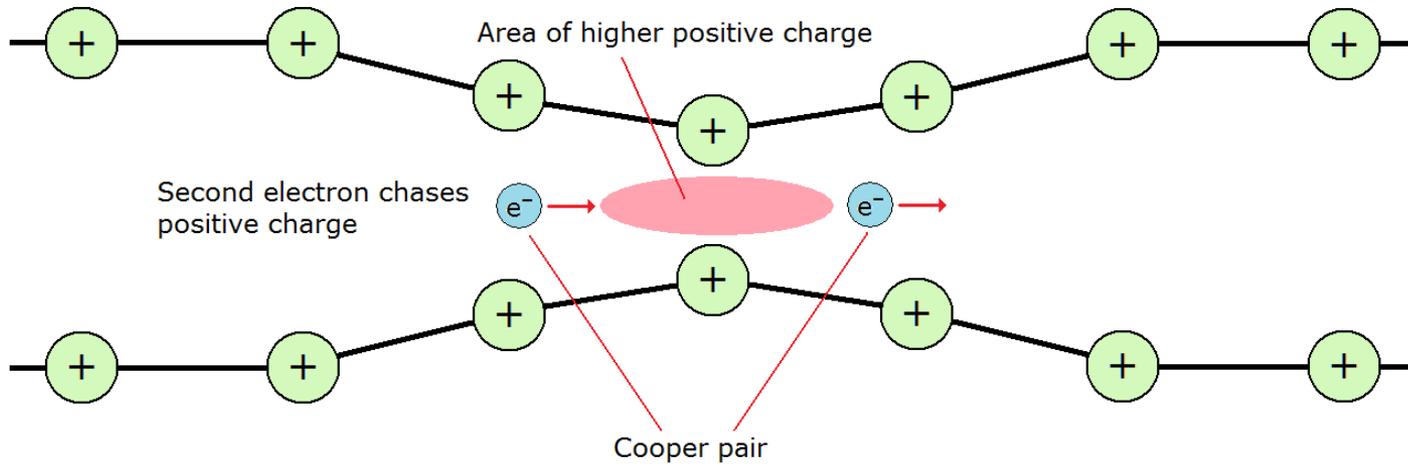


Weiteres e^- wird von positiver Ladungsdichte angezogen. Anziehung und Coulomb-Abstoßung überkompensieren sich, wenn e^- nicht zu nahe kommt.

Genauere Betrachtung: Energieabsenkung kann nur dann größer werden als Coulombabstoßung, wenn sowohl Impuls als auch Spin der beiden Elektronen antiparallel sind.

→ **Bindung zweier Elektronen über (virtuelle) Phononen.**

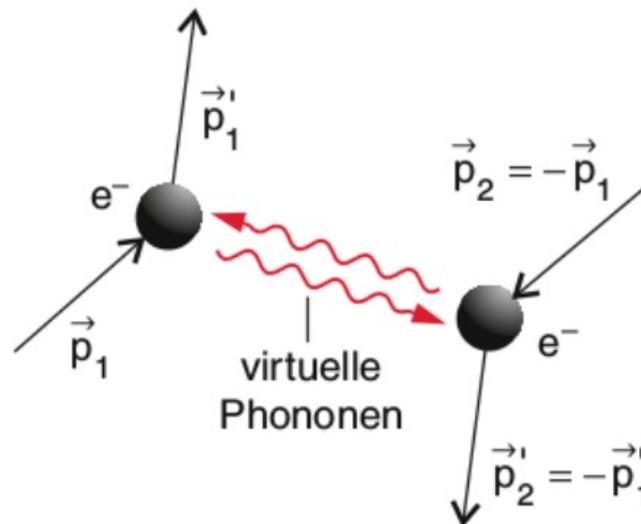
alles in einer Grafik zusammengefasst:



Kurzzeitige Bindung zweier Elektronen über (virtuelle) Phononen

$(e^- : \vec{p}, \vec{s}; e^- : -\vec{p}, -\vec{s}) \rightarrow$ **Cooper-Paar (Leon Cooper, 1956)**

- **kurze Lebensdauer:** Elektronen fliegen auseinander oder kommen sich zu nahe
- neues Cooper-Paar formt sich
- einzelne Gitterschwingungen („Phononen“) existieren nur während kurzer Korrelationszeit → **„virtuelle Phononen“**



Elektron \leftrightarrow Phonon \leftrightarrow Elektron Wechselwirkung

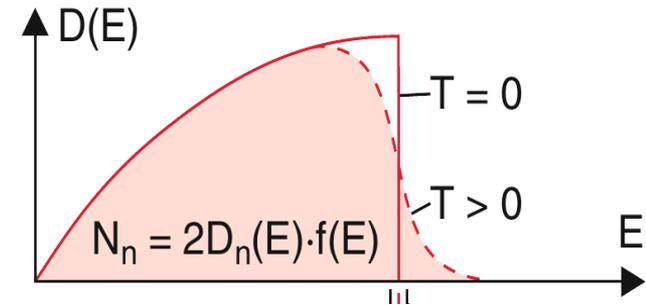
Im nächsten Zeitintervall löst sich die Verbindung, andere Elektronen bilden Cooper-Paar.

Elektronen sind ununterscheidbar
→ Cooper-Paare mit gleicher Gesamtenergie sind ununterscheidbar.

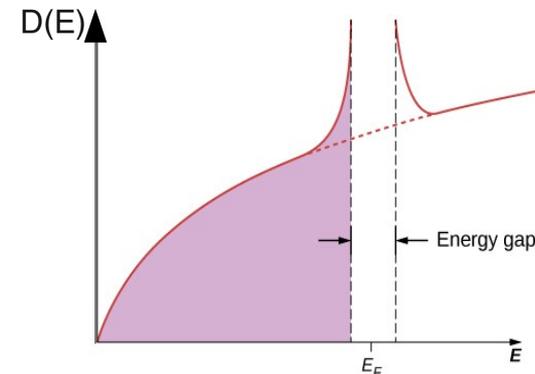
Alle Teilchen in Superposition von allen möglichen Cooper-Paar Zuständen → **eine gemeinsame makroskopische Wellenfunktion.**

BCS-Theorie: makroskopische Wellenfunktion aller Cooper-Paare, aus der sich alle Eigenschaften des Supraleiters berechnen lassen.

Zustandsdichte
im normalleitenden Zustand



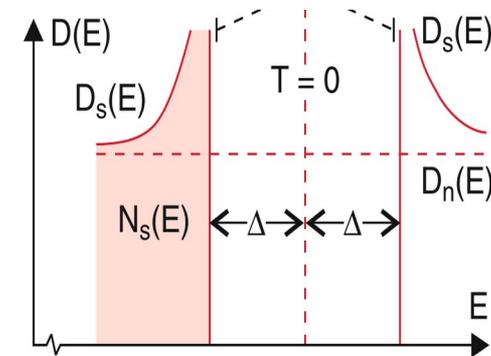
Zustandsdichte
im supraleitenden Zustand



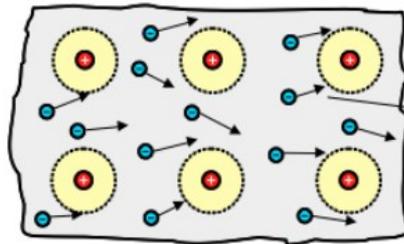
Cooper-Paare an der Fermi-Kante

- Absenkung der Energie (um Betrag Δ)
 - zusätzliche freie Zustände
 - verbotener Bereich der Breite 2Δ
- Cooper-Paare können keine beliebig kleinen Energiebeträge aufnehmen !

$$D_s(E) = D_n(E) \cdot \frac{|E - E_F|}{\sqrt{(E - E_F)^2 - \Delta^2}}$$



Erinnerung: Drude-Modell



Kollision der Elektronen mit den Atomen im Kristallgitter

→ elektrischer Widerstand als „Reibung“: Streuung von Elektronen an Gitteratomen

Bild 7-1: Ursache des elektrischen Widerstands

In der Supraleitenden Phase:

- Energie der Gitterschwingungen reicht nicht aus, Cooper-Paare aufzubrechen
 - Energielücke führt dazu, dass keine andern möglichen Zustände verfügbar sind, in die Cooper-Paare gestreut werden könnten
- **verlustfreier Ladungstransport durch Cooper-Paare**

$T > T_c$:

- Energie des Gitters reicht aus, um Cooper-Paare aufzubrechen
- **Normalleitung**

Die Londonschen Gleichungen (Fritz und Heinz London 1935)

Beschreibung der Supraleitung ohne auf die Träger des Suprastromes einzugehen. Beschreiben den widerstandslosen Transport und den **Meißner-Ochsenfeld-Effekt** (→ später).

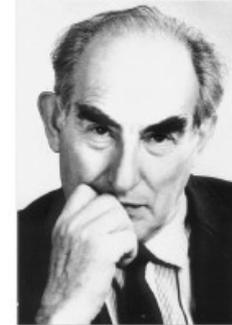


Fritz London

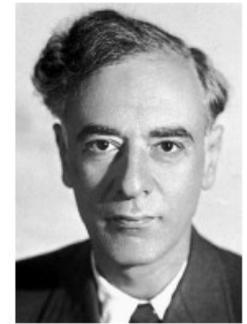
Ginsburg-Landau-Theorie (Witali Ginsburg und Lew Landau 1950)

Phänomenologische Beschreibung von Supraleitung mit Hilfe von Cooper-Paaren.

Nobelpreis 2003



Witali Ginsburg



Lew Landau

BCS-Theorie (John Bardeen, Leon N. Cooper und John R. Schrieffer 1957)

Fundamentale, mikroskopische Beschreibung der Supraleitung. Cooper-Paare, beschrieben durch makroskopische Wellenfunktion, aus der sich alle Eigenschaften des Supraleiter bestimmen lassen. Die BCS-Theorie entstand etwa 50 Jahre nach der Entdeckung des Phänomens.



John Bardeen



Leon Cooper



John Schrieffer

Nobelpreis 1972

Bardeen: Weltbester Physiker → erste Person mit zwei Nobelpreisen in Physik (1956: Transistoreffekt, 1972: BCS-Theorie)

(Marie Curie: 1x Physik, 1x Chemie)

Verständnis nicht-konventioneller Supraleiter, insb.

- Hochtemperatur-Supraleiter
- Graphen-Lagen
- nicht-metallische Supraleiter

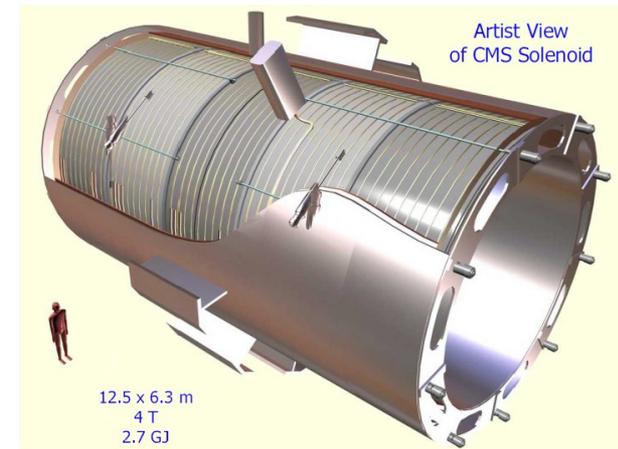
ist Gegenstand der aktuellen Forschung

z.B.:

- Erzeugung starker Magnetfelder, z.B.
 - Magnetresonanztomografie
 - Teilchenbeschleuniger und Detektoren
 - für Forschungszwecke

z.B.:

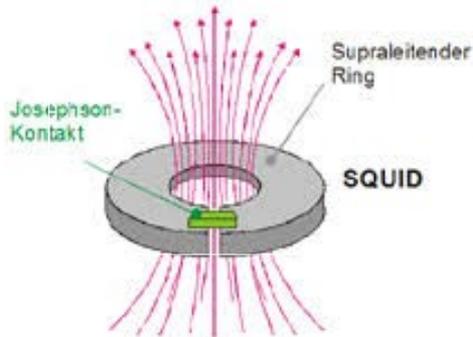
- Erzeugung starker Magnetfelder, z.B.
 - Magnetresonanztomografie
 - Teilchenbeschleuniger und Detektoren
 - für Forschungszwecke



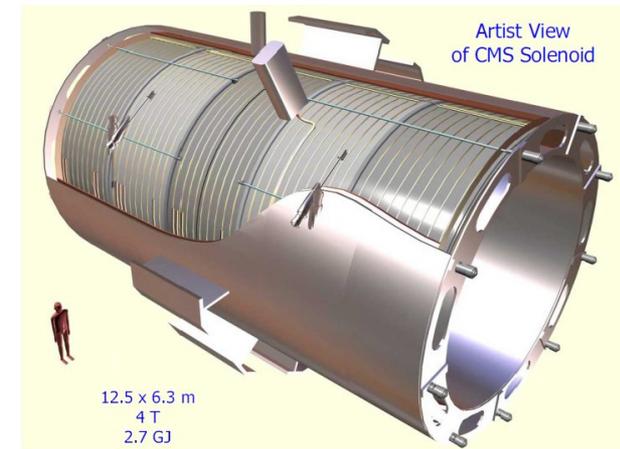
z.B.:

- Erzeugung starker Magnetfelder, z.B.
 - Magnetresonanztomografie
 - Teilchenbeschleuniger und Detektoren
 - für Forschungszwecke

- Elektronische Bauteile, z.B. SQUIDS



(superconducting quantum interference device): präzise Messung geringer Magnetfeldänderungen

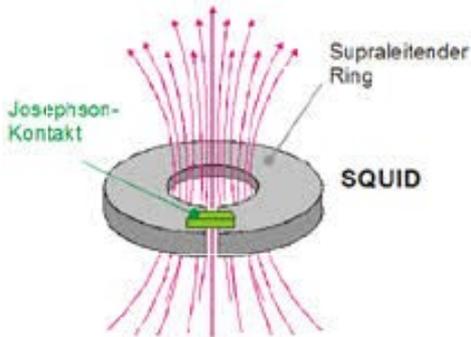


z.B.:

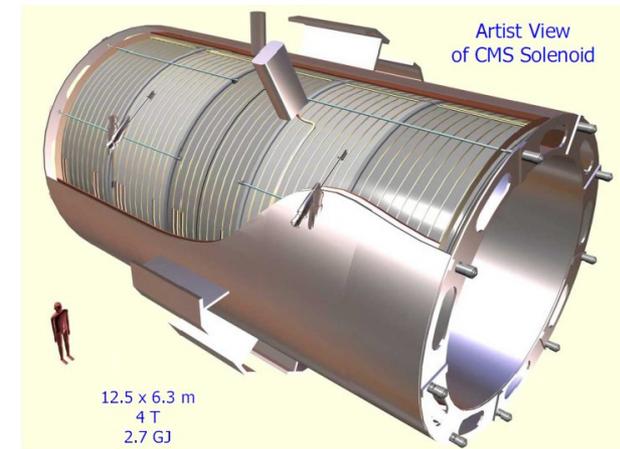
- Erzeugung starker Magnetfelder, z.B.
 - Magnetresonanztomografie
 - Teilchenbeschleuniger und Detektoren
 - für Forschungszwecke



- Elektronische Bauteile, z.B. SQUIDS



(superconducting quantum interference device): präzise Messung geringer Magnetfeldänderungen



- Verlustfreier Energietransport
(2014 integrierte die Stadt Essen das bisher längste Supraleiterkabel in den städtischen Betrieb)



Der Bereich der „Kondensierten Materie“, zu dem die Festkörperphysik gehört, ist ein sehr aktives Forschungsgebiet und die größte Sektion z.B. in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

In dieser Vorlesung konnten nur Grundlagen und ausgewählte Themen behandelt werden. Es gäbe noch viele mehr:

- dielektrische und optische Eigenschaften
- magnetische Eigenschaften
- Oberflächenphysik
- amorphe Festkörper, „Flüssigkristalle“ und Cluster
- zweidimensionale Strukturen
- „Nano“-Physik und Meta-Materialien
- verschiedenste Aspekte der Supraleitung und Systeme für „Quanten-Computer“
- ...

Nächste Vorlesung

Kernphysik

Ende Vorlesung 19

und Zeit für Fragen ?