

Benutzte Quellen

- ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Vogelmann, Universität – Karlsruhe
 - ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Klos, Universität – Karlsruhe
 - ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Crokol, Universität – Karlsruhe
 - ❑ <http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik.html#unt>
 - ❑ <http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/index3.htm>
 - ❑ <http://www.elektronik-kompendium.de/sites>
 - ❑ <http://www.prof-gossner.de/>
 - ❑ <http://vcs.abdn.ac.uk/ENGINEERING/lasers/lasers.html>
 - ❑ <http://people.fh-landshut.de/~gsh/>
-
-

Benutzte Bezeichnungen

- Aufschrift der Thema, die zum ersten Mal erscheint
 - Aufschrift der Thema, die schon bekannt ist
-
-

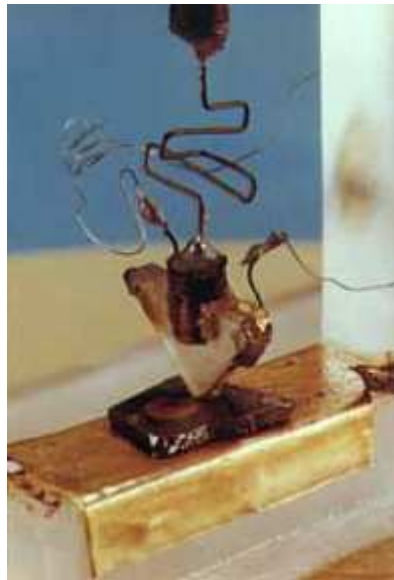
Halbleiterelektronik

- **Entwicklung der Halbleiterelektronik**
 - Halbleiterphysik
 - Halbleiter Herstellung (Si)
-
-
-

Entwicklung der Halbleiterelektronik

- ❑ 1871 ⇒ Entdeckung des Kristall-Detektor durch Ferdinand Braun
- ❑ 1938 ⇒ Entwicklung der Theorie der Halbleiter-Übergänge durch Schottky
- ❑ 1947 ⇒ Erfindung des bipolaren Transistors durch Bardeen, Brattain und Shockley
- ❑ 1954 ⇒ Erster bipolarer Silizium-Transistor (Texas Instruments)
- ❑ 1958 ⇒ Erster Thyristor (General Electric)
- ❑ 1958 ⇒ Erfindung des integrierten Schaltkreises durch Jack Kilby und Gordon Moore
- ❑ 1971 ⇒ Erster Mikroprozessor (Intel 4004, TI TMS1802NC)
- ❑ 2002 ⇒ Höchstintegration bei Speichern und Prozessoren (Pentium 4, 0,13 μm , 4,0 GHz, 42 Mio. Transistoren)
⇒ Höchstleistungen bei Leistungshalbleitern (IGBT bis 6500 V, 2400 A, Thyristor 8000 V, 3500 A)

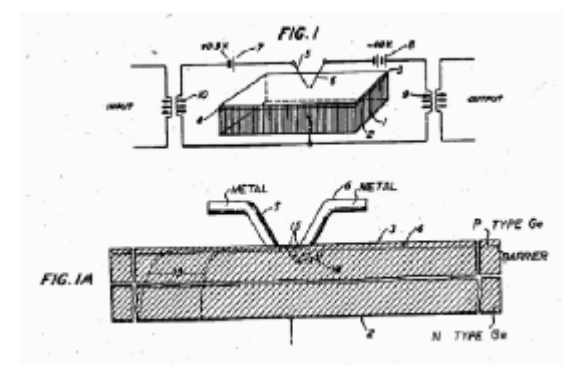
Entwicklung der Halbleiterelektronik



Erster Transistor
(1947)



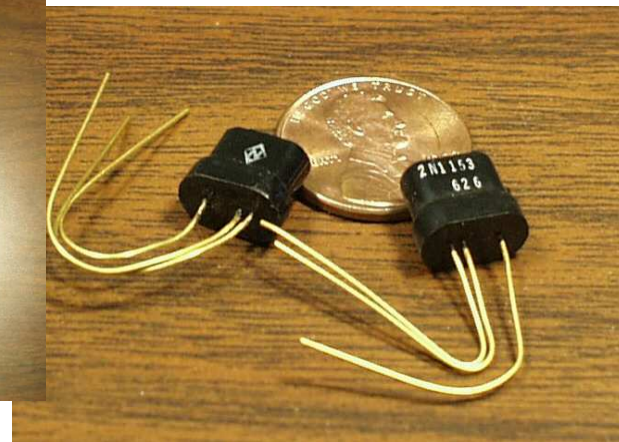
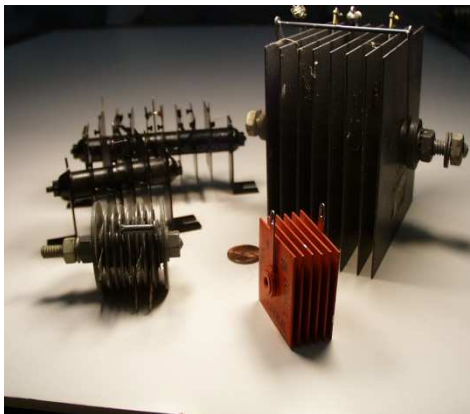
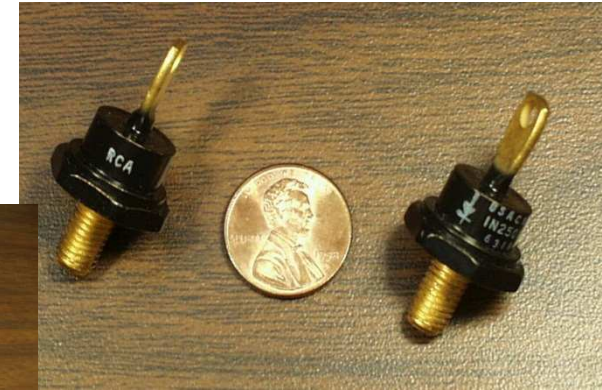
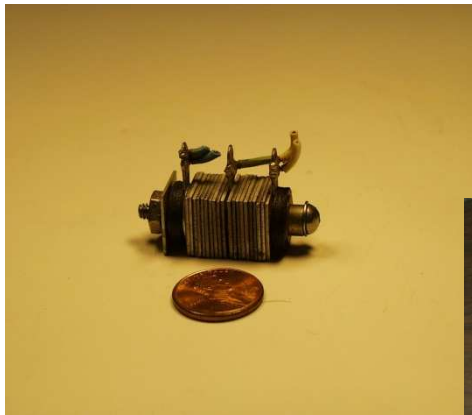
Bardeen, Brattain,
Shockley



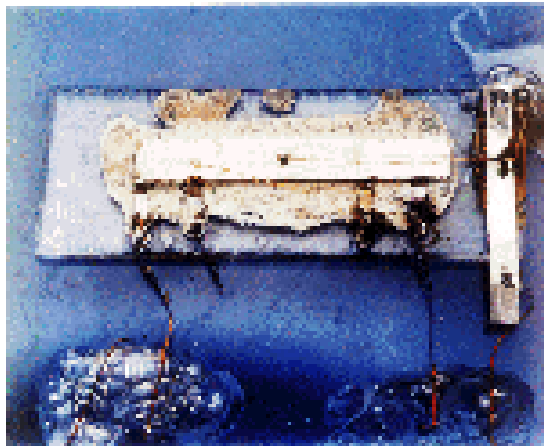
Patentskizze

1948: **Patent für den Transistor-Effekt und Transistor-Verstärker**
John Bardeen, Walter H. Brattain, William B. Shockley
(Bell Telephone Laboratories, New York)

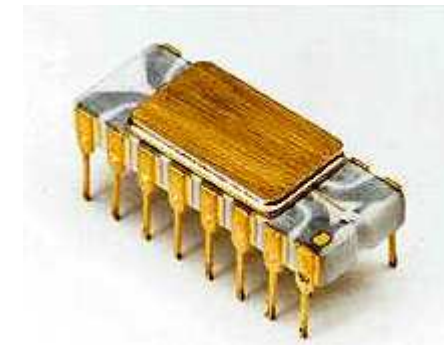
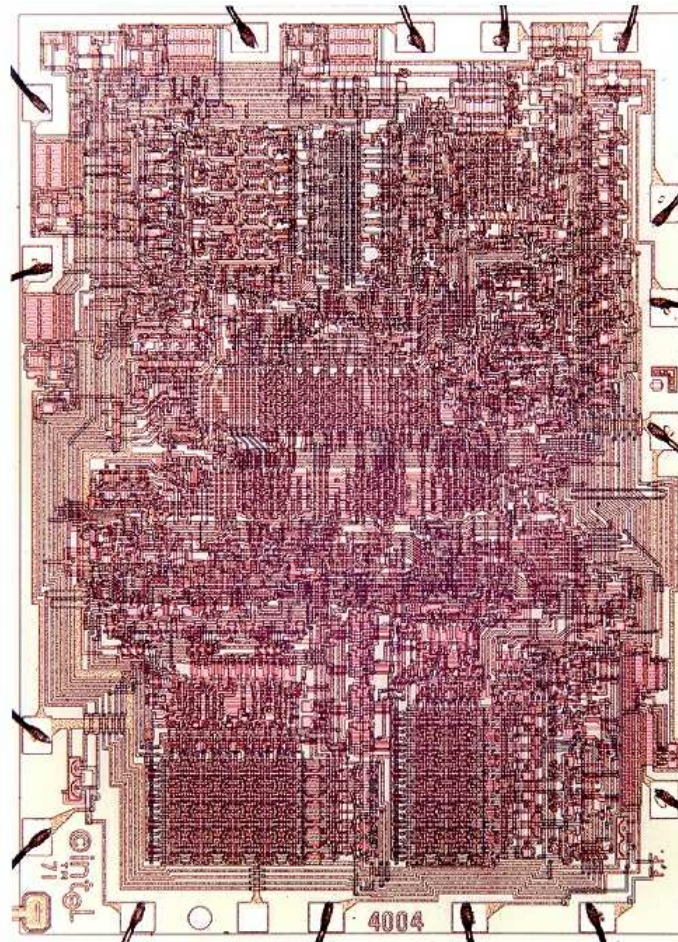
Entwicklung der Halbleiterelektronik



Entwicklung der Halbleiterelektronik

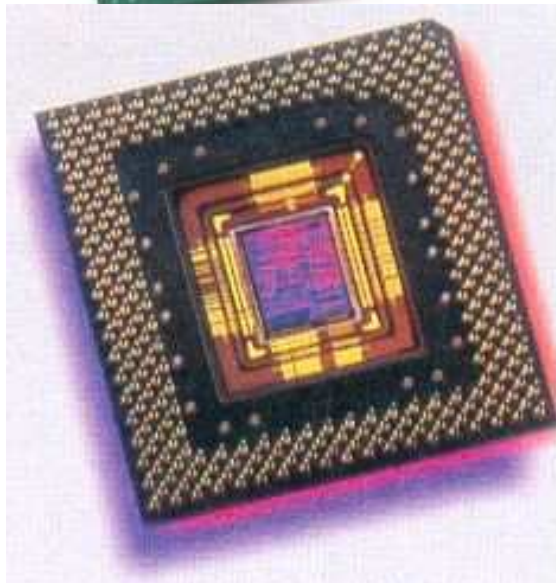


Erste integrierte
Schaltung (1958)



Erster Mikroprozessor
Intel 4004 (1971)

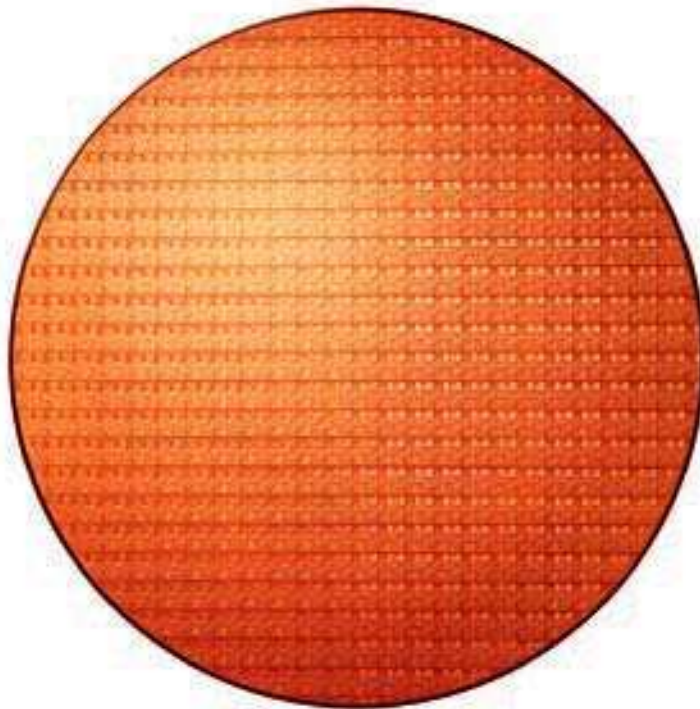
Entwicklung der Halbleiterelektronik



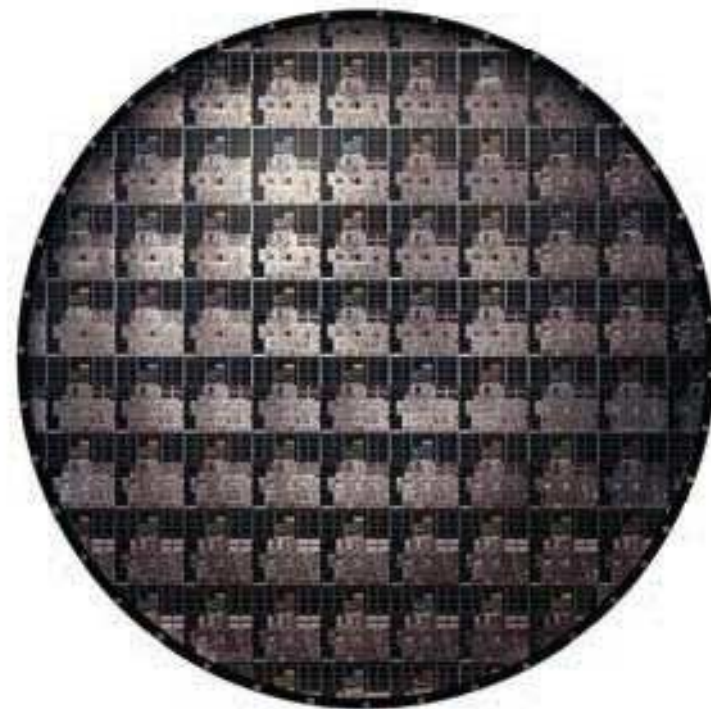
Microprocessor	Year of Introduction	Transistors
4004	1971	2,300
8008	1972	2,500
8080	1974	4,500
8086	1978	29,000
Intel286	1982	134,000
Intel386™ processor	1985	275,000
Intel486™ processor	1989	1,200,000
Intel® Pentium® processor	1993	3,100,000
Intel® Pentium® II processor	1997	7,500,000
Intel® Pentium® III processor	1999	9,500,000
Intel® Pentium® 4 processor	2000	42,000,000
Intel® Itanium® processor	2001	25,000,000
Intel® Itanium® 2 processor	2003	220,000,000
Intel® Itanium® 2 processor (9MB cache)	2004	592,000,000

Copyright © 2005 Intel Corporation.

Entwicklung der Halbleiterelektronik



Intel® Pentium® 4 Processor



Intel® Itanium® Processor

Halbleiterelektronik

- ❑ **Entwicklung der Halbleiterelektronik**
 - ❑ **Halbleiterphysik**
 - ❑ Halbleiter Herstellung (Si)
-
-

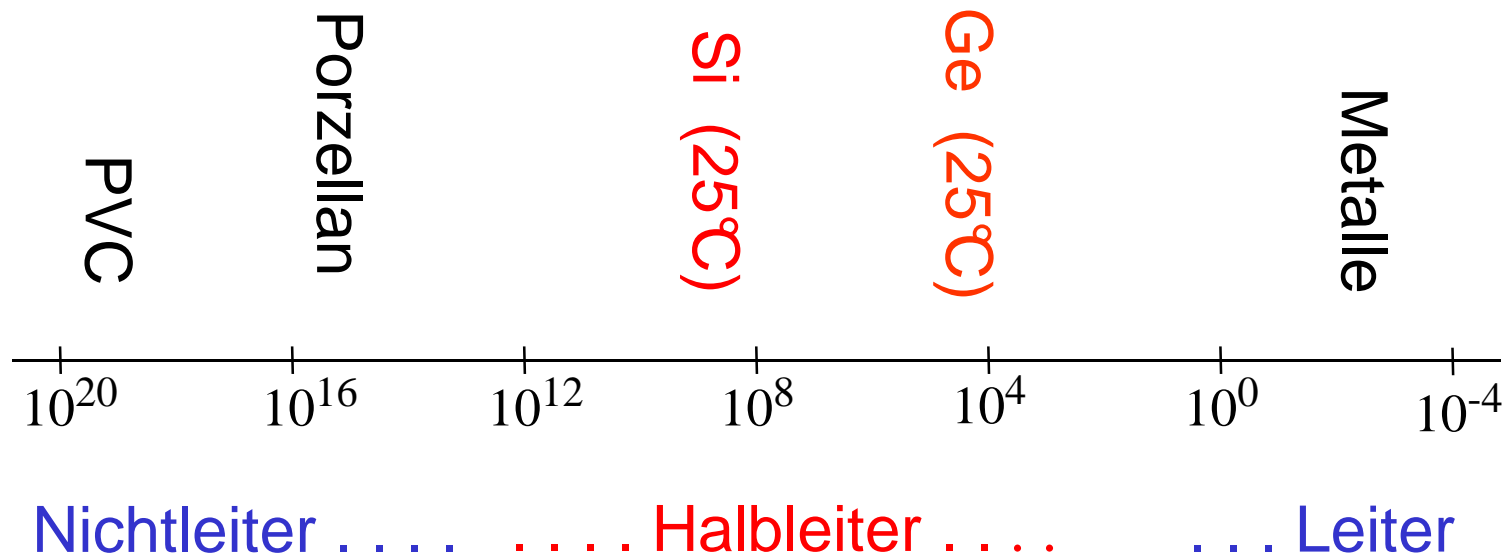
Halbleiterphysik

Lernziel:

- Antworten auf folgende und ähnliche Fragen geben zu können:
 - Was versteht man unter einem Halbleiter?
 - Wie ist ein Halbleiter aufgebaut?
 - Wie lassen sich Halbleiter in das System von Leitern und Nichtleitern einordnen?
 - Welche Leitungsmechanismen sind im Halbleiter wirksam?

Einordnung der Halbleiter

Spezifischer Widerstand unterschiedlicher Materialien in $\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$



Stromfluß

- Was versteht man unter Stromfluß?
 - Gerichtete Bewegung von Ladungsträgern

- Welche Ladungsträger gibt es?
 - Elektronen (insbesondere in Festkörpern) (-)
 - Ionen (in Elektrolyten) (+) oder (-)
 - ❖ Löcher (nur in Halbleitern) (+)

- Wie sind die Atome aufgebaut?

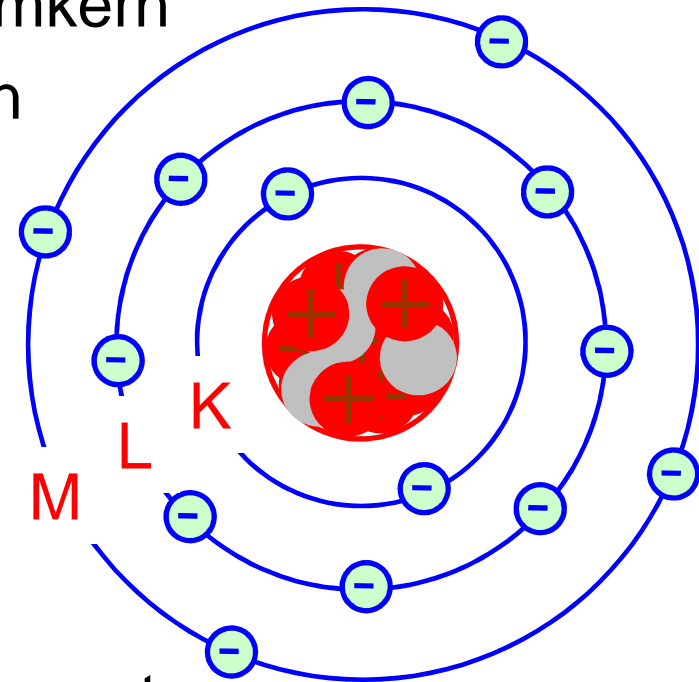
Aufbau von Atomen

- Die Atome sind aufgebaut von:
 - Protonen (**positiv aufgeladen**);
 - Elektronen (**negativ aufgeladen**);
 - Neutronen (**elektrisch neutral**).

- Das Atom ist neutral aufgeladen, weil:
 - Die Zahl der Protonen und Elektronen ist gleich;
 - Die Ladungen eines Elektrons und eines Protons kompensieren sich gegenseitig.

Aufbau von Atomen (Si)

- 14 Protonen + 14 Neutronen bilden den Atomkern
 - 14 Elektronen umkreisen den Atomkern
 - Es sind nur bestimmte Bahnradien möglich
 - Man spricht von Elektronenschalen
-
- Die Schalen werden von innen nach außen mit K, L, M usw. benannt



Belegung der Elektronenschalen

- Die maximale Zahl von Elektronen auf einer Schale beträgt

$$N_{\max} = 2 \times n^2$$

(aber maximal **8** auf der äußersten Schale)

Schale	K	L	M	N	O	P	Q	
n	1	2	3	4	5	6	7	
N_{\max}	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)	innere Schalen
N_{\max}	2	8	8	8	8	8	8	äußerste Schale (Edelgaskonfiguration)

Bindung der Atome

- Sie versuchen die maximal mögliche Zahl von Elektronen auf der äußeren Elektronenschale zu erreichen.
- Dies läßt sich erreichen durch:
 - Aufnahme von fremden Elektronen in die Valenzschale – wenn nur wenige Elektronen zur Edelgaskonfiguration fehlen
 - Abgabe aller Valenzelektronen der Schale – wenn nur wenige Valenzelektronen vorhanden sind
 - Gemeinsame Nutzung von Elektronenpaaren durch je zwei Atome

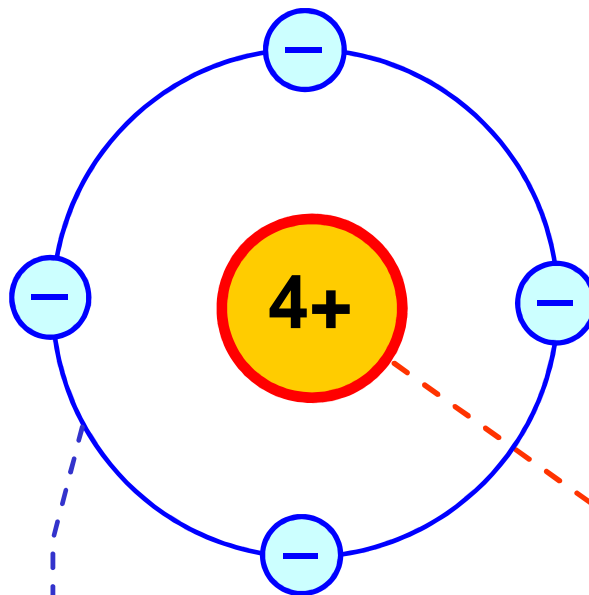
Bindung der Atome bei Metalle

- Bei der Metallbindung trennen sich die Valenzelektronen von ihren Atomen
- Die ursprünglichen Valenzelektronen sind zwischen den Atomen frei beweglich (sog. Elektronengas)
- in sehr gute elektrische Leiter ist die Dichte freier Elektronen mindestens $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$

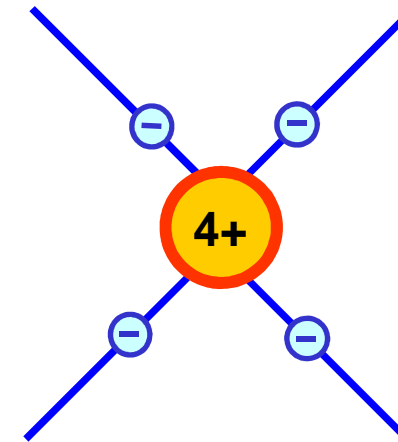
Bindung der Atome bei Halbleiter

- Die Bindung zweier Atome geschieht durch ein gemeinsames Elektronenpaar
 - Elektronenpaarbindung
- Das Elektronenpaar besteht aus je einem Elektron der beiden Atome
 - Die Elektronen eines Elektronenpaares sind an die Atome gebunden

Vereinfachte Darstellung eines Halbleiteratoms

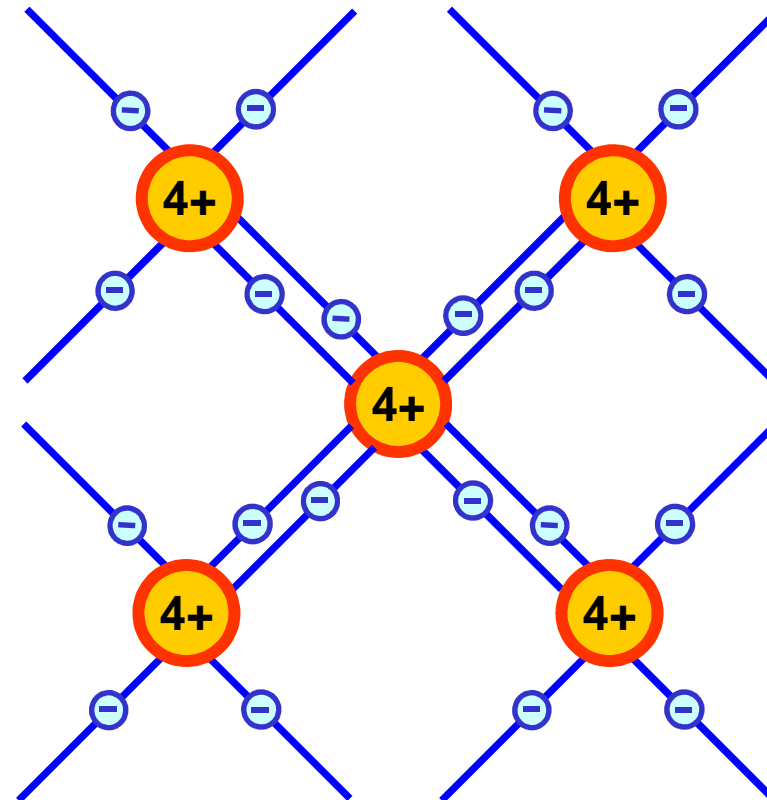
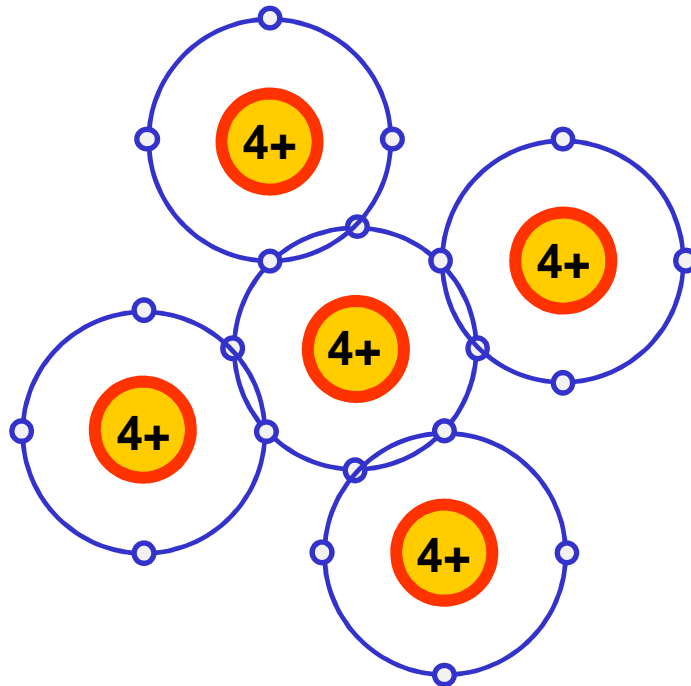


äußerste Elektronenschale



Atomrumpf
(Atomkern + innere Elektronenschalen)

Elektronenpaarbindungen



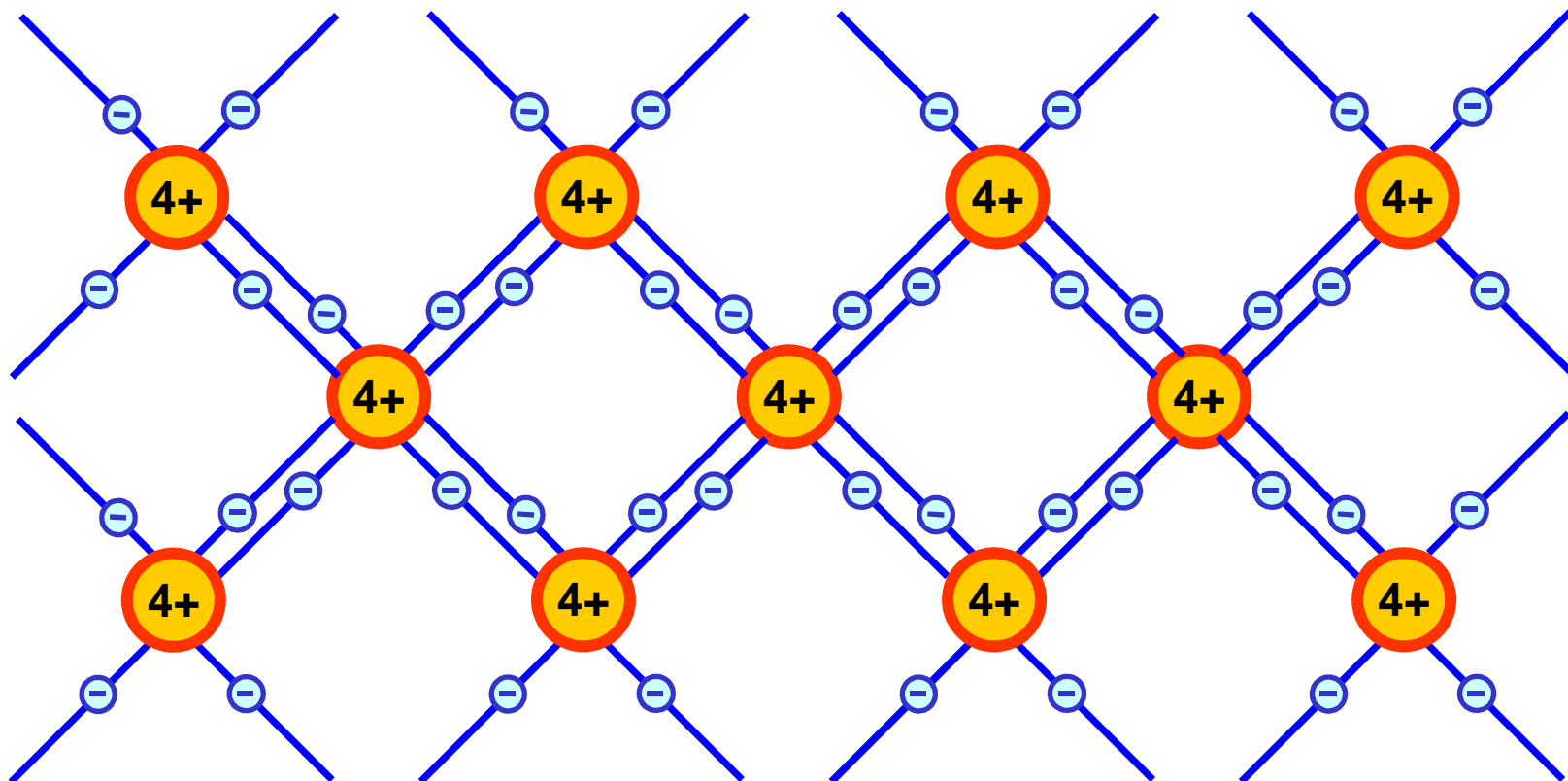
Leitungsmechanismen

- In einem Halbleiter lassen sich **2** grundsätzlich unterschiedliche Leitungsmechanismen unterscheiden
- **Eigenleitung** - Stromleitung im reinen (nicht verunreinigten) Halbleiter
- **Störstellenleitung** - Stromleitung im dotierten bzw. gezielt “verunreinigten” Halbleiter

Eigenleitung von Halbleitern

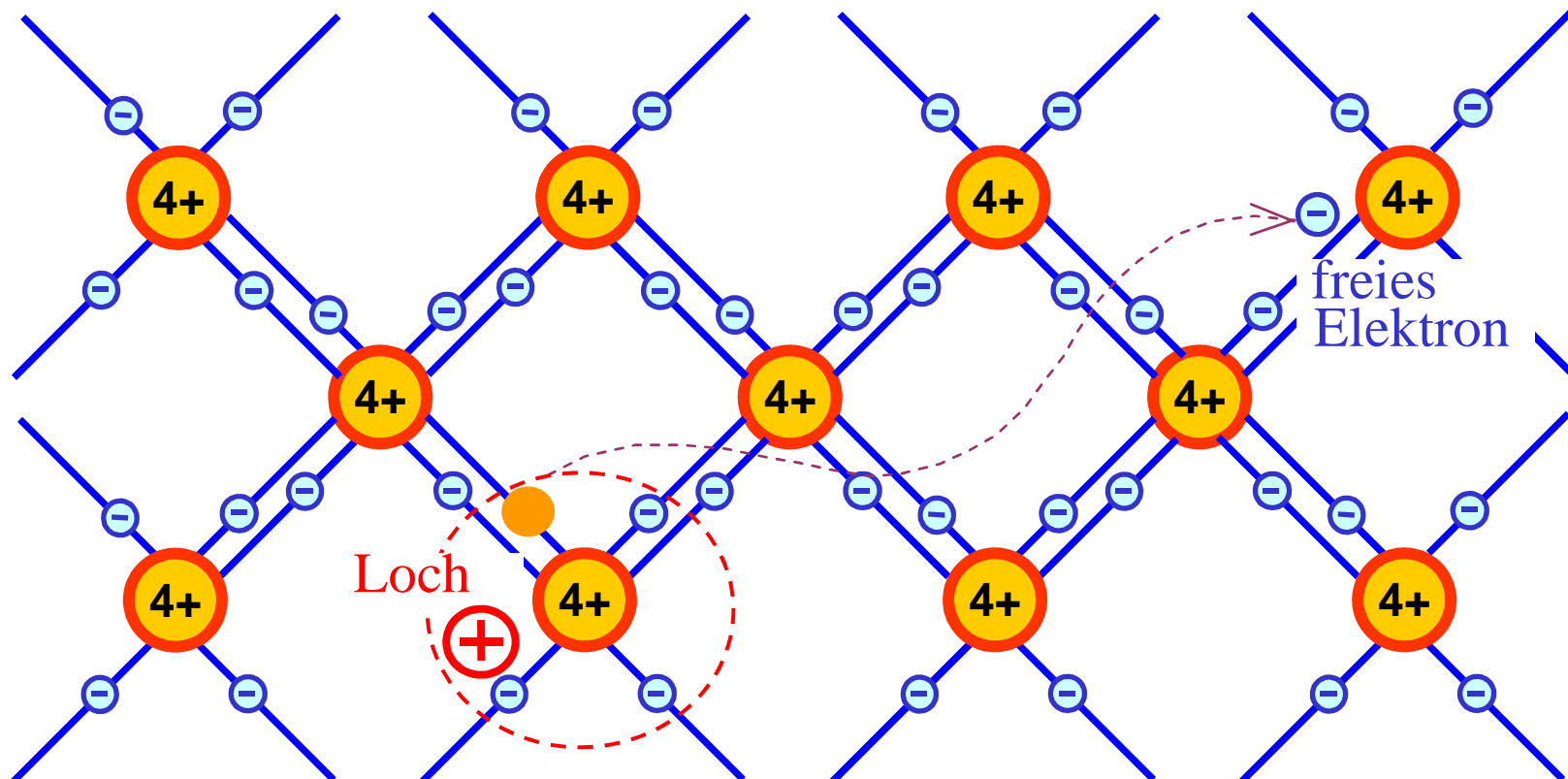
- Unter Eigenleitung versteht man die Stromleitung im reinen Halbleiter.
- Die Eigenleitung ist sehr stark temperaturabhängig:
- bei $T = 0 \text{ K}$ \Rightarrow Alle Valenzelektronen sind in Paarbindungen festgehalten; \Rightarrow Es sind keine freien Elektronen vorhanden
- bei $T > 0 \text{ K}$ \Rightarrow Energiezufuhr zu den Atomen und ihren (Valenz-)Elektronen;
 \Rightarrow Energiereichste Elektronen brechen aus den Elektronenpaarbindungen aus

Eigenleitung von Halbleitern



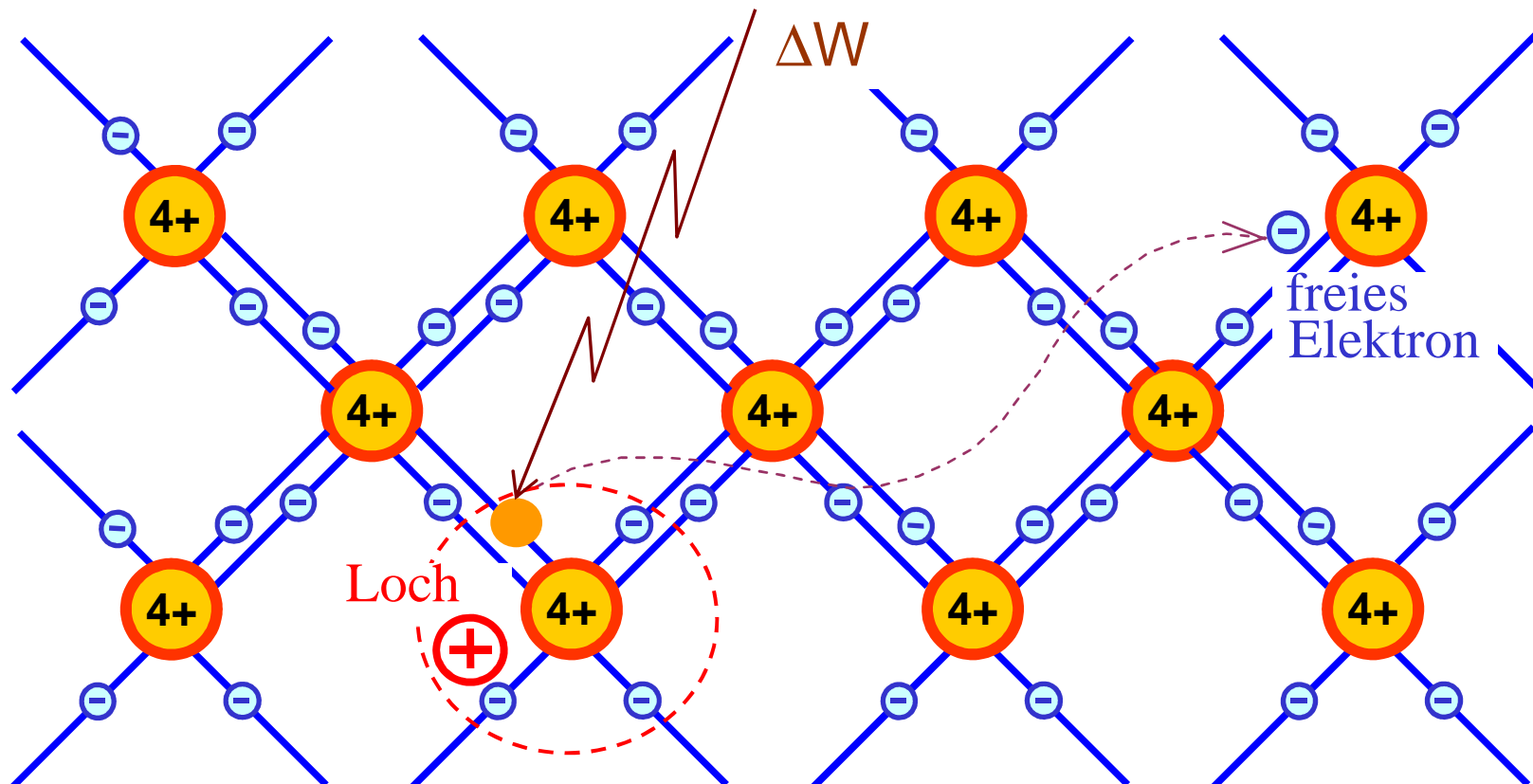
Der Halbleiter verhält sich wie ein Isolator bei $T = 0 \text{ K}$

Ladungsträger-Generation



Die Konzentration n der freien Elektronen ist gleich der Konzentration p der Löcher ($n = p$)

Ladungsträger-Generation



Die Ionisierungsenergie bei Si beträgt ca. $\Delta W \approx 1,1 \text{ eV}$

Rekombination

- Die Rekombination ist das Gegenstück zur Paarbildung
- Auslöschung eines freien Elektrons und eines Loches
- Die Konzentration der Löcher und der Elektronen ist temperaturabhängig
- $n = p = n_i = f(T)$ (im thermischen Gleichgewicht),
- n_i ist die Ladungsträgerkonzentration des reinen Halbleiters (Intrinsic-Zahl)
- Für Si $n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ bei $T = 300 \text{ K}$
- Die Intrinsic-Dichte verdoppelt sich etwa bei einer Temperaturerhöhung um $\Delta T = 10 \text{ K}$

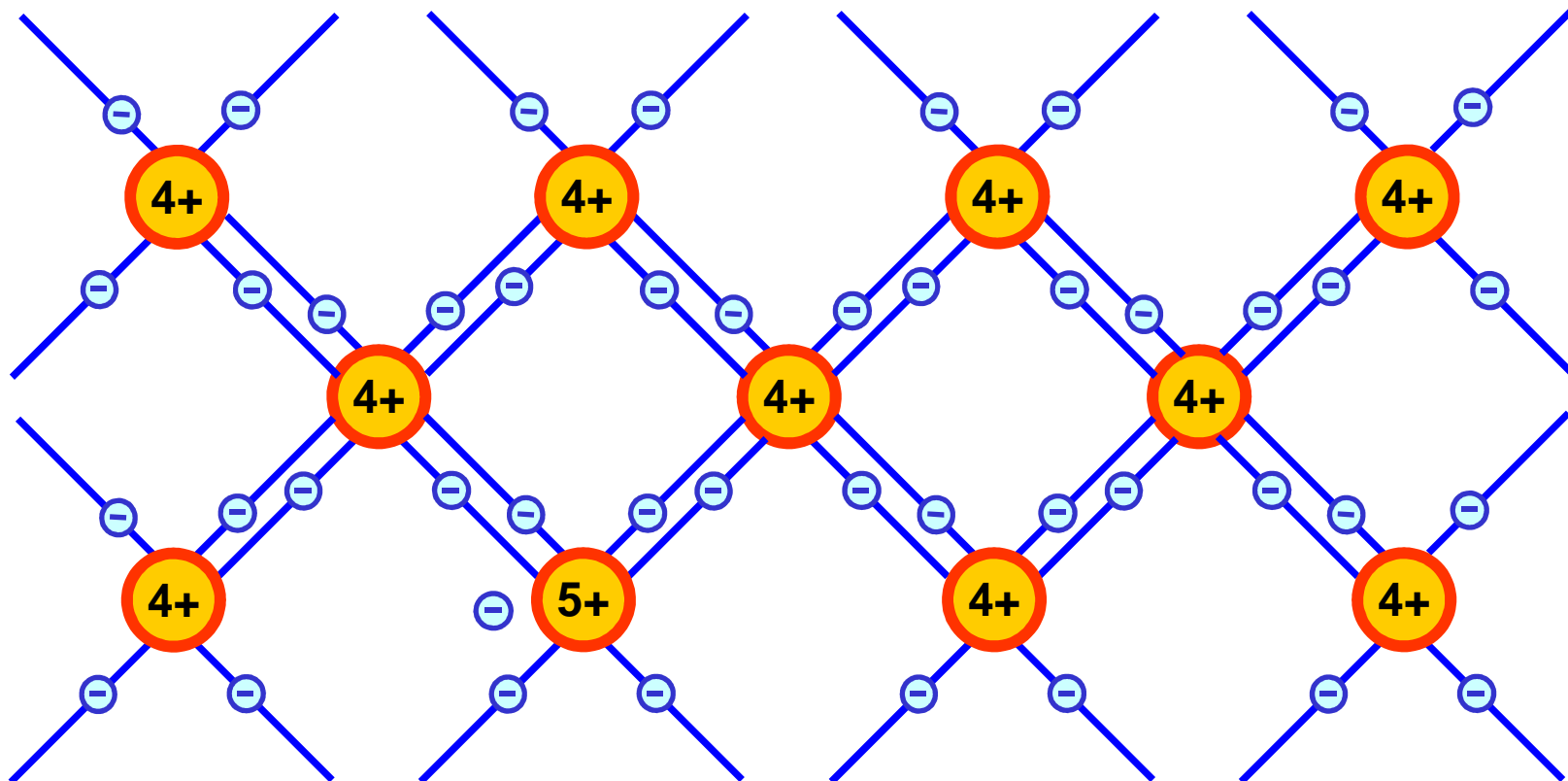
Störstellenleitung von Halbleitern

- Die Leitfähigkeit eines Halbleiters läßt sich deutlich erhöhen durch Einbau von Fremdatomen (Dotieren) in den Halbleiterkristall
- Zum Dotieren benutzt man 3- oder 5-wertige Atome, d.h. jedes Atom gewährleistet einen Ladungsträger (ein Elektron oder ein Loch)
 - 5-wertige Elemente: P, As, Sb
 - 3-wertige Elemente: B, Al, In
- Dotiert wird mit relativ geringen Mengen von Fremdatomen
 - (Fremdatome : Halbleiteratome = 1:1000 до 1:10¹⁰)

Methoden des Dotieren

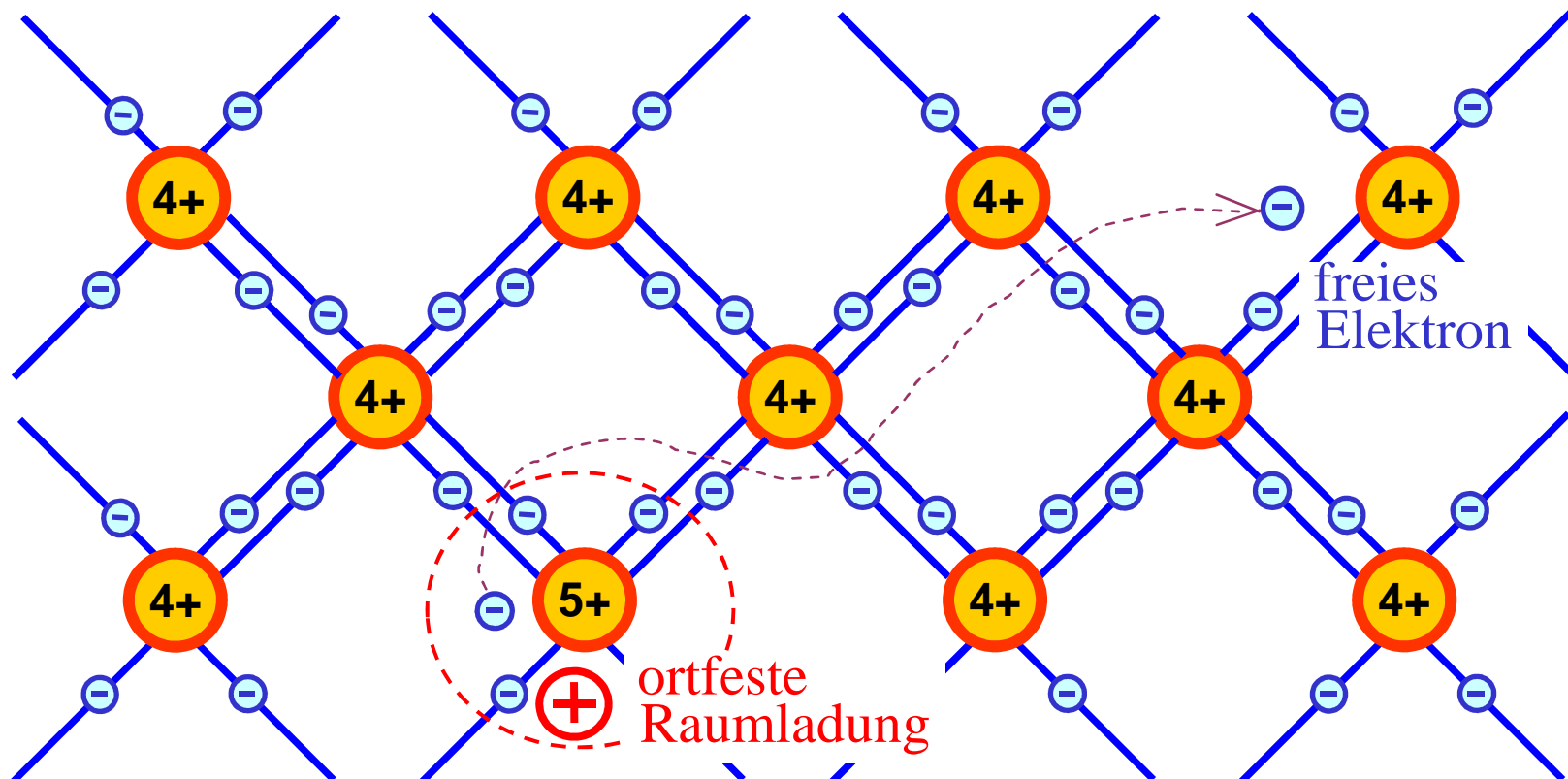
- ❑ Legierungstechnik
 - ❑ Diffusionstechnik (aus Gasphase)
 - ❑ Epitaxialtechnik (Kristallwachstum aus Gasphase)
 - ❑ Ionenimplantation
-
-

Dotieren mit 5-wertigen Fremdatomen



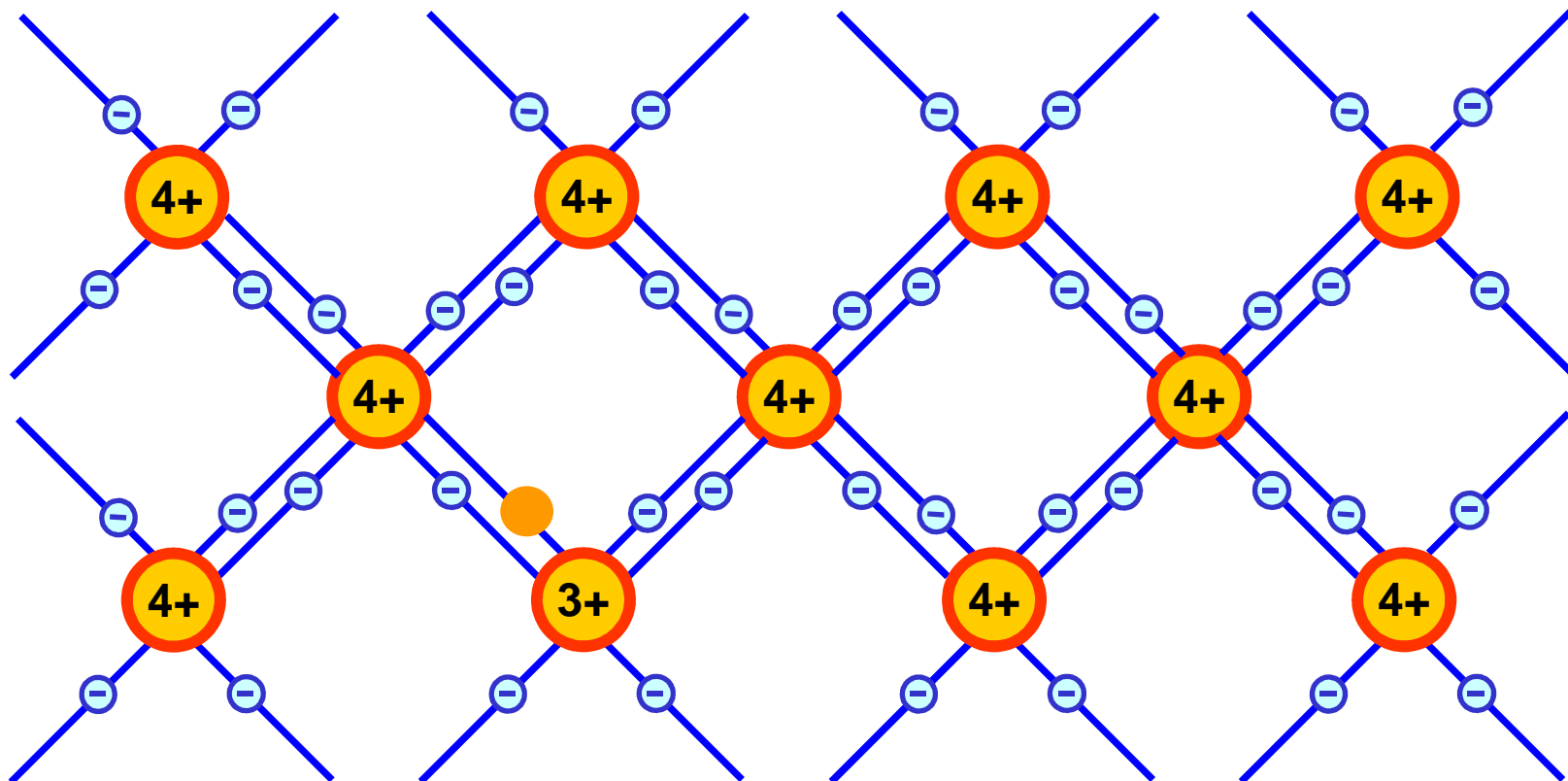
Im ersten Moment, oder bei niedriger Temperatur

Ionisierung bei Energiezufuhr



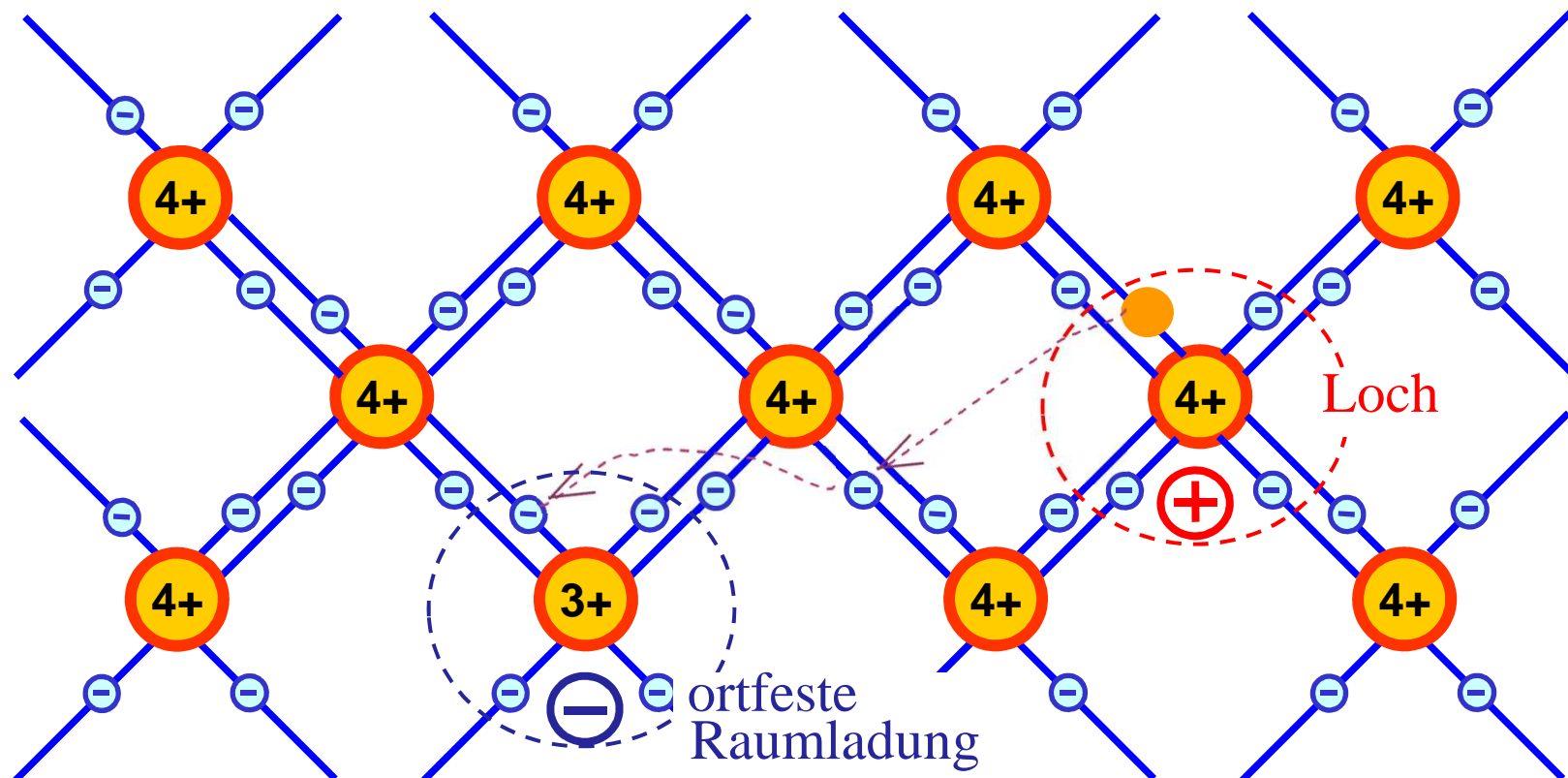
n-dotierter Halbleiter (Die Ladungsträger sind die freien Elektronen)

Dotieren mit 3-wertigen Fremdatomen



Im ersten Moment, oder bei niedriger Temperatur

Ionisierung bei Energiezufuhr



p-dotierter Halbleiter (Die Löcher, als Ladungsträger, bewegen sich wenn ein Valenzelektron den freien Platz besetzt)

Dotierungskonzentration

- Die Konzentration freier Ladungsträger wird durch die Konzentration der Fremdatome (n_A, n_D) und durch die Eigenleitung (n_i) bestimmt
- Wählt man die Dotierungskonzentration deutlich größer als der Eigenleitung, so bestimmt die Dotierung die Konzentration der freien Ladungsträger
- Die Konzentrationen von freien Elektronen und von Löchern sind im dotierten Halbleiter nicht gleich

Dotierungskonzentration

- Die in der Mehrzahl vorhandene Ladungsträgerart nennt man „Majoritätsträger“
- Die in der Minderzahl vorhandene Ladungsträgerart nennt man „Minoritätsträger“
- Die Konzentration der Majoritätsträger beeinflußt die Konzentration der Minoritätsträger
- Vergrößert man die Konzentration der Majoritätsträger erhöht sich die Rekombinationswahrscheinlichkeit, und die Konzentration der Minoritätsträger reduziert sich

Dotierungskonzentration

- Im n-leitenden Halbleiter ist die Konzentrationen freier Elektronen (n_n) größer als die Konzentration von Löchern (p_n)
 - $n_n = n_D + n_i \approx n_D = a \cdot n_i$; $p_n = n_i/a$, d.h. $n_n \cdot p_n = n_i^2$

- Im p-leitenden Halbleiter ist die Konzentrationen von Löchern (p_p) größer als die Konzentration freier Elektronen (n_p)
 - $p_p = n_A + n_i \approx n_A = a \cdot n_i$; $n_p = n_i/a$, d.h. $n_p \cdot p_p = n_i^2$

Leitfähigkeit eines Halbleiters

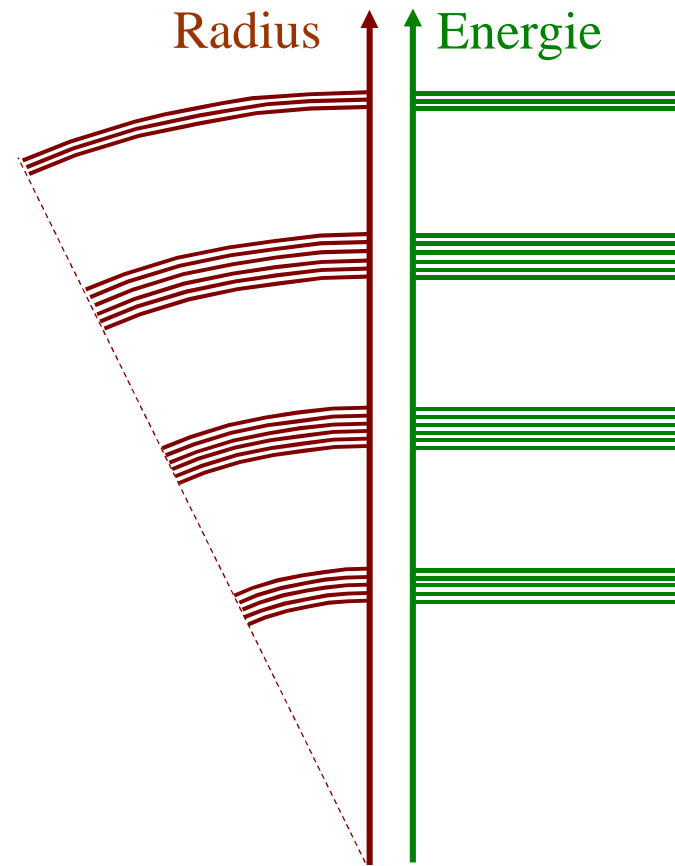
- Die spezifische Leitfähigkeit σ wird als Quotient aus der Stromdichte und der elektrischen Feldstärke $\sigma = J/E$ berechnet. Mit den Größen:
 - Elementarladung – e ; Ladung – Q ; Elektronenzahl – N ;
 - Stromdichte $J = I/A$; Stromstärke $I = dQ/dt = e \cdot dN/dt$;
 - Elektronendichte $n = dN/dV$; Volumen $dV = A \cdot dx$;
 - Geschwindigkeit $v = dx/dt$; Beweglichkeit $\mu = v/E$;wird daraus: $\sigma = e \cdot n \cdot \mu$
- Für einen Halbleiter mit Elektronen und Löchern ergibt sich :
 $\sigma = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$

Energiebetrachtung

- Die Bahnradien der Elektronen sind ein Maß für deren Energie
- Aus den Elektronenbahnen kann damit eine grafische Darstellung der Elektronenenergie abgeleitet werden

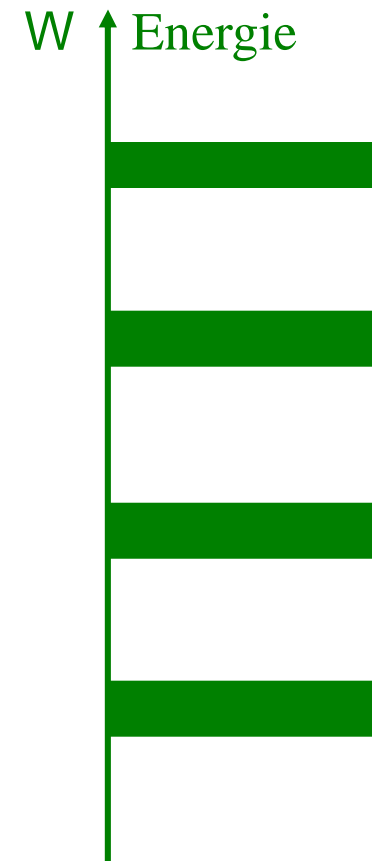
Energie-Term-Schema

- Man überträgt die kreisförmigen Elektronenbahnen eines einzelnen Atomes in gerade Linien in einem Energiediagramm
- Man erhält das sog. Energie-Term-Schema
- Jeder Elektronenbahn entspricht eine einzelne Linie im Energiediagramm (ein einzelner Energieterm)



Energiebänder-Schema

- Die Elektronen vieler Atome, wie in einem Kristall, beeinflussen sich gegenseitig
- Die einzelnen Energieterme lassen sich nicht mehr unterscheiden \Rightarrow Die zahllosen einzelnen Energieterme gehen in Energiebänder über
- Energien zwischen den Energiebändern sind nicht möglich (**verbotene Bänder**)



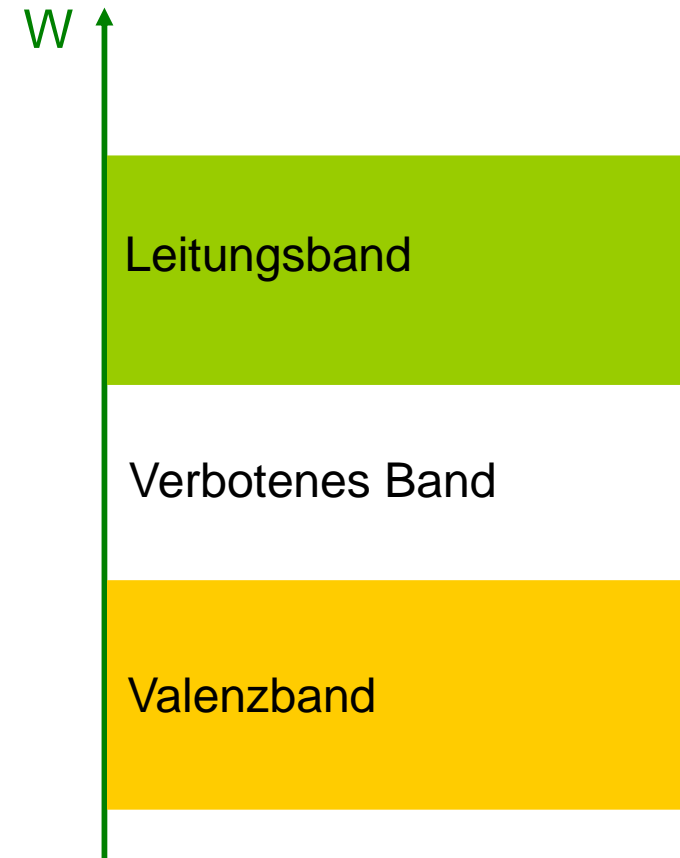
Energiebänder-Schema

- Das Energieband der äußersten Elektronenschale wird **Valenzband** genannt
- Oberhalb des Valenzbandes befindet sich **das Leitungsband**
- Dieser Energiebereich wird von den Elektronen eingenommen, die sich von ihren Atomen getrennt haben (**den freien Elektronen**)



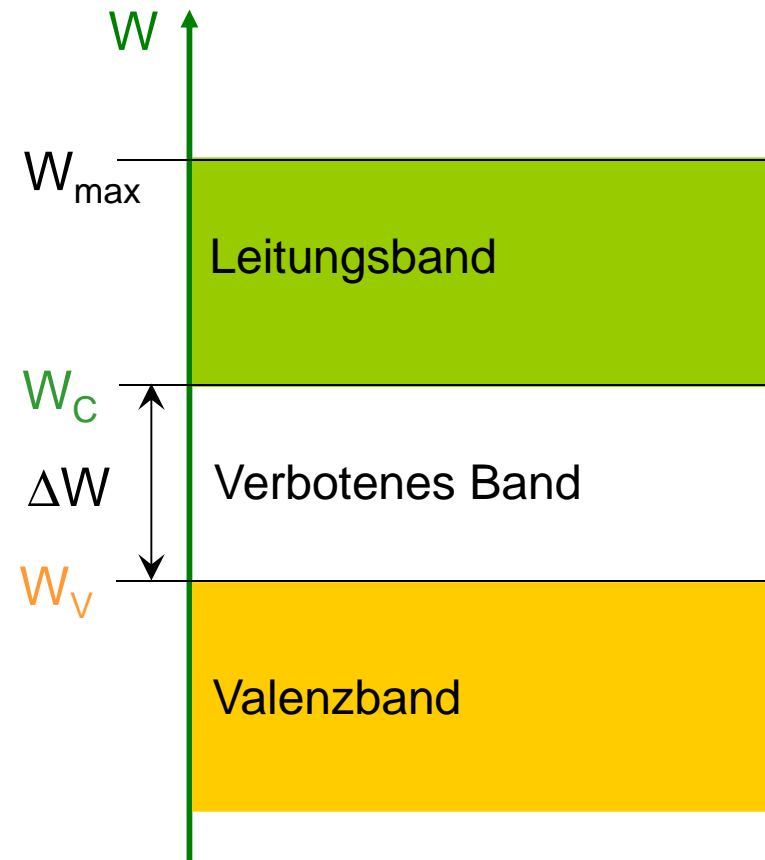
Energiebänder-Modell

- Reaktionen mit anderen Atomen und elektrische Vorgänge werden nur durch Elektronen im Valenzband und im Leitungsband bestimmt
- Üblicherweise werden daher nur diese Energiebänder und das dazwischen liegende verbotene Band dargestellt



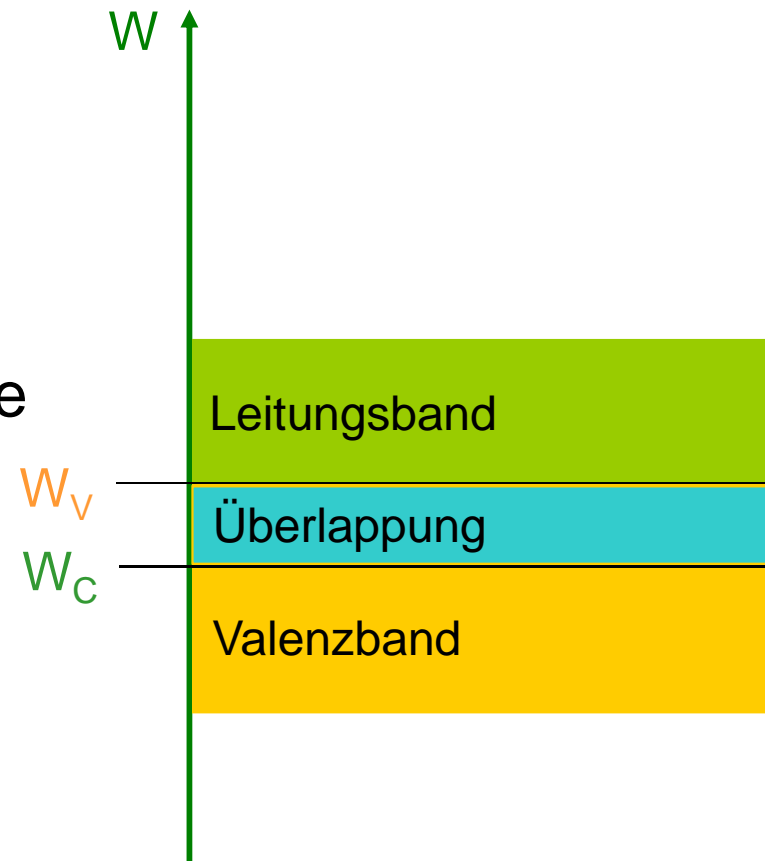
Energiebänder-Modell

- $W_C - W_V = \Delta W$ ist die Ausdehnung des verbotenen Bandes
- Elektronen, die die Energie W_{\max} überschreiten, können den Kristall verlassen



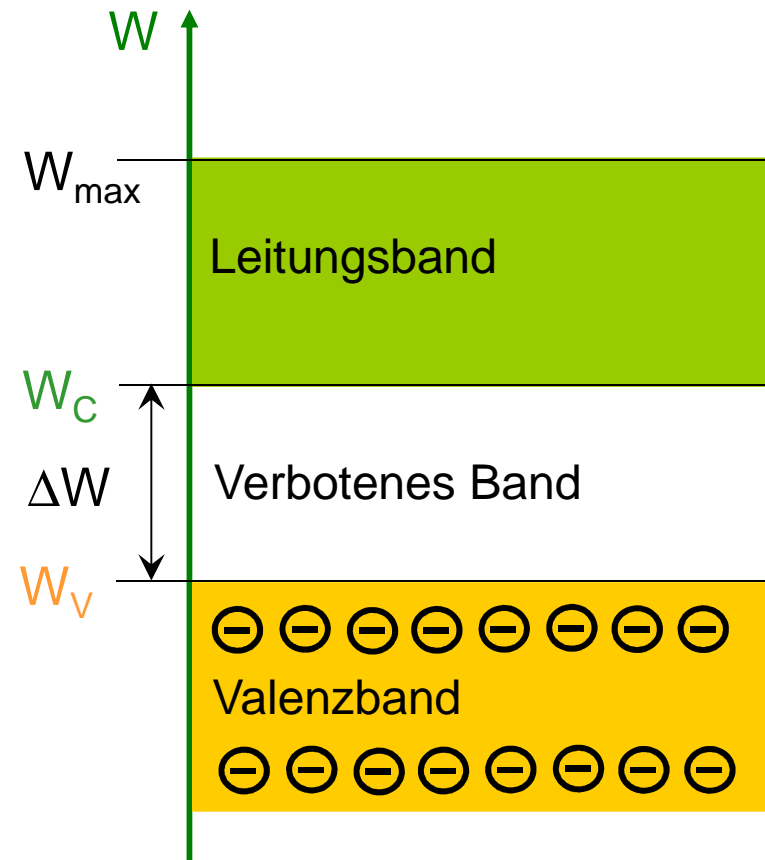
Energiebänder-Modell von Metallen

- Bei Metallen überlappen sich Valenzband und Leitungsband
- Valenzelektronen können damit ins Leitungsband wechseln, ohne Energie aufnehmen zu müssen



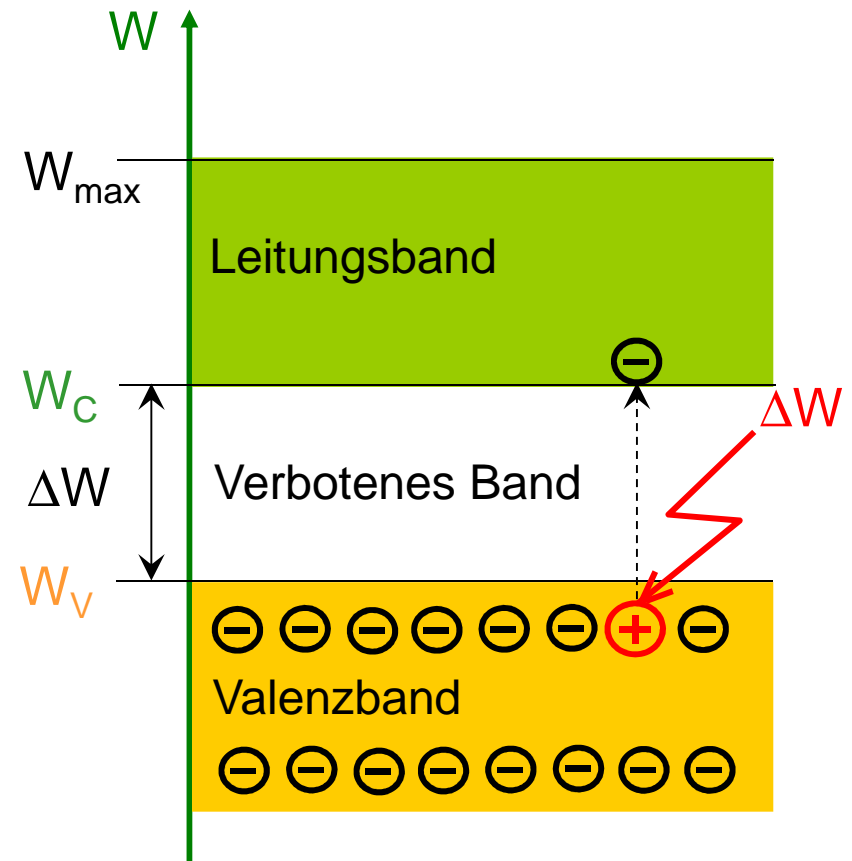
Energiebänder-Modell von reinen Halbleitern

- Bei Halbleitern existiert ein verbotenes Band zwischen Valenzband und Leitungsband
- Bei Ge beträgt der Bandabstand: $\Delta W \approx 0,7 \text{ eV}$
- Bei Si beträgt der Bandabstand: $\Delta W \approx 1,1 \text{ eV}$
- Bei $T = 0 \text{ K}$ halten sich alle Valenzelektronen im Valenzband auf
- Der Halbleiter ist ein Isolator



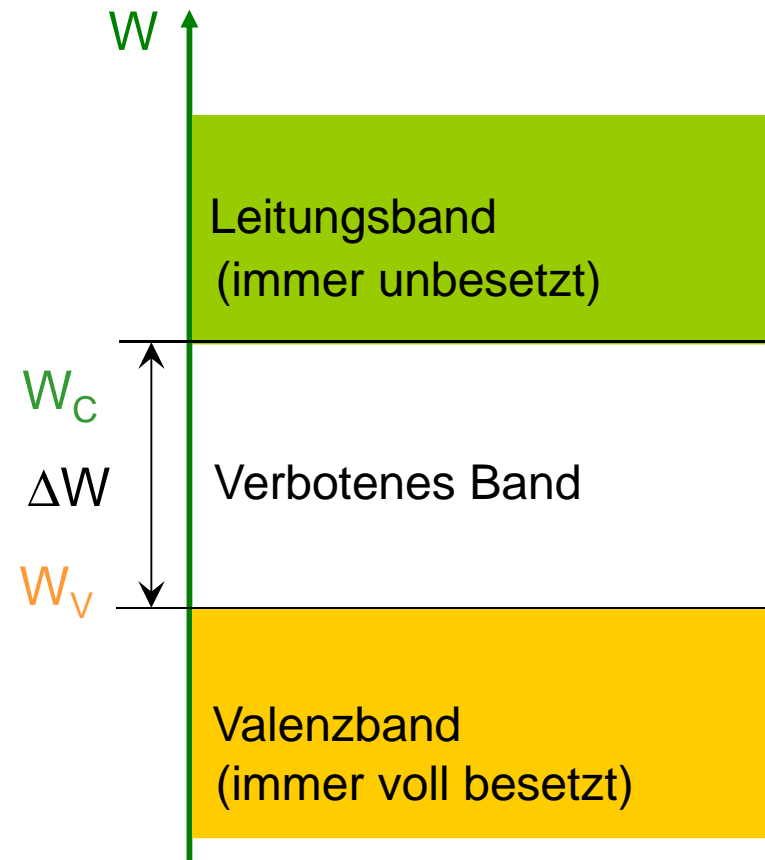
Energiebänder-Modell von reinen Halbleitern

- Bei $T > 0\text{ K}$ nehmen die Elektronen Energie auf
 - Beträgt die Energieaufnahme bei einem Elektron $\geq \Delta W$, so wird es ins Leitungsband angehoben
 - Im Valenzband bleibt ein nicht besetzter Energieterm zurück, ein Loch
- **Paarbildung**



Energiebänder-Modell von Nichtleitern

- Es ist nicht möglich Valenzelektronen eine Energie von mehr als 2,5 eV zuzuführen
- Materialien mit einem Bandabstand von $\Delta W \geq 2,5 \text{ eV}$ sind daher Nichtleiter (Isolatoren)
- Beispiel: bei Diamant $\Delta W \approx 7 \text{ eV}$



Halbleiterelektronik

- ❑ **Entwicklung der Halbleiterelektronik**
 - ❑ **Halbleiterphysik**
 - ❑ **Halbleiter Herstellung (Si)**
-
-

Halbleiter Herstellung



Halbleiter Herstellung (Si)



- Ausgangsstoff: Quarz, Sand = Siliziumoxyd (SiO_2)



- Metallisches Germanium (Ge)

Halbleiter Herstellung (Si)

- Vom Sand (Quarz), der vorwiegend SiO_2 ist
- Polykristallines Silizium (Polysilicium)
 - Solarmodule (Wirkungsgrad für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom ~ 14%, aber viel billiger)
 - Monokristallines Einkristall-Silizium
- Einkristall-Silizium
 - Bauelemente (Dioden, Transistoren...)
 - Solarmodule (Wirkungsgrad ~16%)

Halbleiter Herstellung (Si)



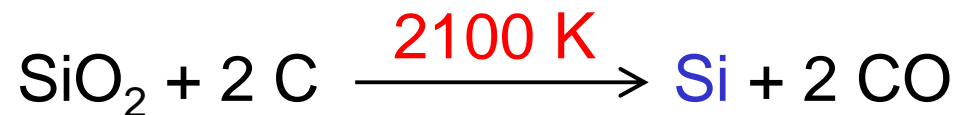
Polysiliciumbrocken, Si-Einkristal, polierte Scheiben,
Scheiben in einer Verpackungshorde, Bauelemente

Halbleiter Herstellung (Si)

- Hochkomplizierter Fertigungsvorgang
- Zusammenarbeit von
 - Physik
 - Chemie
 - Elektrotechnik
 - Feinmechanik
- Nur wenige Hersteller beherrschen das Herstellungsverfahren

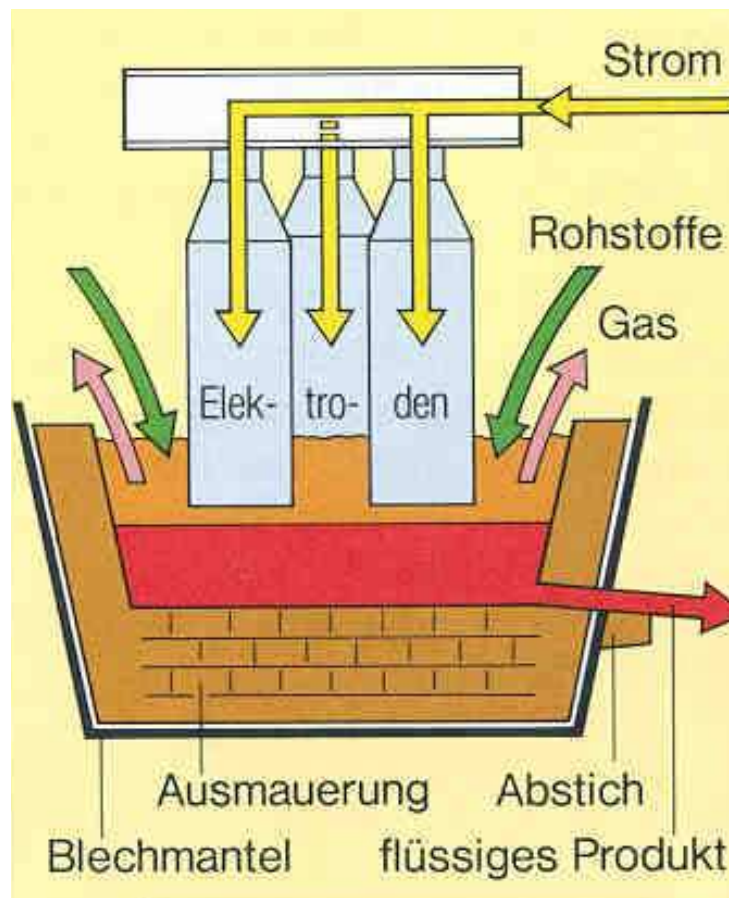
Polykristallines Si (1. Stufe)

- Quarzsand wird bei 2100 °C geschmolzen
- Nach Reduktion mit Kohlenstoff
- Rohsilizium (Si)
- Durch elektrothermische Reduktion
- im Lichtbogen, zwischen den Elektroden und die Schmelze



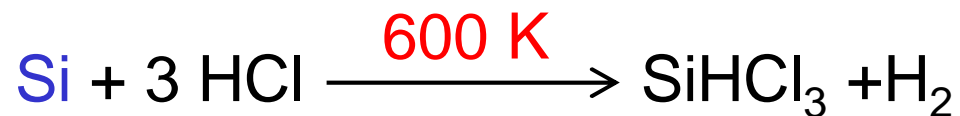
- Die Reinheit des Si ist ca. 98 %
(Fremdbestandteile Fe, Al, Ca, Ti, C)
- Für die Bedürfnisse der Mikroelektronik ist es aber viel zu verschmutzt

Reduktion von SiO_2

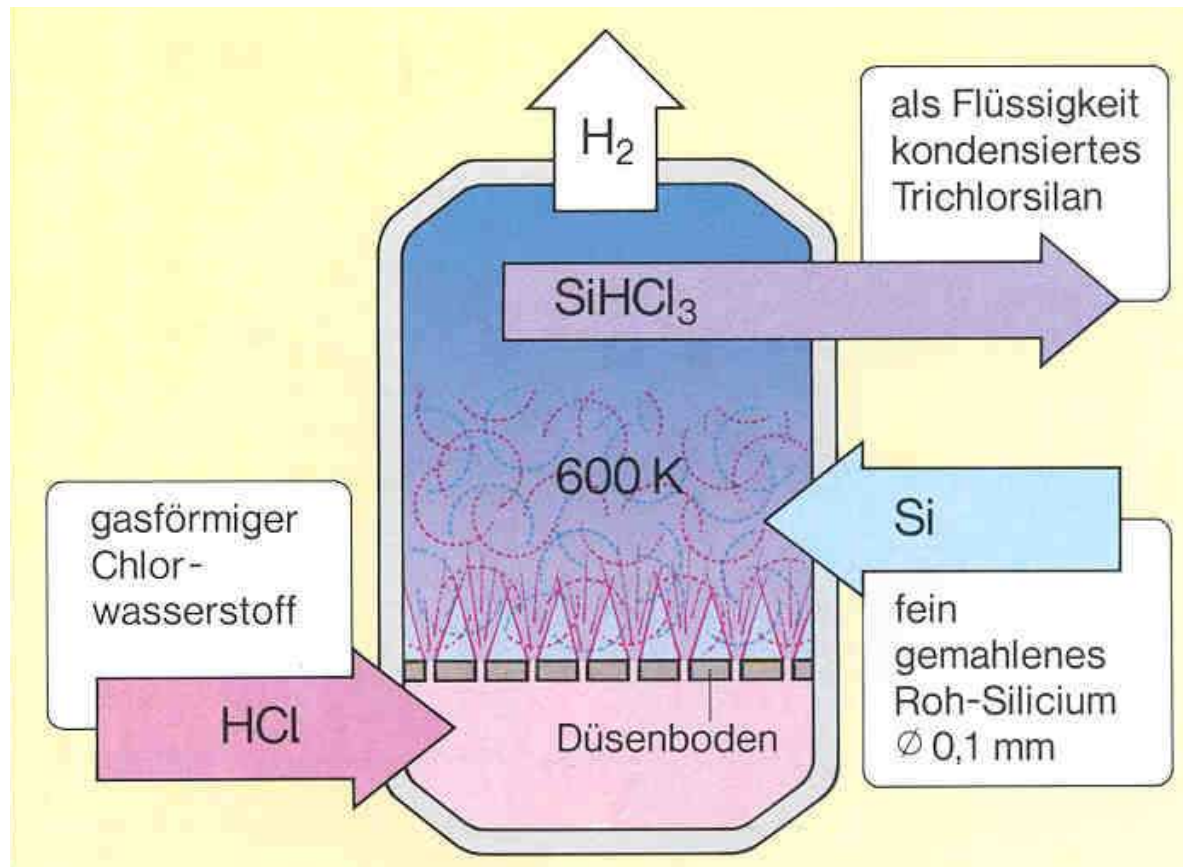


Polykristallines Si (2. Stufe)

- Rohsilizium wird fein gemahlen \Rightarrow ca. \varnothing 0,1 mm
- Die Reinigung geschieht durch Chlorwasserstoff
 - Trichlorsilan
- Die Flüssigkeit wird destilliert
 - Abtrennung von begleitenden anderen Silanverbindungen
 - reines Trichlorsilan (flüssig)



Herrstellung von Trichlorsilan



Bildung von Trichlorsilan (Wirbelschichtreaktor)

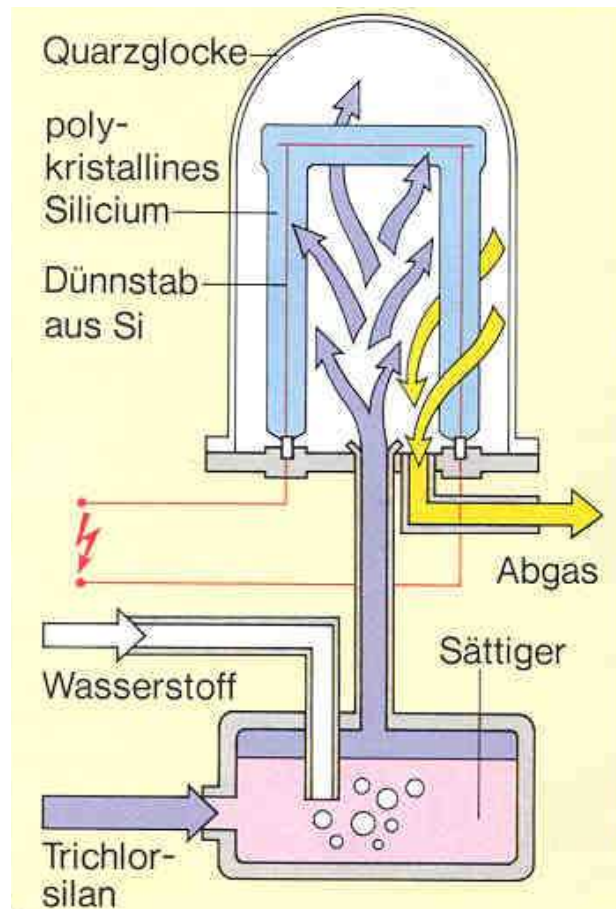
Polykristallines Si (3. Stufe)

- Trichlorsilan (gasförmig) wird mit Wasserstoff behandelt
 - Polykristallines Reinst-Si (Reinheit 99, 9999999 %)
 - Abscheidung des Silicium erfolgt an dünnen, sehr reinen Si-Stäben
 - Anwachsen zu Stäben von \varnothing 20 cm und 2 m Länge

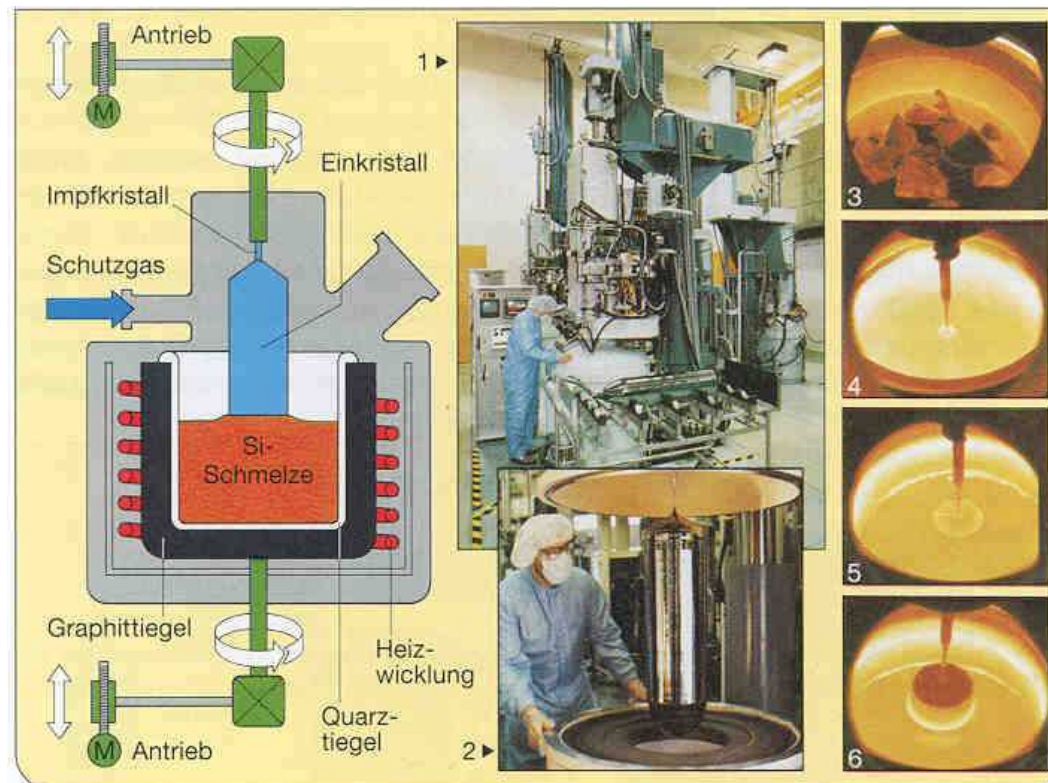
- Silicium wird zerkleinert und fein gemahlen (Czochralski)



Silicium-Abscheidungsreaktor

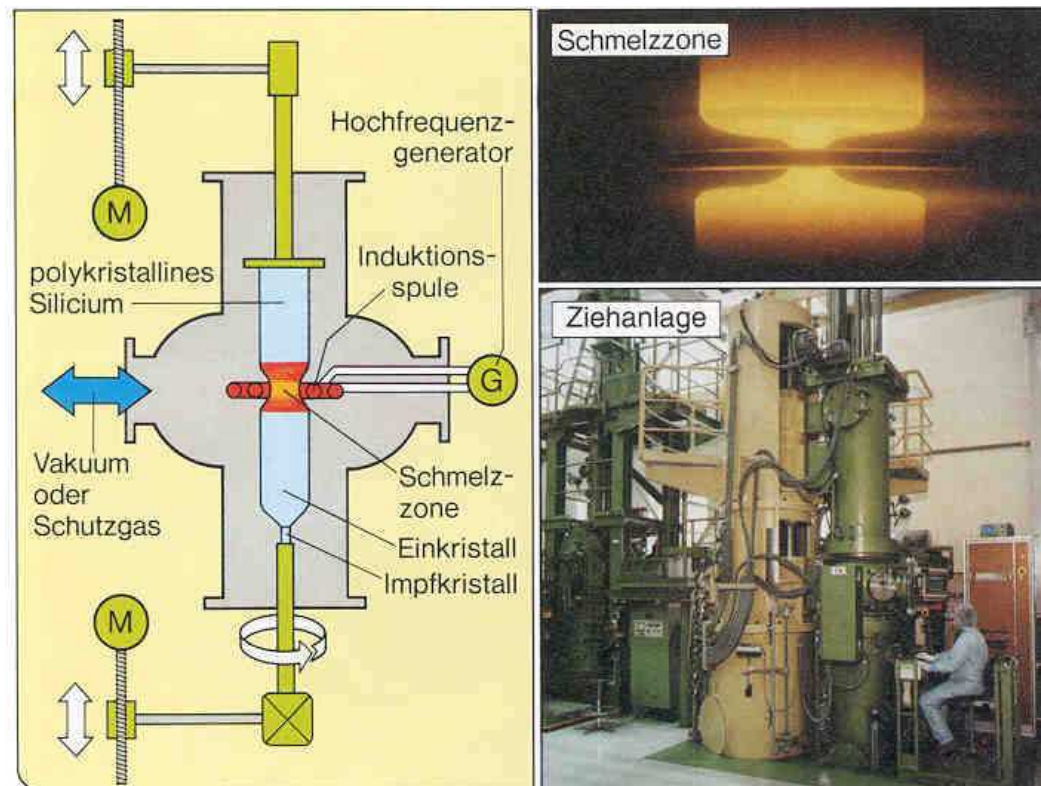


Einkristall-Herstellung (Si)



Czochralski-Verfahren 90 %

Einkristall-Herstellung (Si)



Zonenziehen 10 %

Einkristall-Herstellung (Si)

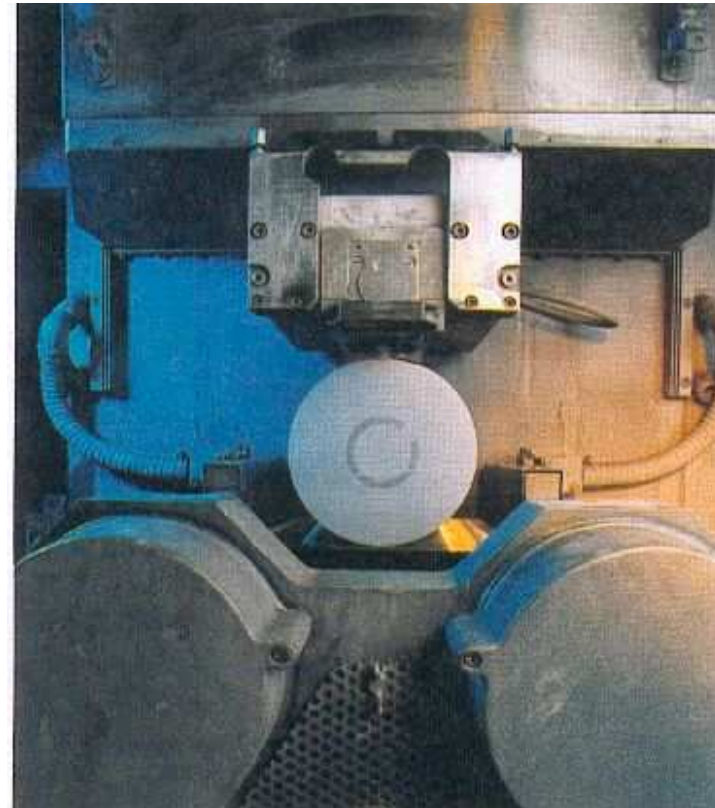


Siliziumrohling: \varnothing 20 (30) cm und Länge bis 2 m

Bearbeitung des Rohlings



Siliziumrohling wird auf Durchmesser geschliffen



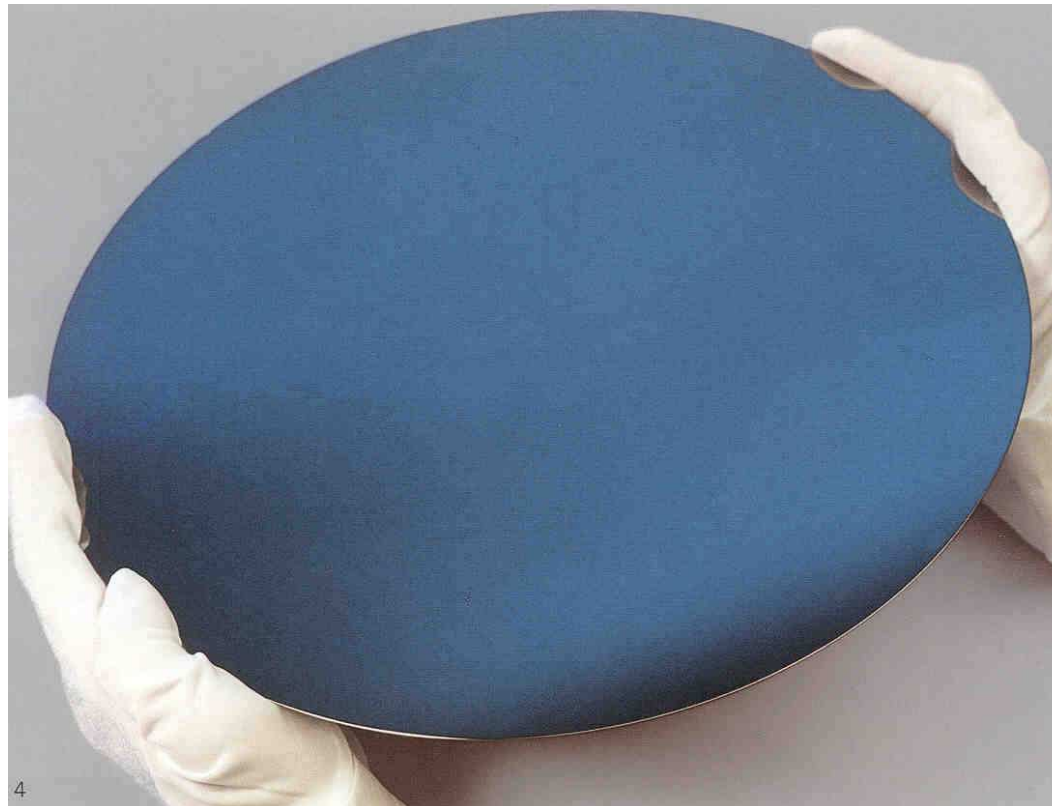
... und mit Drahtsäge in Scheiben von ca. 0,5 mm Dicke geschnitten

Bearbeitung der Scheiben (Wafer)



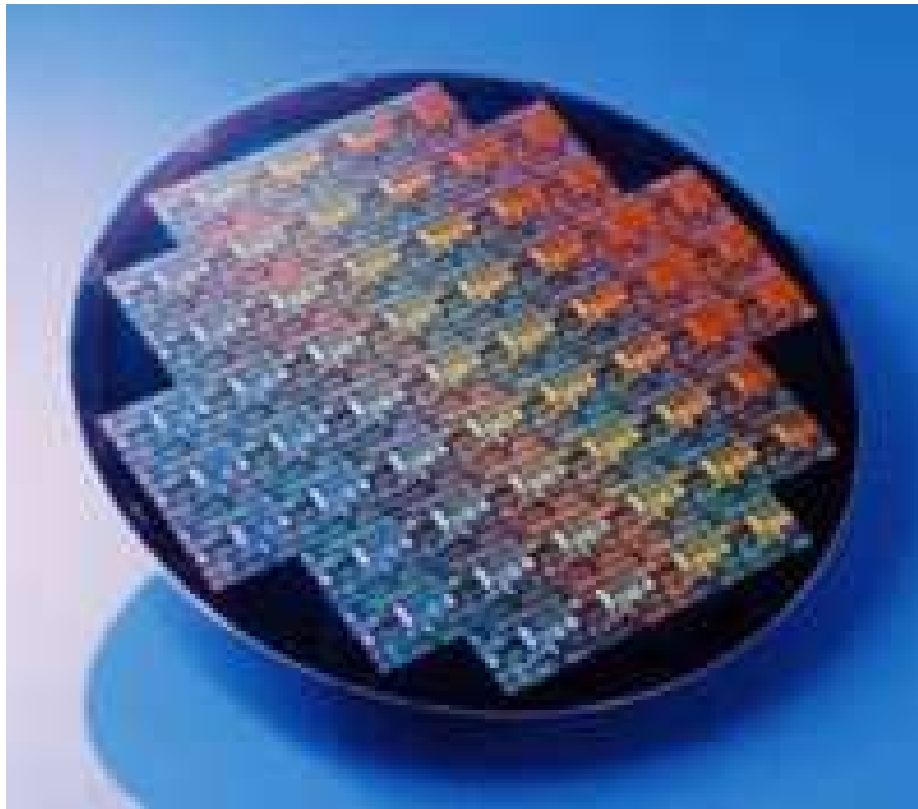
polieren, läppen, feinschleifen und ätzen bis an der Oberfläche keine Kristallversetzungen mehr vorhanden sind

Si-Wafer (300 mm)



Siltronic, 2001 г.

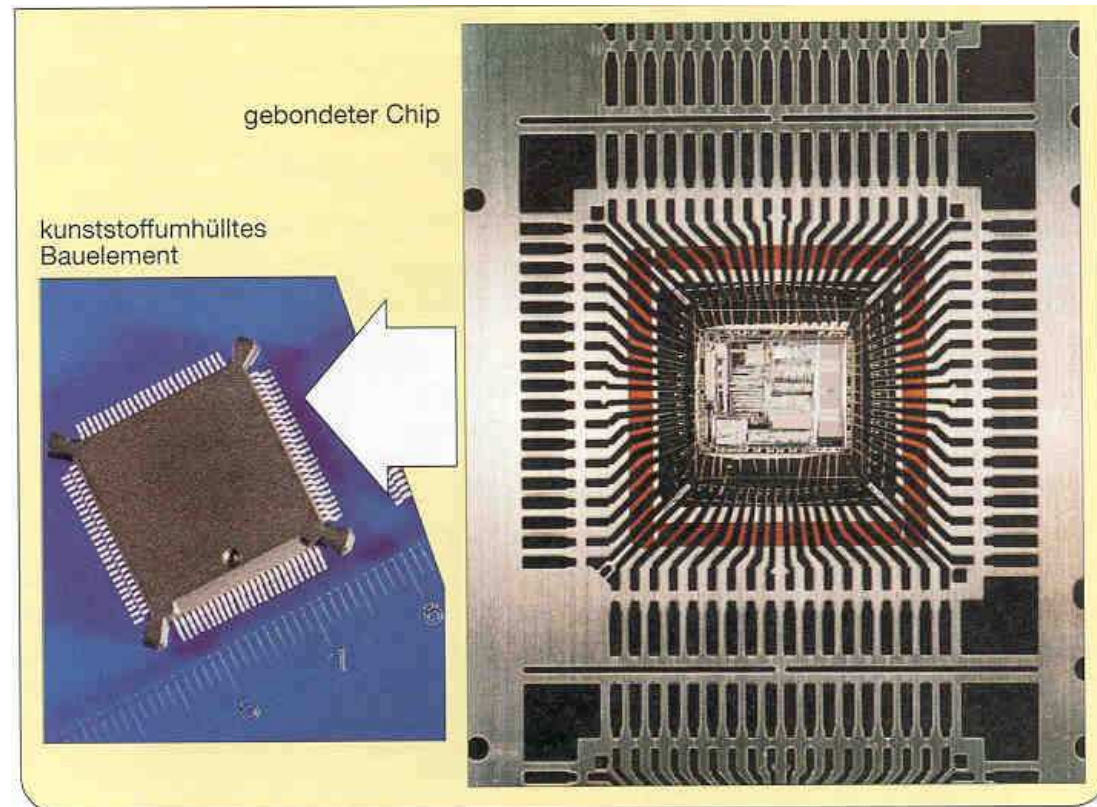
Wafer mit integrierten Schaltungen



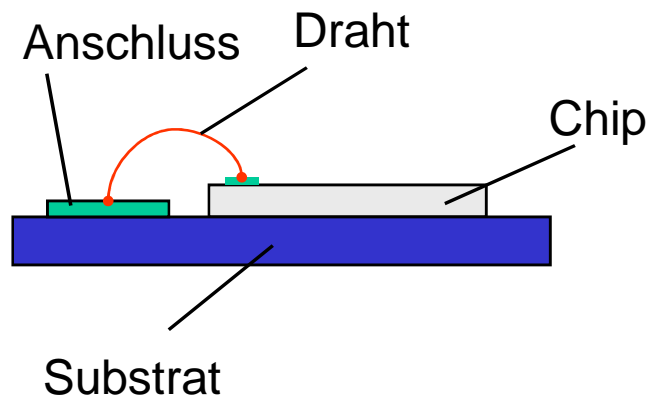
- Wafer werden zersägt
- Chips werden in Gehäusen montiert

Verdrahtung / Umhüllung von Chips

1. Zentrieren der IC's (Chips)
2. Bonden (Bonding)
3. Kunststoffumhüllung

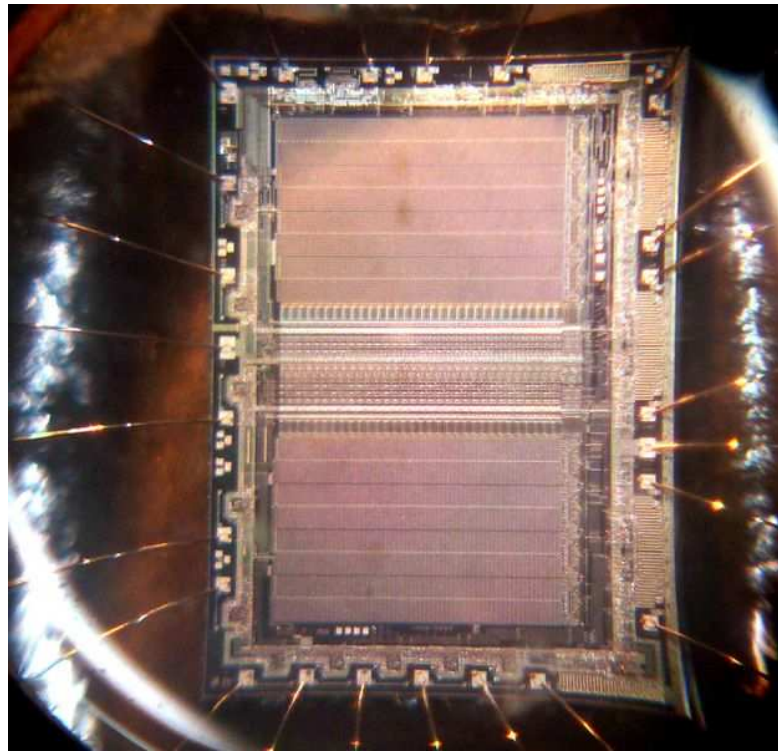


Bonden



- Beim Bonden werden die Anschlüsse mit der Kontaktflächen der IC's durch haarfeinen Drähten verbunden
- Drahtbonden (Wire bonding)

Bonden



Mit haarfeinen Golddrähten (ca. $30\ \mu\text{m}$) gebondeter integrierter Schaltkreis (EPROM in Keramikgehäuse mit Glasfenster)