

Leibniz  
Universität  
Hannover

# Halbleitertechnologie - ein Überblick -

H. Jörg Osten

Institut für Materialien und Bauelemente  
der Elektronik  
- MBE -

Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32, 30167 Hannover

---

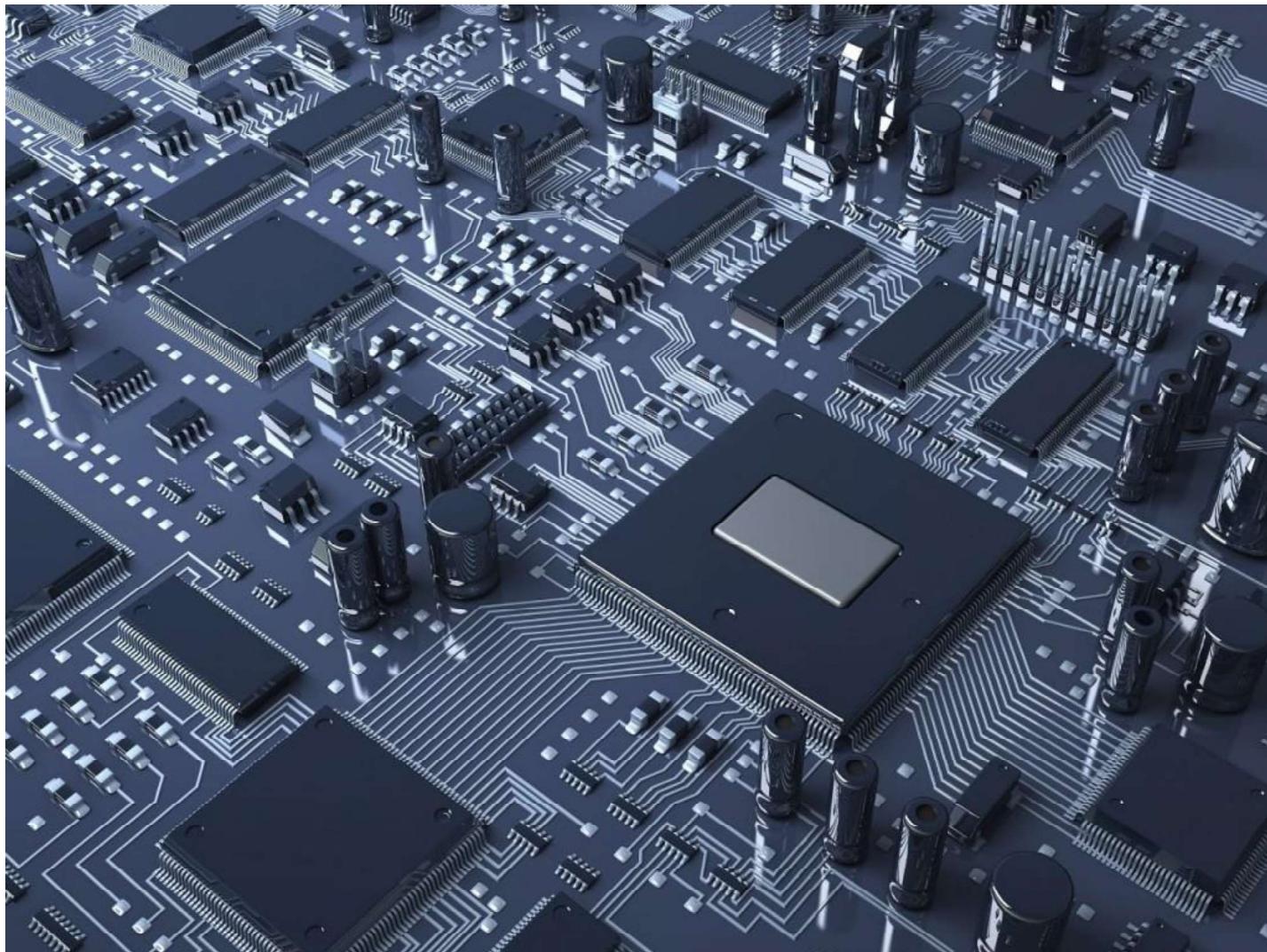
nur für den LUH-internen Gebrauch

## Ein System: ASUS Maximus IX Hero

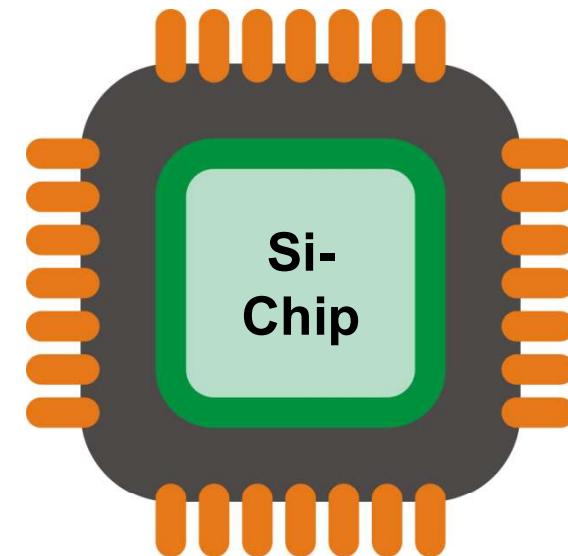


ATX-Mainboard mit Intels Z270 Chipsatz für Intels Core-Prozessoren der 6000er- und 7000er-Serie.

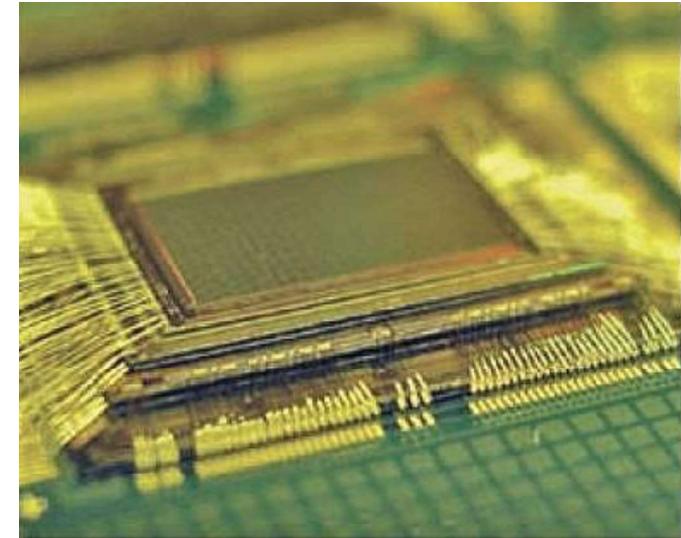
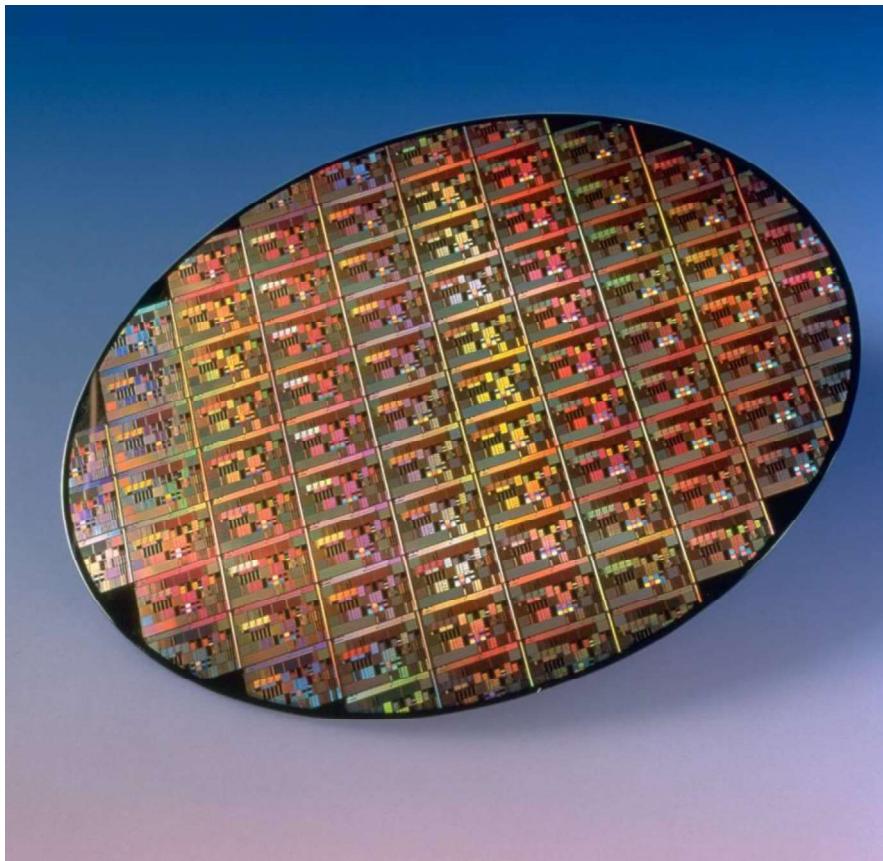
## Das Produkt: Schaltkreise (IC, Chip)



## Das Produkt: Schaltkreise (IC, Chip)

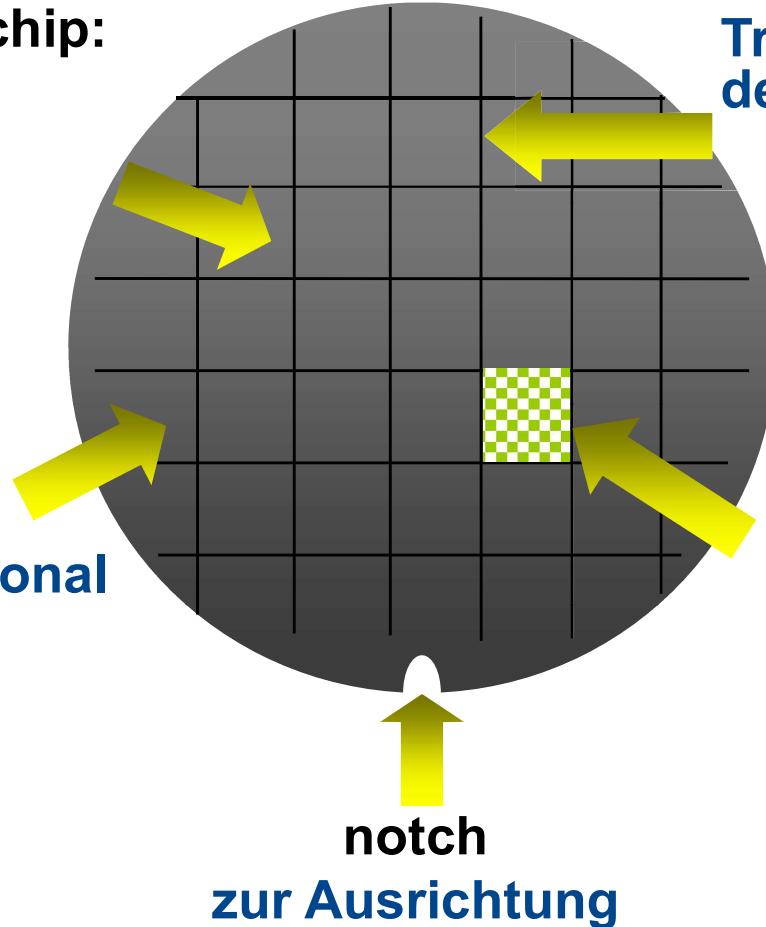


**Wafer**



**Chip (IC)**

**Chip, die, device, IC  
circuit, microchip:**  
**identisch**

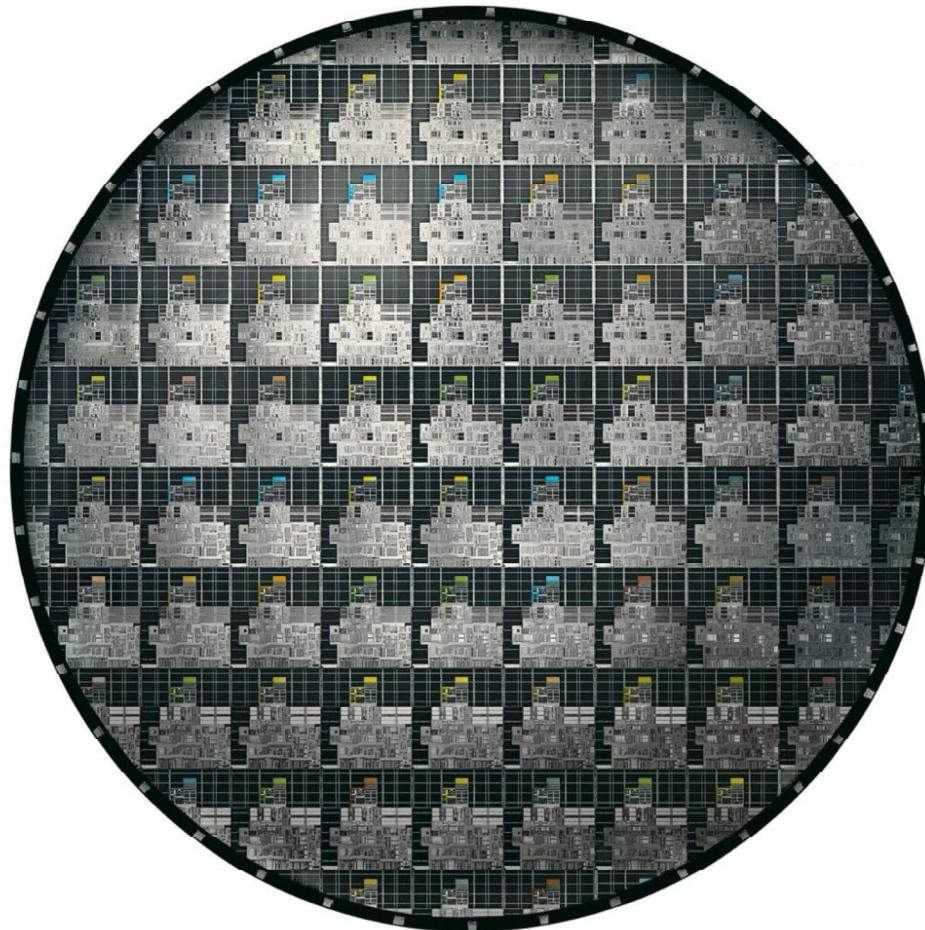


**Edge die:  
Nicht funktional**

**Scribe lines, saw lines,  
streets, and avenues:**  
**Trennlinien zwischen  
den Chips**

**Engineering die,  
test die**  
**Enthält spezielle  
Teststrukturen**

## Ein fertig prozessierter Wafer 2001



**Itanium-Wafer (200 mm)**

**Chipgröße:  $27,72 \times 21,5 \text{ mm}^2$**   
**=  $596 \text{ mm}^2$**

**180 nm Technologie**  
**mit 25 400 000 Transistoren**

## Ein fertig prozessierter Wafer heute

---



**Durchmesser: 450 mm**

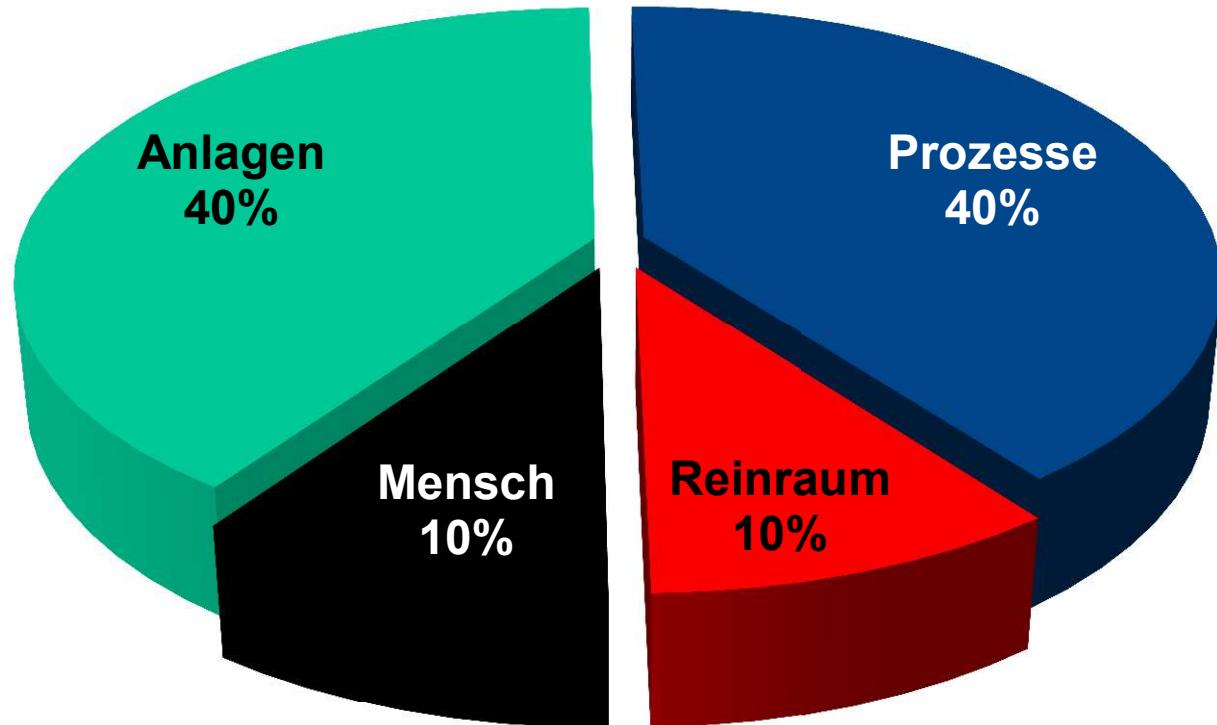
---

# Warum brauchen wir einen Reinraum?

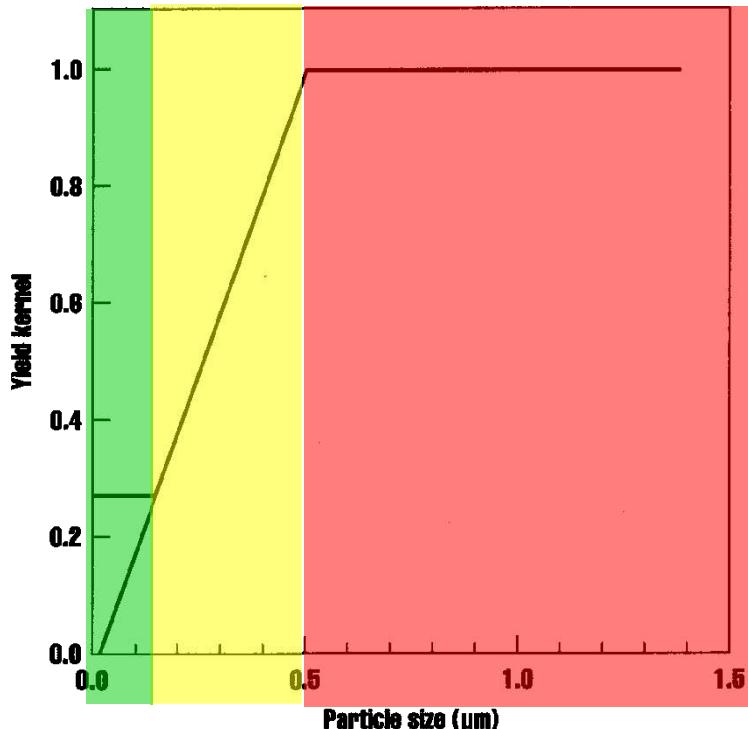


## Verunreinigungsursachen

---



Quelle: VLSI Research

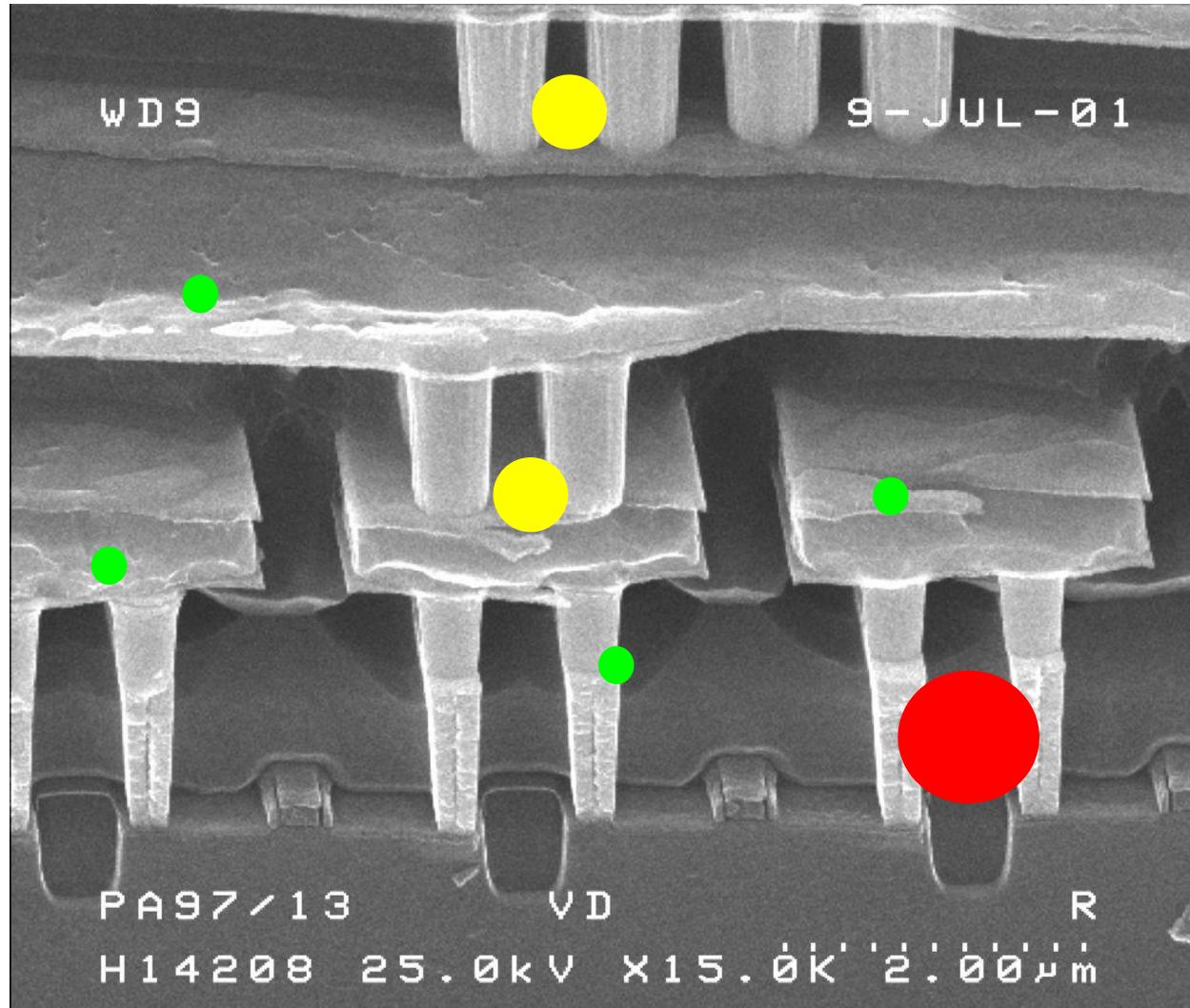


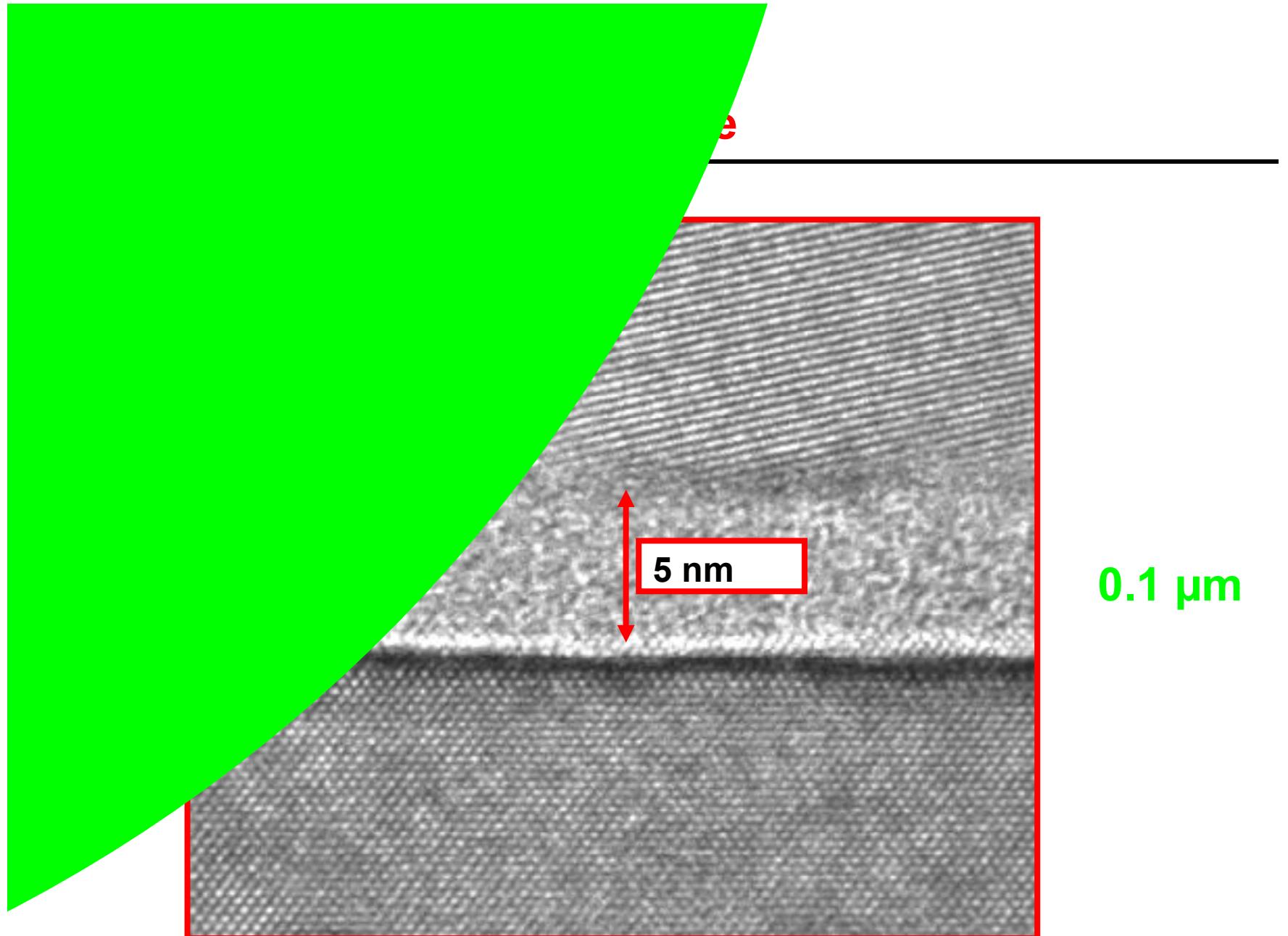
**Große Partikel:**  
Ausfallwahrscheinlichkeit  
ist Eins

**Partikel im**  
**Technologiemaß**  
→ Lineare Abhängigkeit

**Kleine Partikel:**  
Stören nur an bestimmten  
Stellen (z.B. Gateoxid)

Details dazu in der TIB-Vorlesung „Manufacturing“

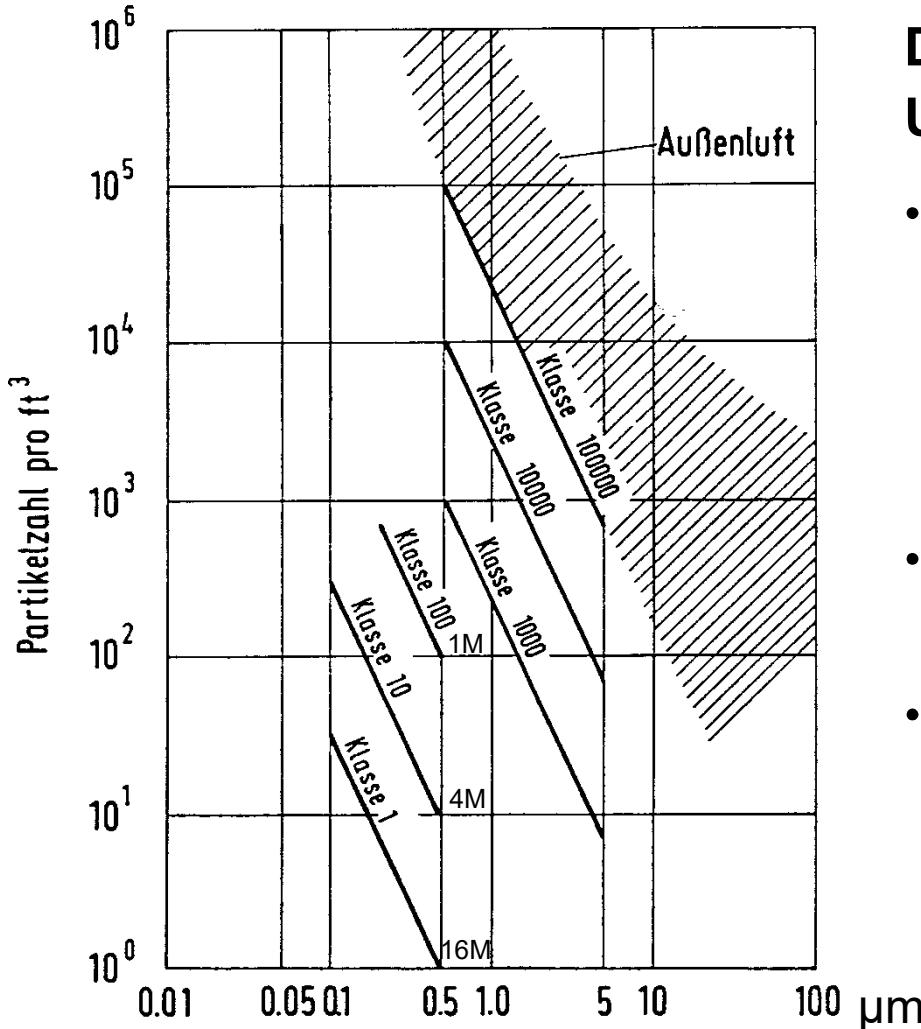




**Maximale Anzahl von Partikeln pro Kubikfuss Luft,  
die größer oder gleich einer bestimmten Größe sind  
(Federal Standard 209D)**

	0.1 µm	0.2 µm	0.3 µm	0.5 µm	5.0 µm
Klasse 1	35	7.5	3	1	NA
Klasse 10	350	75	30	10	NA
Klasse 100	NA	750	300	100	NA
Klasse 1000	NA	NA	NA	1000	7

# Klassifizierung von Reinräumen



Die Reinraumklassen sind nach US Federal Standard 209 d definiert.

- Die Bezugsgröße ist die Anzahl der Partikel pro Kubikfuß ( $1 \text{ Ft}^3 \sim 30\text{l}$ ) Luft im Reinraum, wobei z.Z. noch die Partikel größer als  $0,5 \mu\text{m}$  gezählt werden.
- Die Dichte der Partikel nimmt exponentiell mit der Größe ab.
- Daher wird man sich in Zukunft bei den Reinraumklassen auf die Partikel der Größe  $0,1 \mu\text{m}$  beziehen.

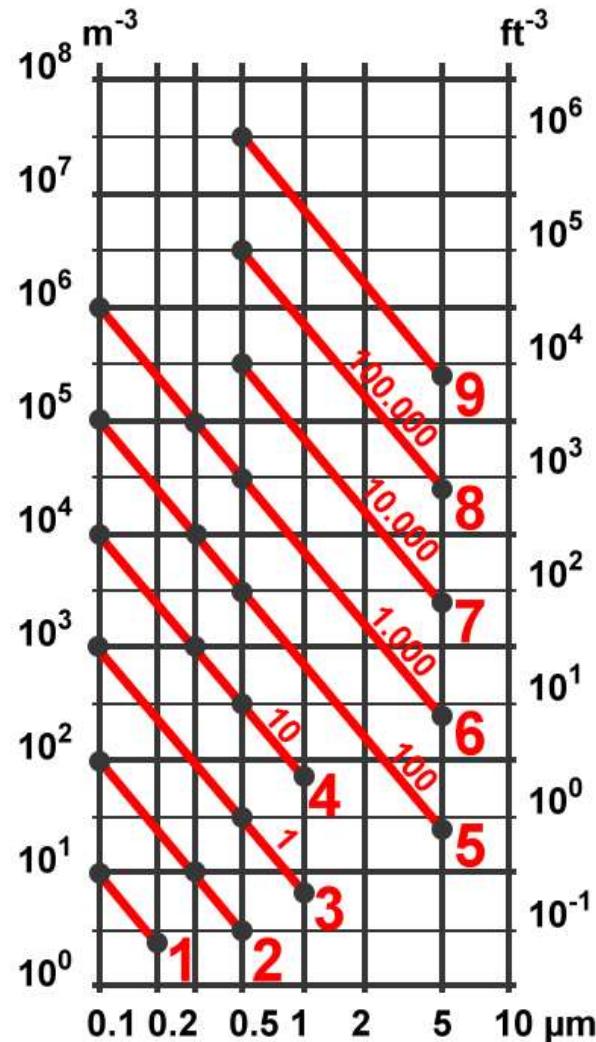
## Reinraumklassen nach ISO 14644-1, Partikel je m<sup>3</sup>

---

Klasse	0.1µm	0.2µm	0.3µm	0.5µm	1.0µm	5.0µm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1.000	237	102	35	8	
ISO 4	10.000	2.370	1.020	352	83	
ISO 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	29
ISO 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
ISO 7				352.000	83.200	2.930
ISO 8				3.520.000	832.000	29.300
ISO 9				35.000.000	8.320.000	293.000

gilt seit 2001

## Neue Reinraumklassifizierung



Abhängigkeit der zulässigen Teilchenkonzentration von der Teilchengröße für verschiedene Reinraumklassen.  
 große Ziffern: ISO 14644-1  
 kleine Ziffern: STD209

# Globalfoundries in Dresden

---





# IHP GmbH Frankfurt(Oder)

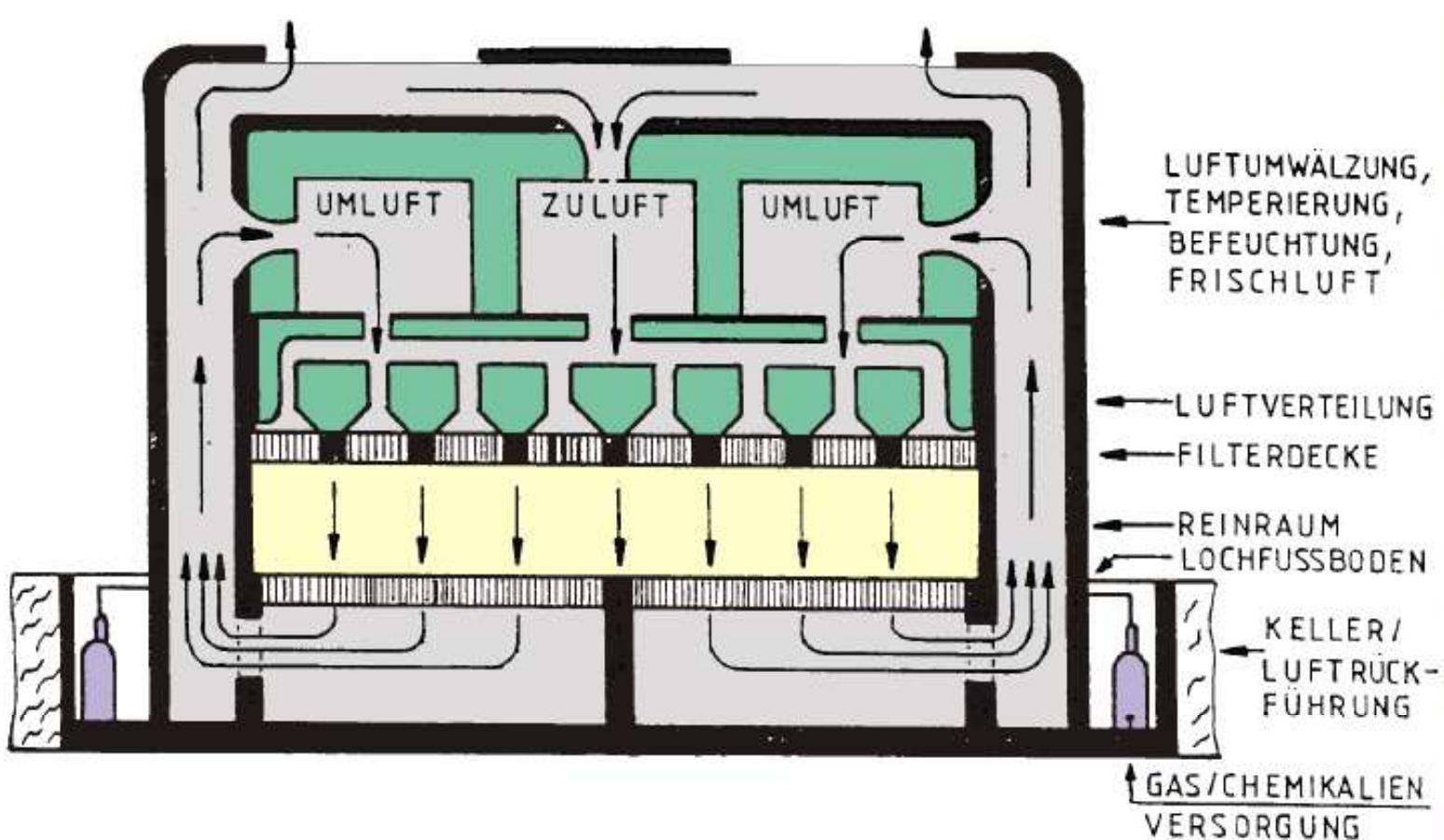


## Forschung im Class 1 Reinraum



**Beispiel: IHP in Frankfurt(Oder)**  
**130 nm BiCMOS Technologie**  
**200 mm Si-Wafer**  
**1000 m<sup>2</sup> Reinraumfläche (RK 1)**  
**nur 9 Operatoren pro Schicht**

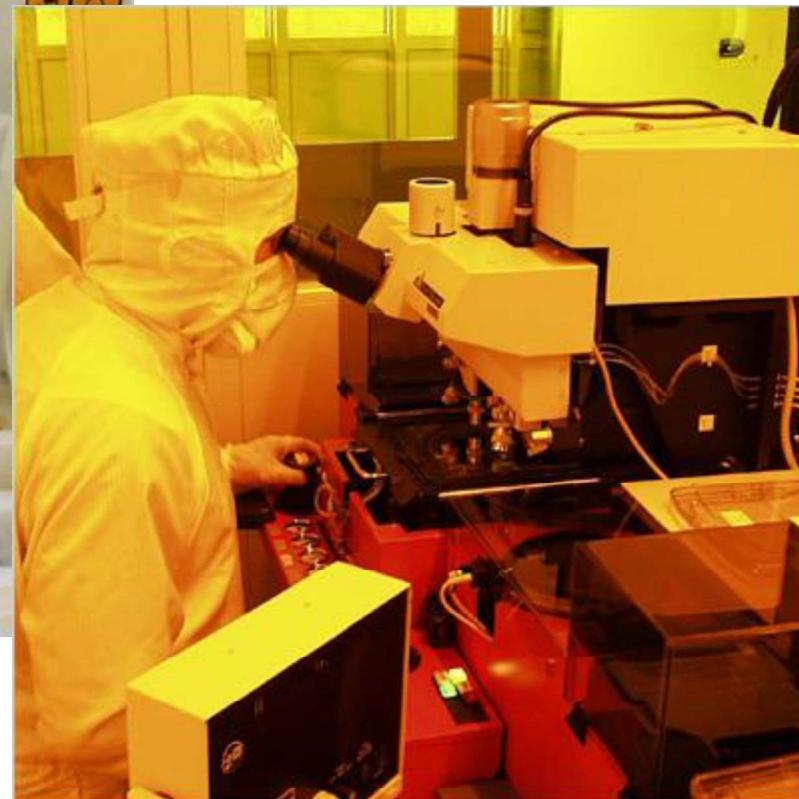




**Im Reinraum herrscht immer ein leichter Überdruck**

## Arbeit im Reinraum

---



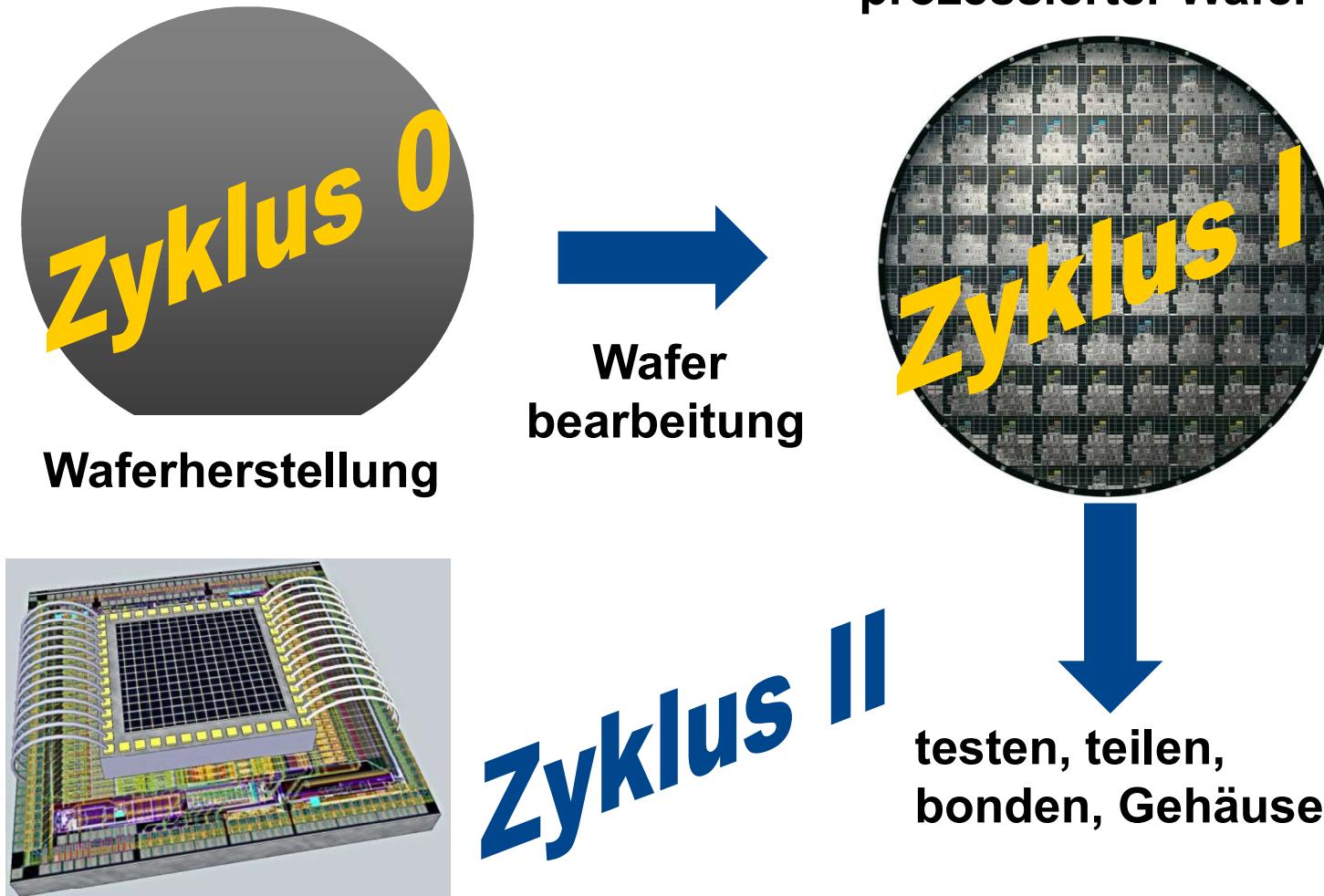
## Arbeit im Reinraum



---

# Chipherstellung

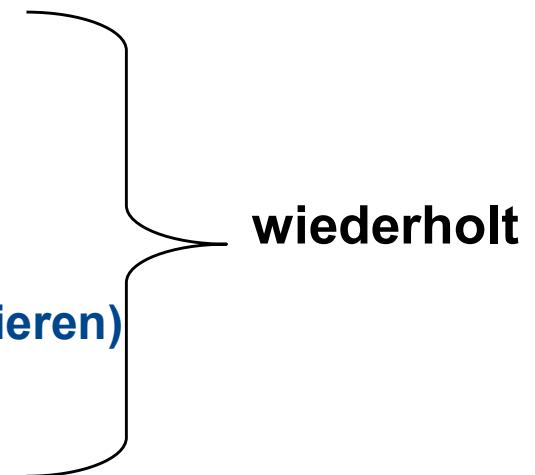
## Herstellung eines verkaufsfähigen IC's



- **Wafer-Herstellung (Zyklus 0)**  
**Rohsilizium → Reinstsilizium → Einkristallines Silizium → Wafer**

- **Chip Herstellung (Zyklus I)**

Reinigung  
Schichtabscheidung  
Oxidwachstum  
Strukturübertragung (Lithografie)  
Strukturierung (Ätzen)  
Materialabtrag (Chemisch-mechanisches Polieren)  
Dotieren (Diffusion und Ionen-Implantation)  
Kontaktieren, Metallizierung



- **Post-Fab (Zyklus II)**

**Testen → Teilen → Bonden → Einhäusern (Packaging)**

---

# **Ein einfacher technologischer Ablauf zur Herstellung von pn-Dioden**

→ Oberstufenlabor „Halbleitertechnologie“

→ Blockveranstaltung im Januar

Feldoxid

p-Typ Si-Wafer



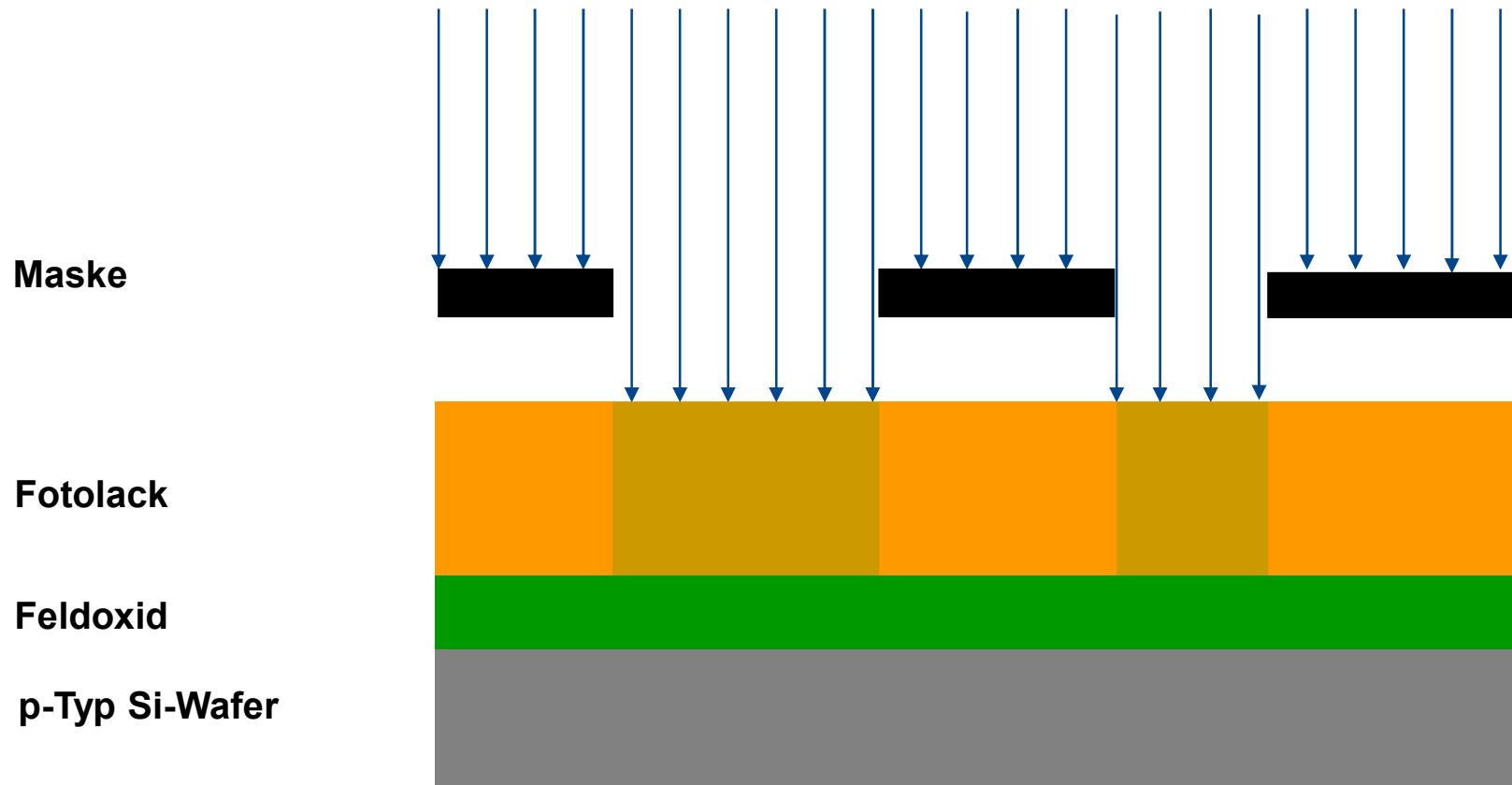
Fotolack

Feldoxid

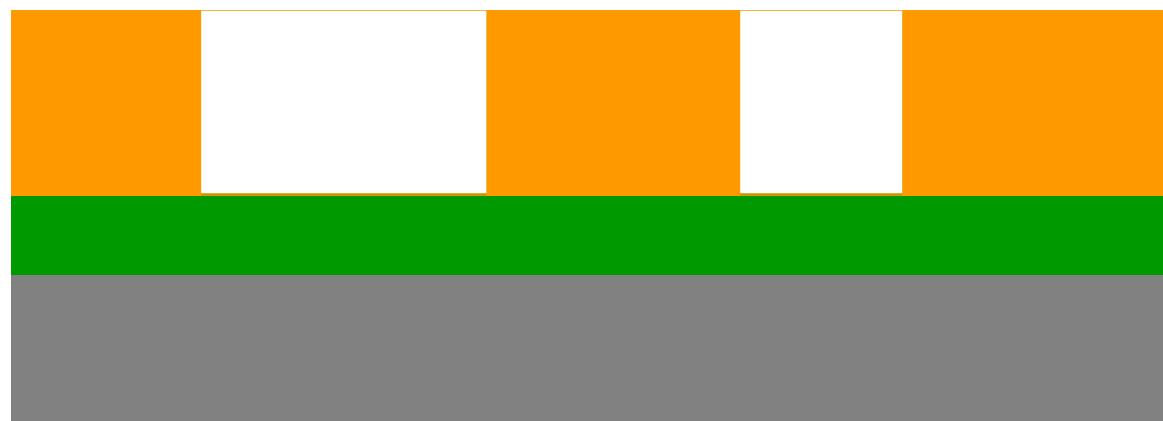
p-Typ Si-Wafer



## Belichten mit UV-Licht



**Fotolack**



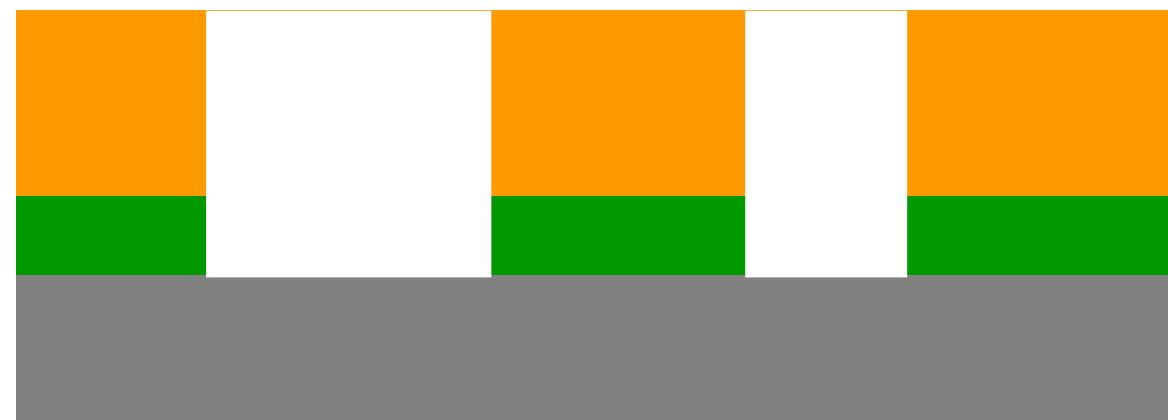
**Feldoxid**

**p-Typ Si-Wafer**

## Öffnen der Diodenfenster



Fotolack



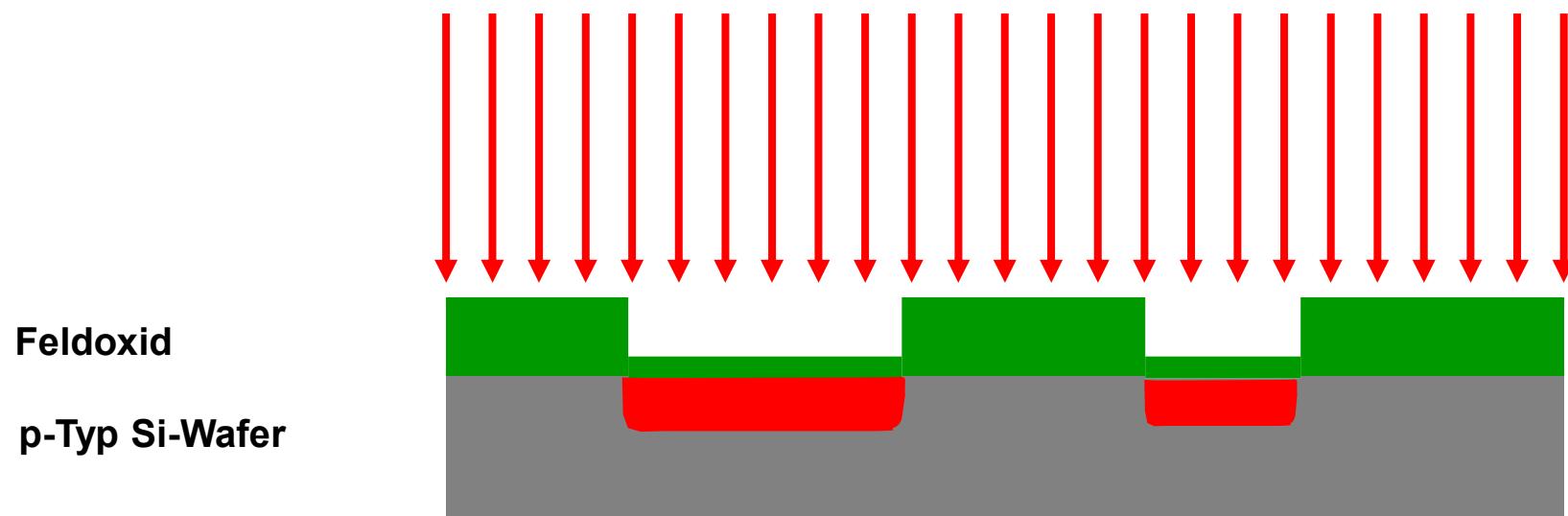
Feldoxid

p-Typ Si-Wafer

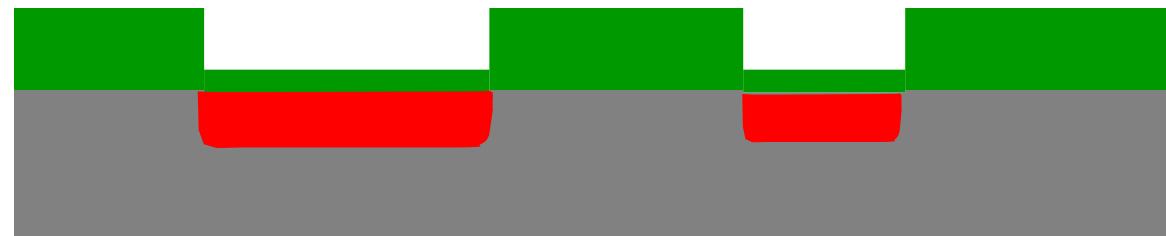
Feldoxid



p-Typ Si-Wafer

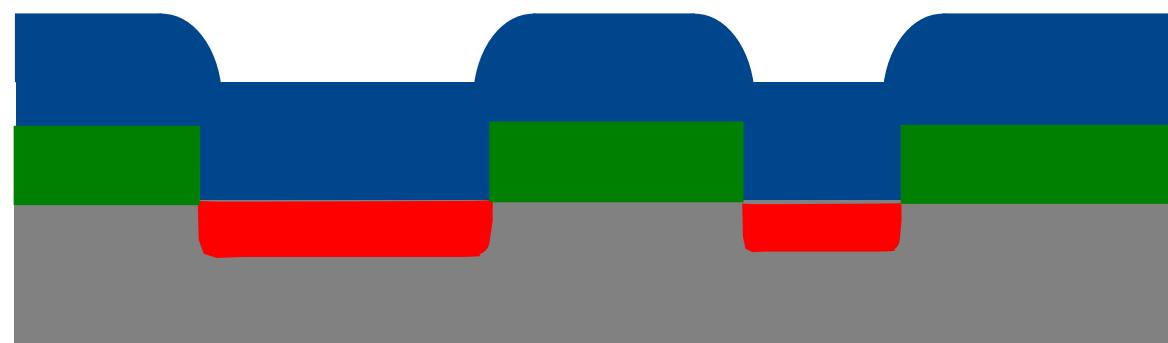


Feldoxid  
p-Typ Si-Wafer



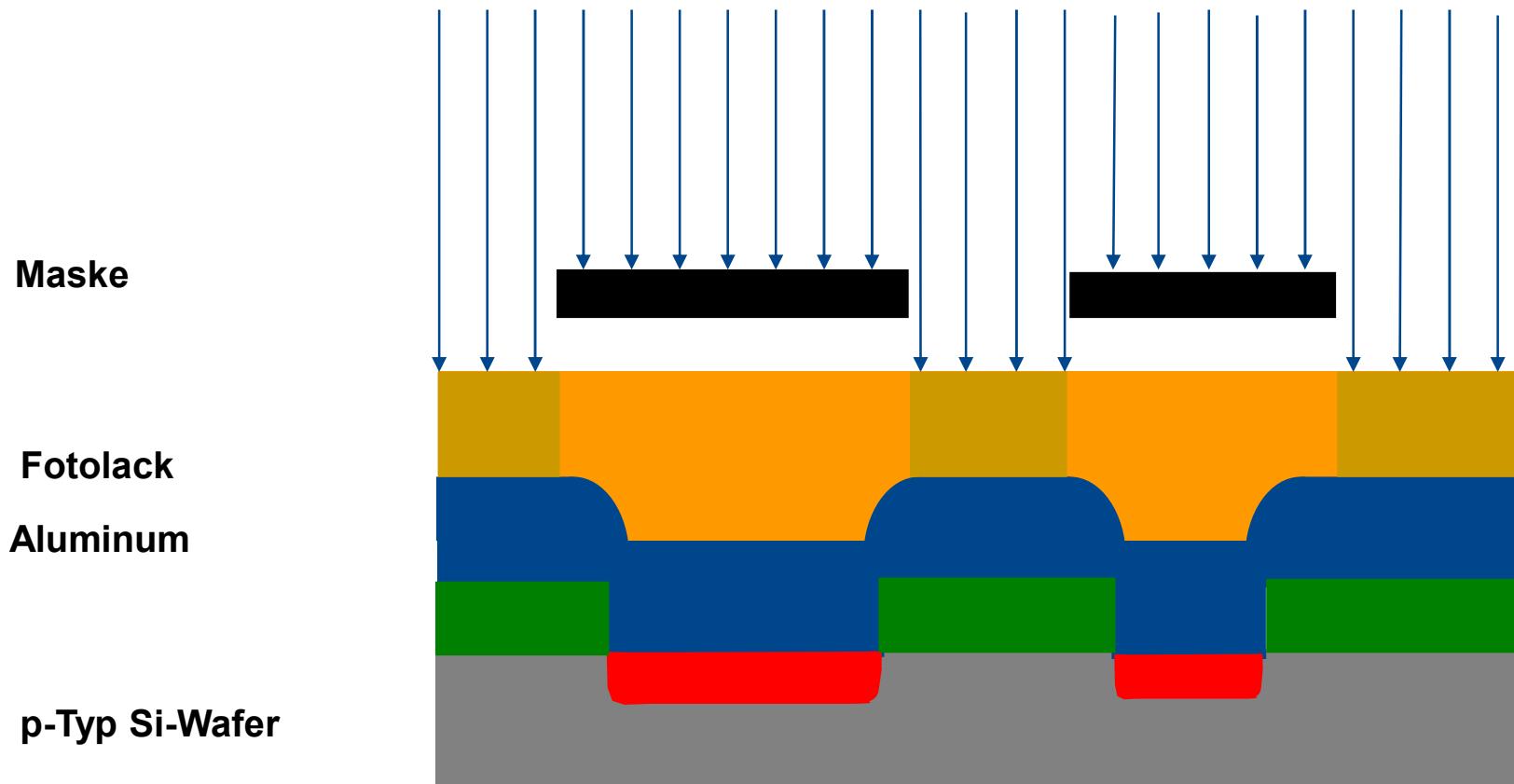
Aluminum

p-Typ Si-Wafer



Fotolack  
Aluminum  
p-Typ Si-Wafer

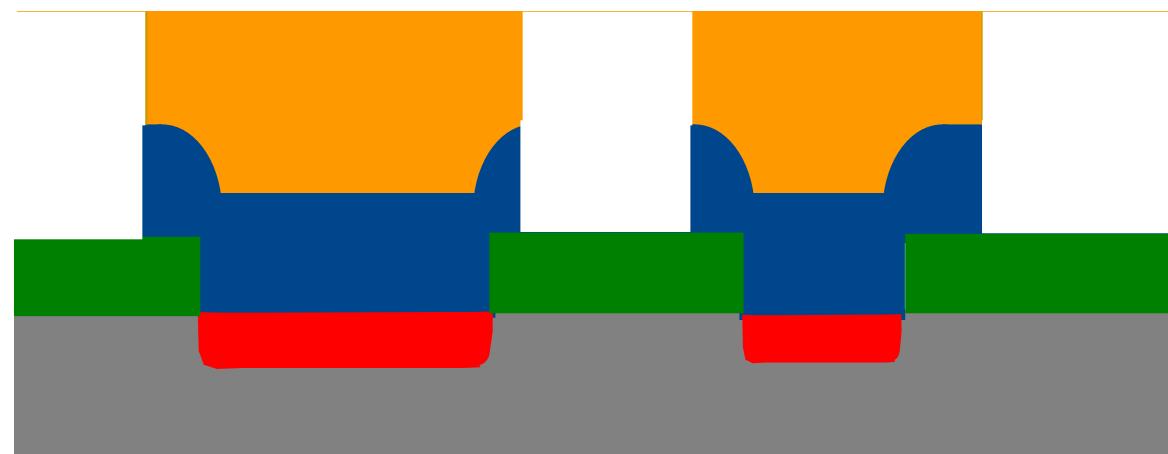




Fotolack  
Aluminum  
p-Typ Si-Wafer



Fotolack  
Aluminum  
p-Typ Si-Wafer

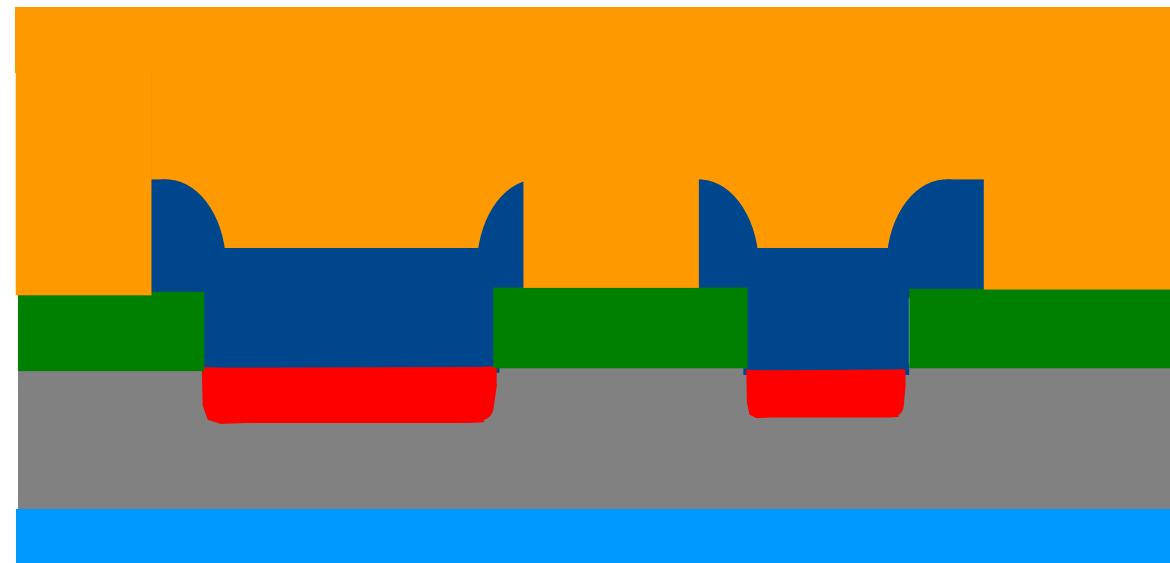


## Fotolack aufbringen

Fotolack  
Aluminum  
p-Typ Si-Wafer



Fotolack  
Aluminum  
p-Typ Si-Wafer  
Ti oder Al

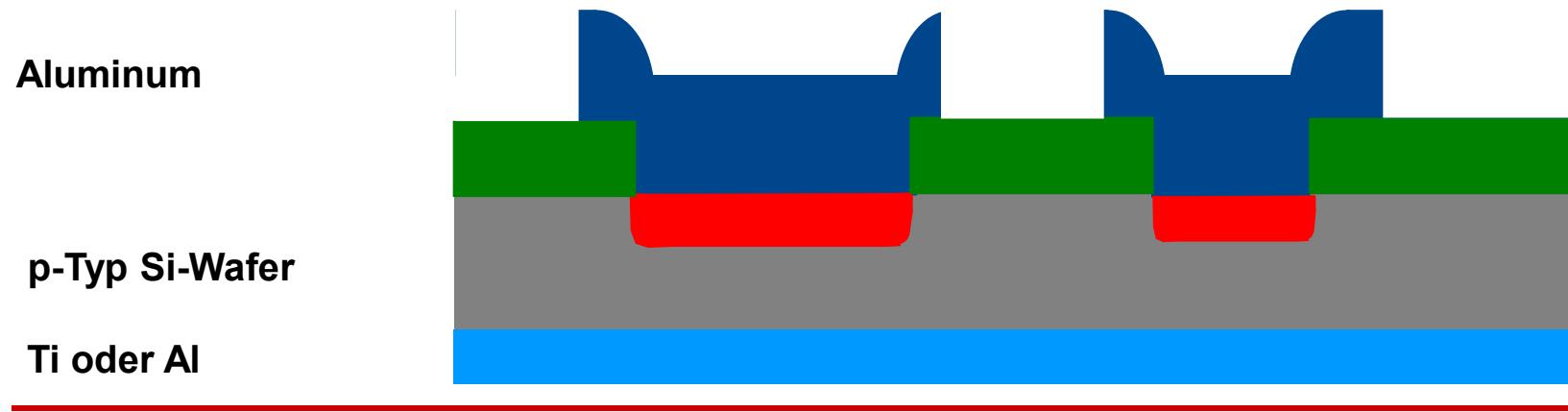


Fotolack  
Aluminum  
p-Typ Si-Wafer  
Ti oder Al



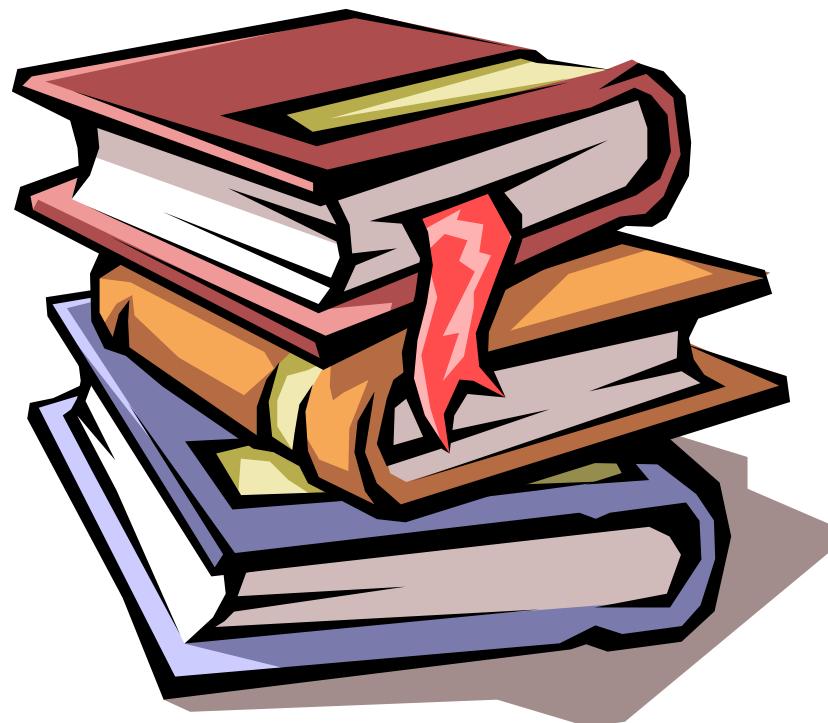
## pn-Diode ist bereit zur Messung

---



---

# Das Drehbuch



# Das Drehbuch (*flow chart*)

5	post_pre ParticleM	Messung	DEF1		-10	0	30	MP010
	ThickM Mon							
6	Initial Oxide	Messung	SPM1		13,05	14,5	15,95	MP011
7	Nitridabscheidung	Nitridabscheidung	DIF21			140		
	particleM							
8	Nitridion	Messung			-10		180	
9	Nitridion	Messung			126		154	
10	SC Sasonic	Naßchemie						
11	As Resist	Vorbereiten						
12	DUV Coat Dev	Belacken						
13	DUV Expose Pilot	Belichten						
14	CD Pilot	Messung						
15	AD Basic Pilot	Messung						
	Ash Rework							
16	Pilot	Vorbereiten						
17	DUV Coat Dev	Belacken	TRK1					
18	DUV Expose	Belichten	LIT2	M01				

**TS-Beschreibung**

**Geräte (tools)**

**Zielwerte  
(mit Toleranzen)**

**Messwerte**

- **Isolierende Schichten**

Siliziumoxid

Siliziumnitrid

Gläser (PSG, BPSG, usw.)

High-K Materialien (Metalloxide)

Low-K Materialien (organisch Verbindungen)

- **leitende Schichten**

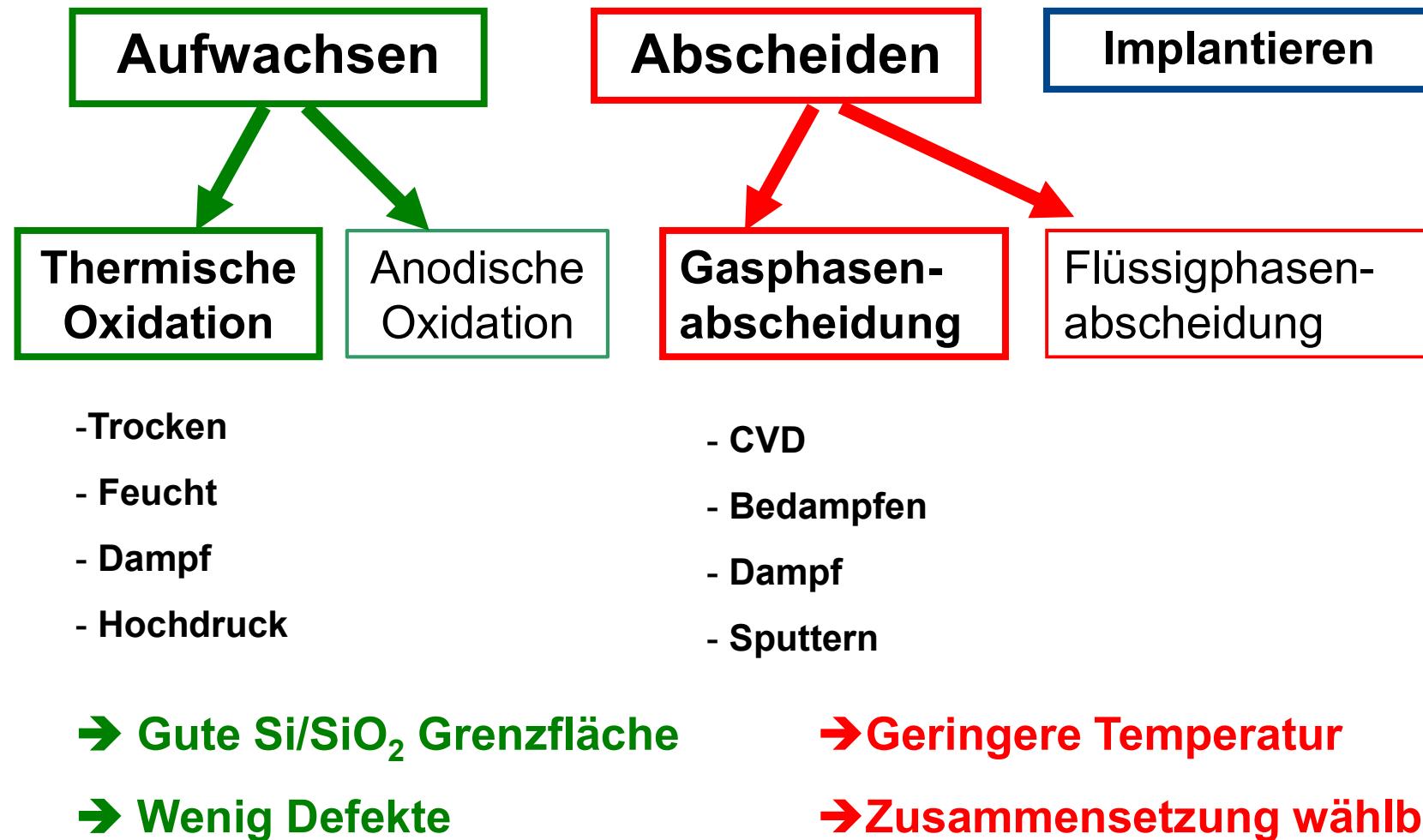
Leiterbahnen (Al, Cu)

Kontaktstöpsel (Wolfram)

Barrièreschichten (TiN, Ti)

- **Halbleitende Schichten**

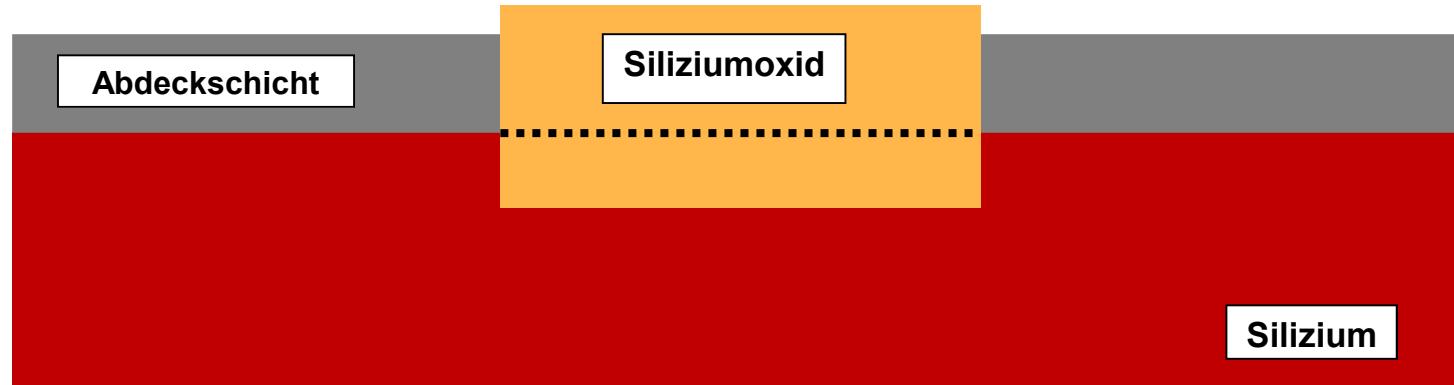
Silizium (poly-Si bzw. epitaktisches Si), Germanium, SiGe



---

# Thermische Oxidation

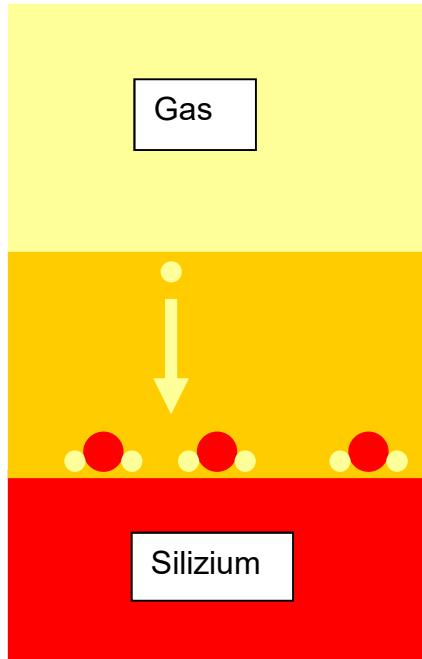
## Wachstum von $\text{SiO}_2$ auf Silizium



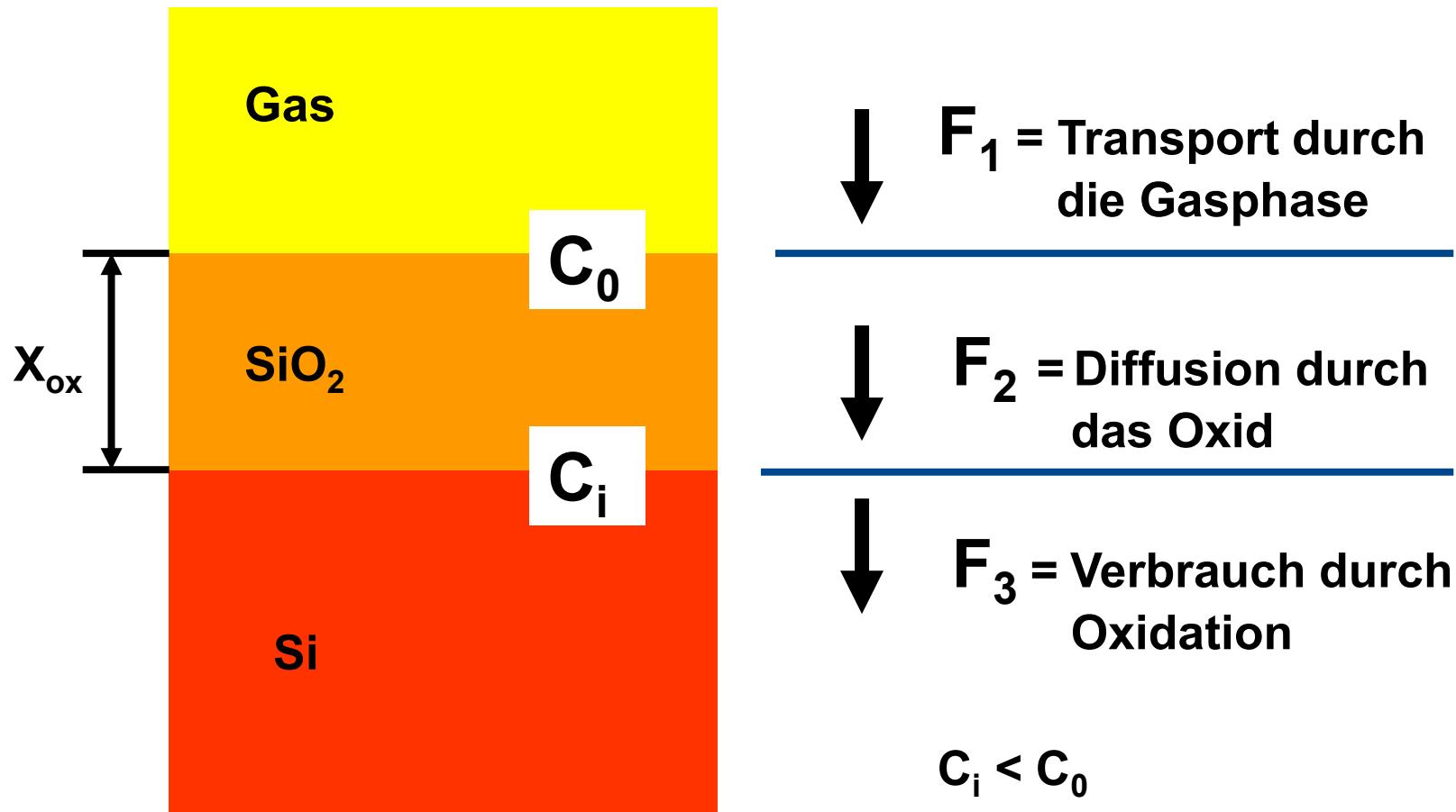
→ zum Wachstum von Siliziumoxid wird  
Silizium verbraucht

Beispiel: Für 40 nm  $\text{SiO}_2$  werden ~18 nm Si verbraucht

## Wie wächst Siliziumoxid



- **SiO<sub>2</sub> wächst immer an der Grenzfläche zum Silizium**
- **Sauerstoff diffundiert durch das Oxid und reagiert dort mit Silizium**
- **Das Oxidwachstum wird bestimmt durch die Reaktionsrate und die Diffusionsgeschwindigkeit**



## Wachstumskinetik

- $F_1$ : Transport durch die Gasphase

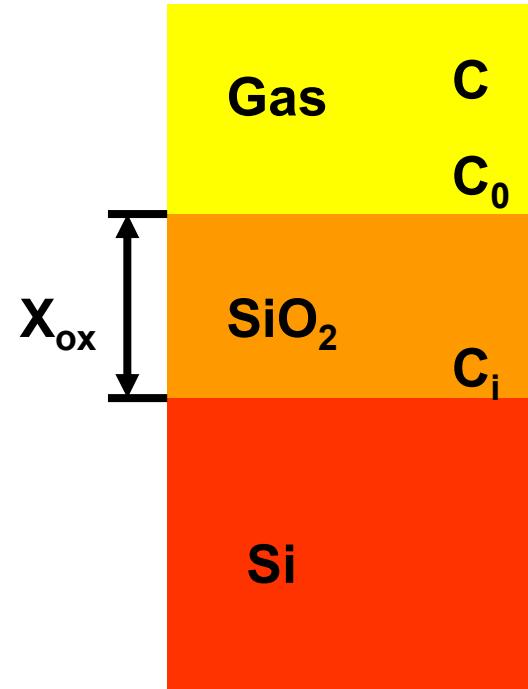
$$F_1 = h (C - C_0)$$

- $F_2$ : Diffusion durch das Oxid

$$F_2 = D (C_0 - C_i)/x_{ox}$$

- $F_3$ : Verbrauch durch Oxidation

$$F_3 = k C_i$$



**Gleichgewichtsbedingung:  $F = F_1 = F_2 = F_3$**

$$\frac{dx_{ox}}{dt} = \frac{F}{N} = \frac{kC}{\left(1 + \frac{k}{h} + \frac{kx_{ox}}{D}\right)N}$$

**N = Anzahl von SiO<sub>2</sub>-Molekülen pro Volumeneinheit**

**Annahme:  $x_{ox} = x_0$  bei  $t = 0$  (Anfangsoxid)**

Gleichgewichtsbedingung:  $F = F_1 = F_2 = F_3$

Annahme:  $x_{ox} = x_0$  bei  $t = 0$  (Anfangsoxid)

$$x_{ox}^2 + Ax_{ox} = B(t + \tau)$$

Deal und Grove 1965

B. E. Deal, A. S. Grove:  
*General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon*  
Journal of Applied Physics 36, 1965,  
S. 3770–3779

$$A = 2D \left( \frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right)$$

$$B = 2D \frac{C}{N}$$

$$\tau = \frac{(x_0^2 + Ax_0)}{B}$$

$$x_{ox}(t) = \frac{A}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{t + \tau}{(A^2 / 4B)}} - 1 \right]$$

## Konsequenzen

---

$$X_{ox} = \frac{A}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{t + \tau}{(A^2 / 4B)}} - 1 \right]$$

**Erste Oxidationsphase:  $(t + \tau) \ll A^2/4B$ :**

$X_{ox} \sim (t + \tau)$  → reaktionsbestimmt

$$X_{ox} = \left( \frac{B}{A} \right) \cdot (t + \tau)$$

→ linear

B/A – lineare Ratenkonstante

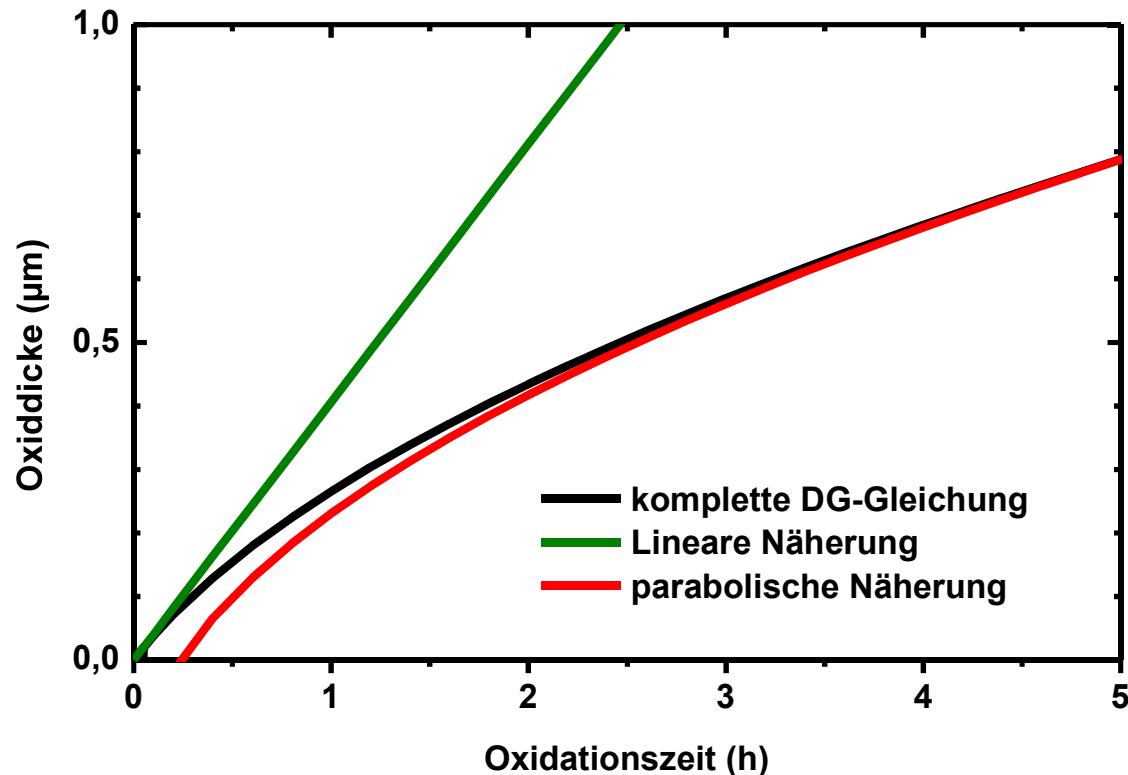
**Dicke Oxidschichten:  $t \gg A^2/4B, t \gg \tau$ :**

$X_{ox} \sim t^{1/2}$  → diffusionsbestimmt

→ parabolisch

B – parabolische Ratenkonstante

## Beispiel: Deal-Grove Verhalten



## Deal-Grove-Gleichung

$$x_{ox}^2 + Ax_{ox} = B(t + \tau)$$

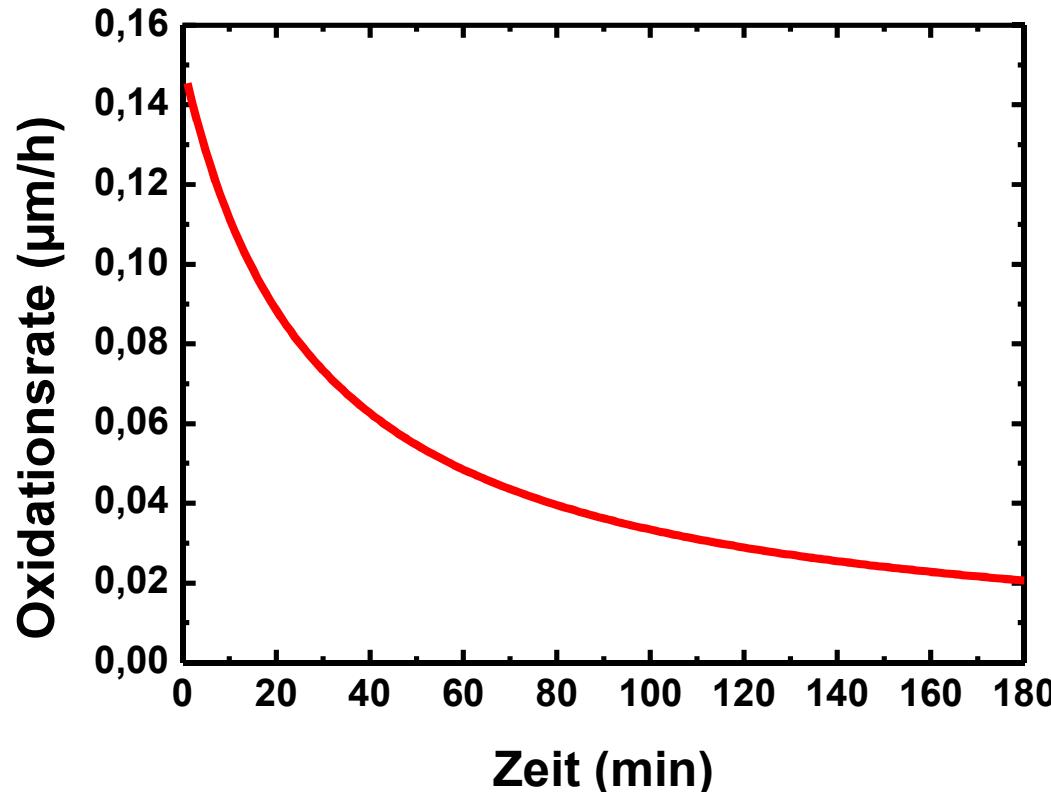
Oxidationsrate:

$$\frac{dx_{ox}}{dt} = \frac{B}{2x_{ox} + A}$$

→ Rate nimmt mit wachsender Oxiddicke ab

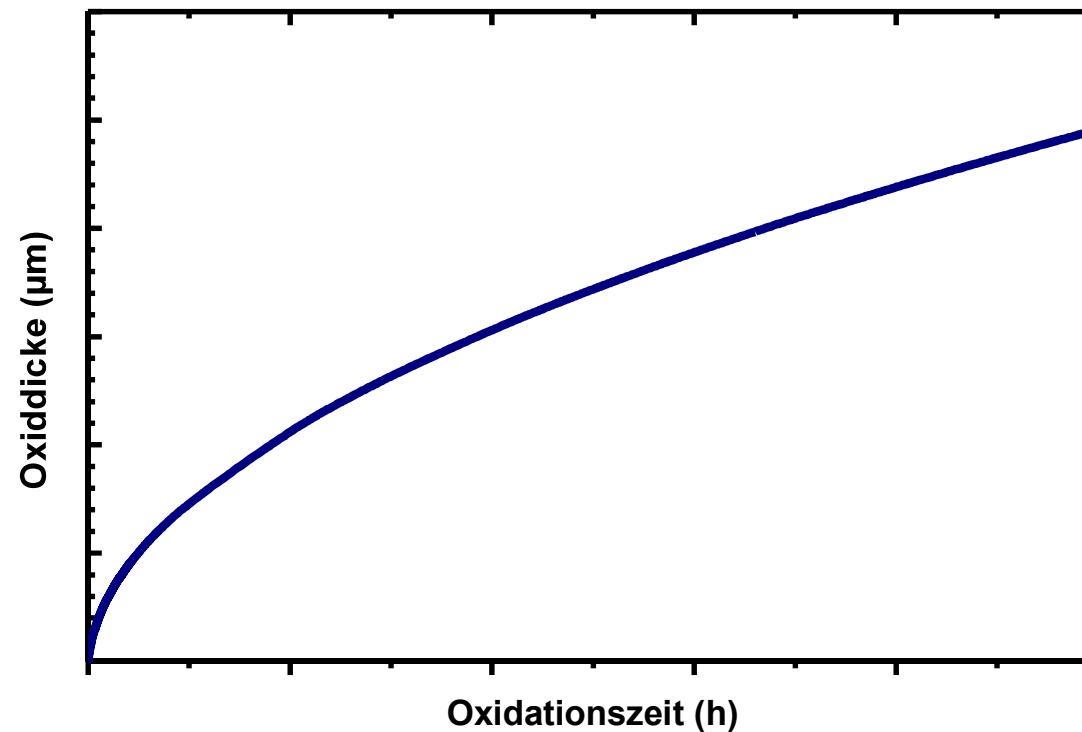
## Oxidationsrate

---



**Beispiel: Si(001) Oxidation bei 900 °C (trocken)**

## Deal-Grove Verhalten: Langzeitoxidation



## Natürliches Oxid

---

- Die direkte Oxidation einer sauberen Si-Oberfläche ist auch bei RT möglich
- Eine Diffusion von  $O_2$  durch das Oxid findet bei RT nicht statt  
→ Selbstlimitierung der Oxidation
- Innerhalb eines Tages entsteht auf einer Si-OF eine ~ 1.5 nm dicke Oxidschicht (*native oxide*), die auch bei längerem Luftkontakt nicht weiter wächst.

---

# Implantation

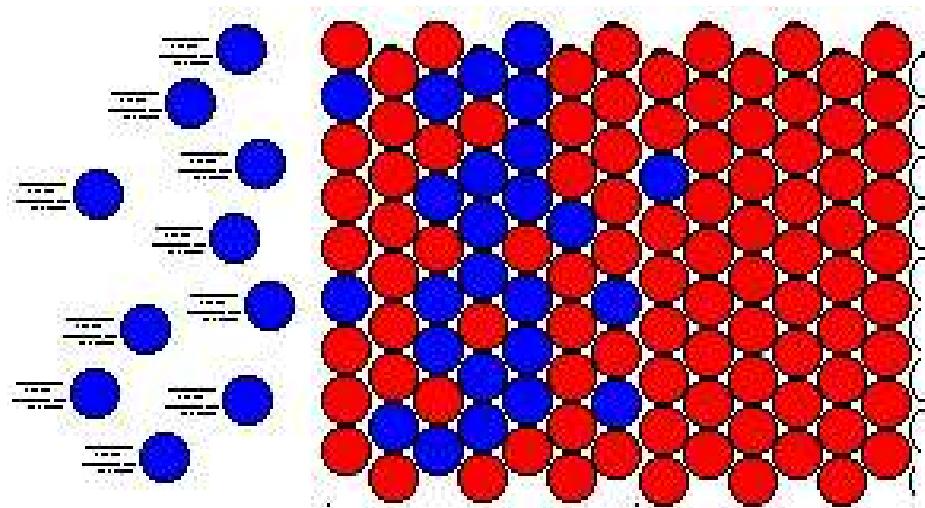
## Dotiertechniken während der Chipherstellung

Eindiffusion

Implantation

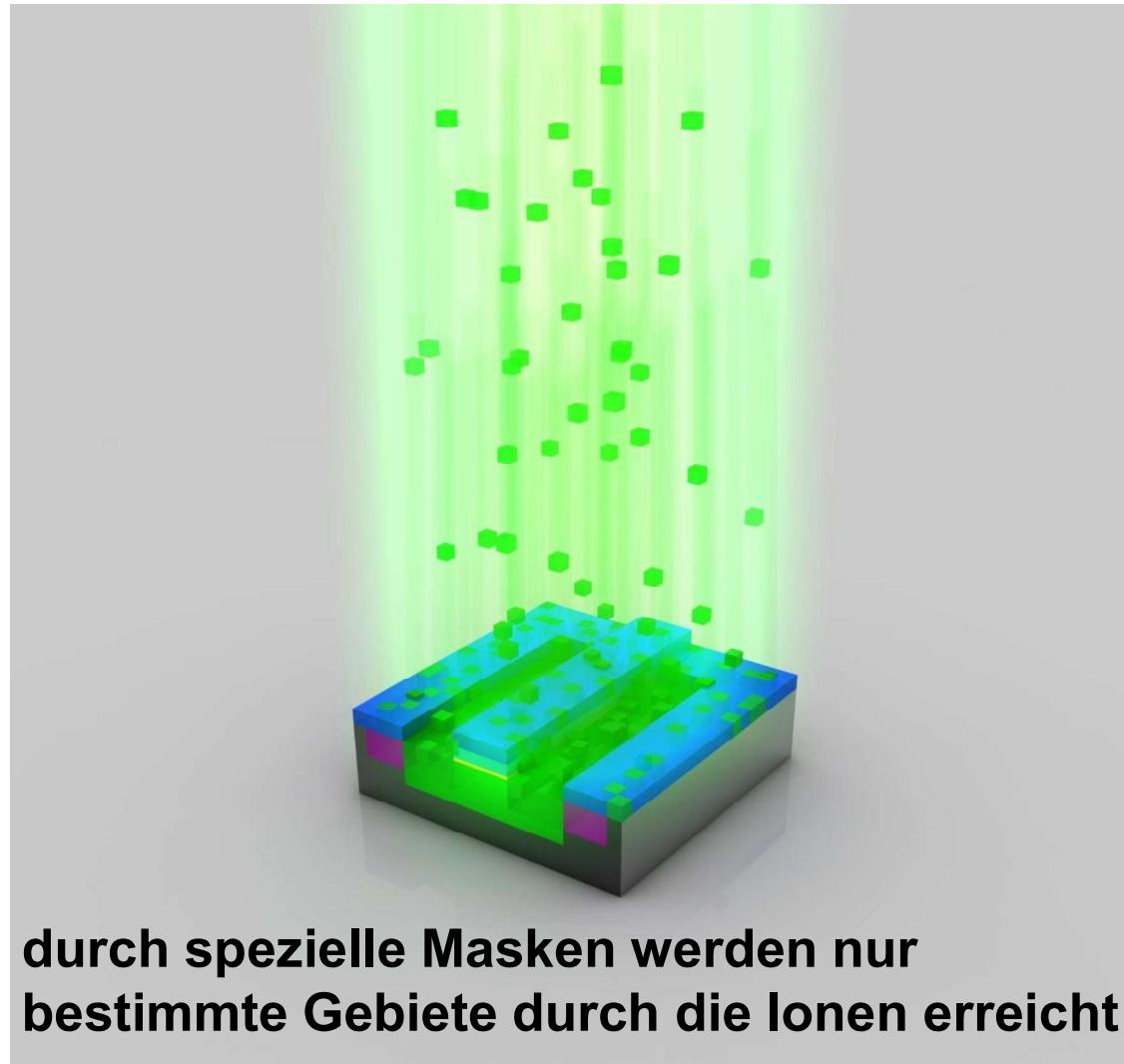
Schichtabscheidung

**Billard mit Atomen: Physik mit schnellen Ionen**



**Implantation: Beschuss des Materials mit schnellen Ionen**

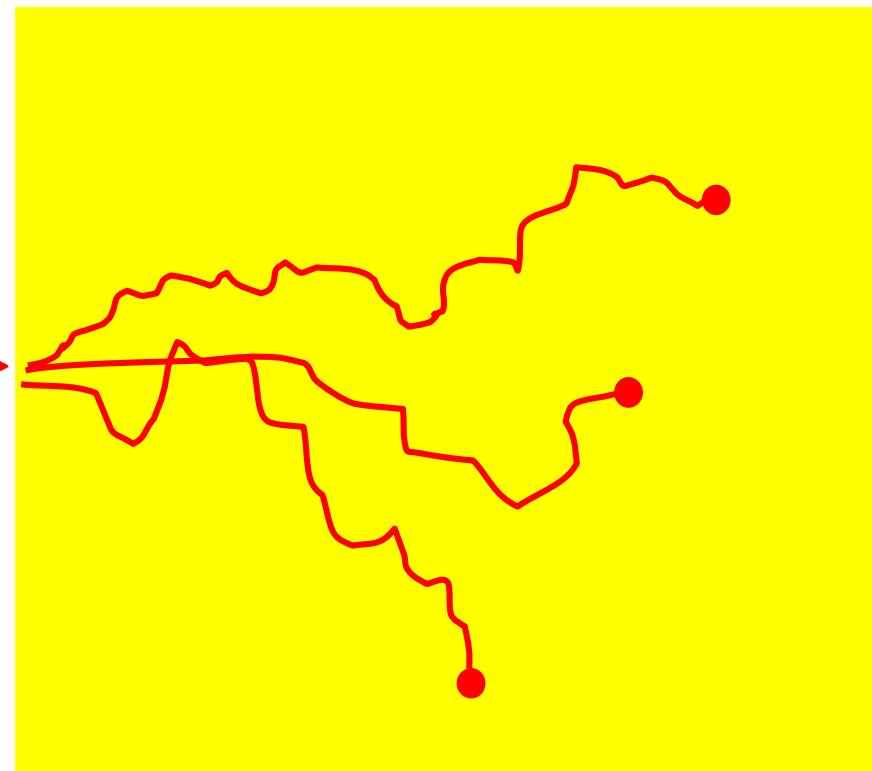
## Ionenimplantation



## Beschuss eines Festkörpers mit Ionen

Festkörper, z.B. Silzium

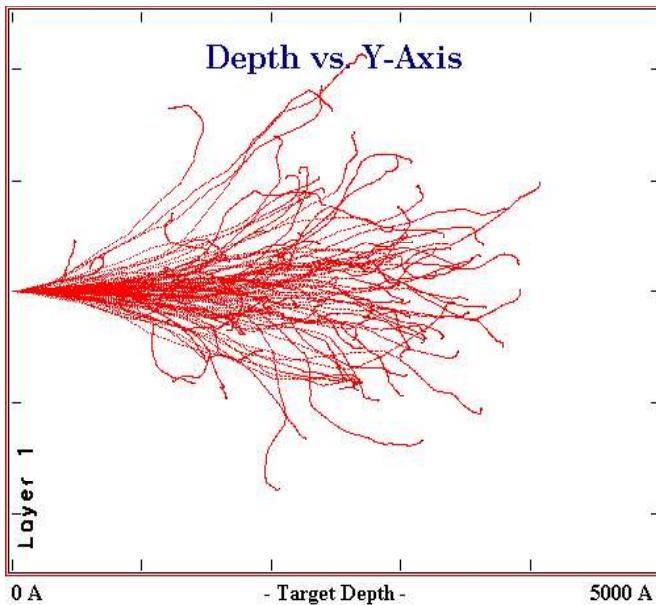
Ion, z.B. Bor<sup>+</sup>



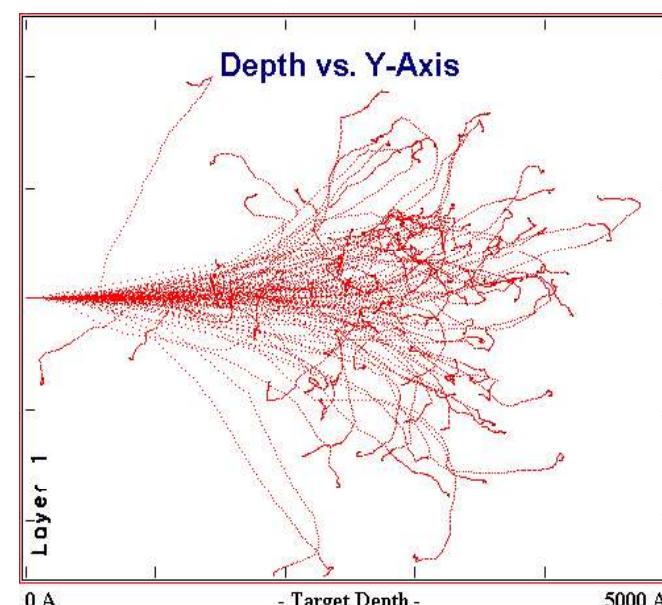
→ Die Bahnen werden Trajektorien genannt

## Implantation: Ein Beispiel

Trajektorien von 100 Ionen in 0.5 µm Silizium



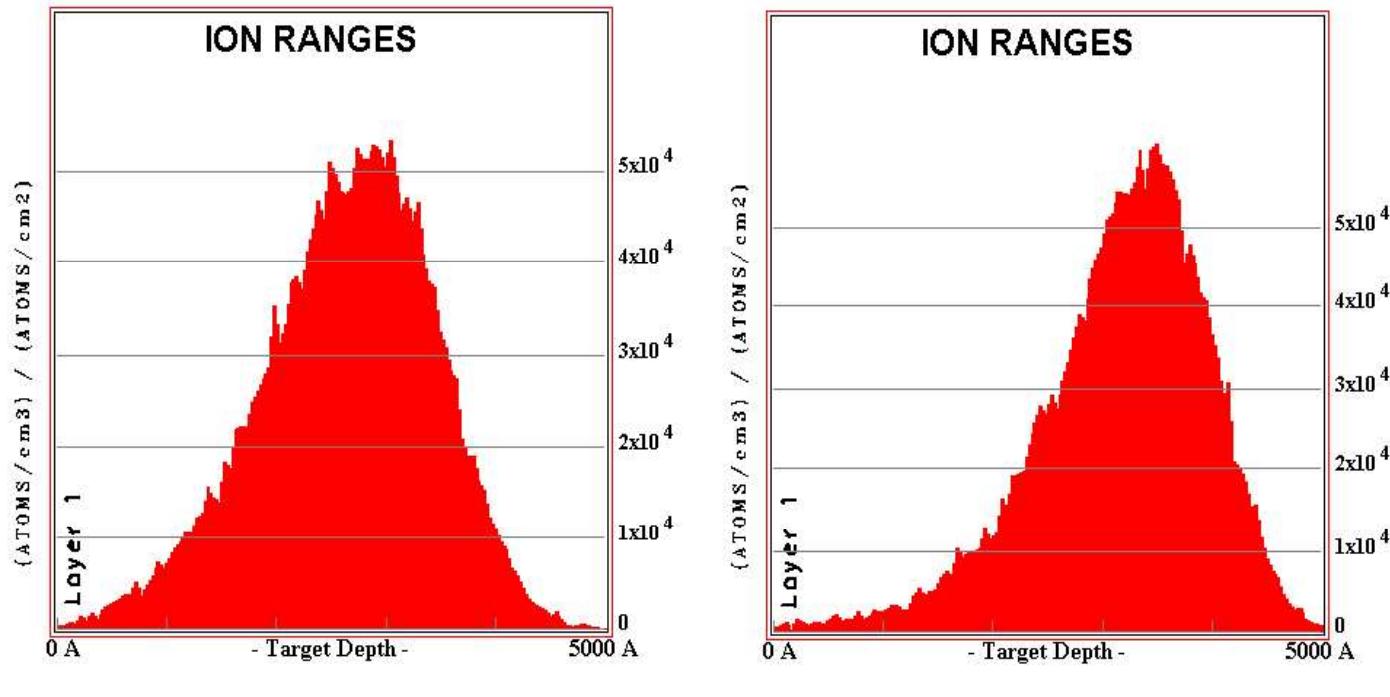
P (200 keV)



B (100 keV)

Aufsummieren aller Endpositionen ergibt die Tiefenverteilung

# Implantationsprofile



→ Verteilung ist KEINE perfekte Gausskurve

$$\Phi = \frac{1}{zqA} \cdot \int_0^T Idt$$

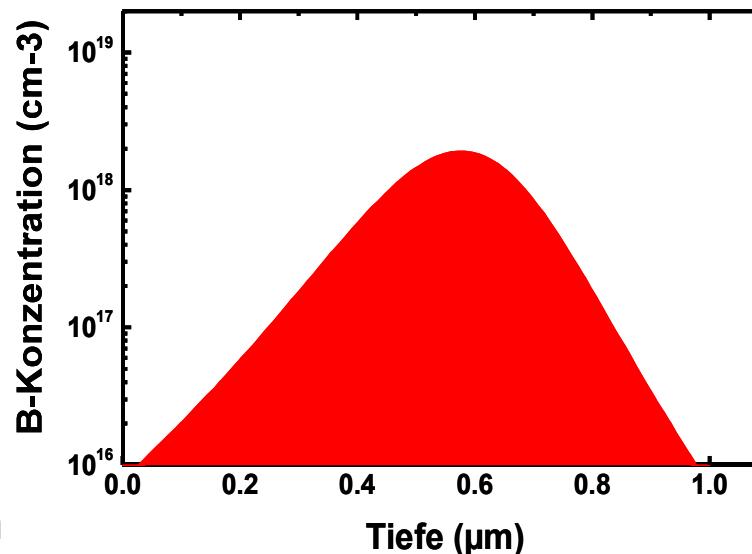
I – Ionenstrom

T – Implantationszeit

A – Strahlfläche

z – Ionisierungsgrad der Ionen

in Ionen/cm<sup>2</sup>



**Beschreibt die Gesamtmenge an implantierten Ionen pro Fläche**

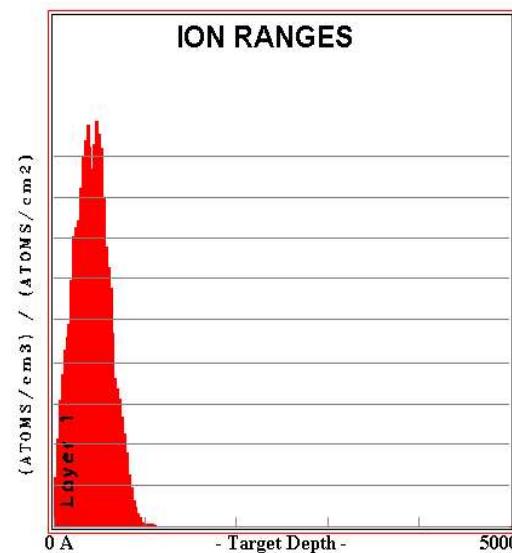
## Ionen Implantation

---

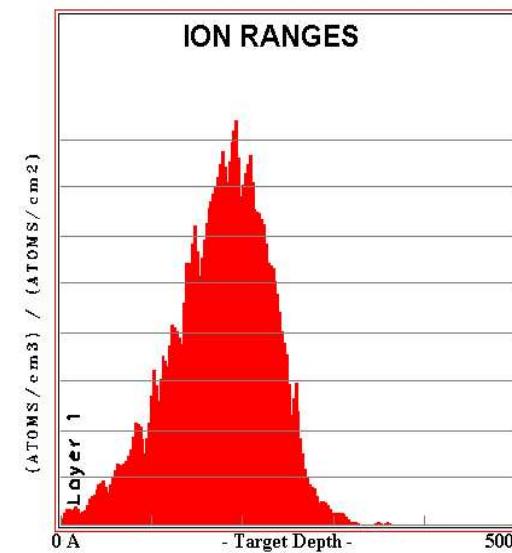
- Typische Implantationsdosen sind im Bereich von  $10^{10}/\text{cm}^2$  bis  $10^{18}/\text{cm}^2$ .
- Implantation von großen Dosen ( $> 10^{15}/\text{cm}^2$ ) kann sehr lange dauern
- Das Implantationsprofil hängt von folgenden Größen ab:  
**Energie der eingeschossenen Ionen,**  
**Masse der Ionen und**  
**Masse der Atome im Target.**
- Implantationsprofile können mit TRIM auf dem PC simuliert werden ([www.srim.org](http://www.srim.org))

## Bor Implantation in 500 nm Silizium

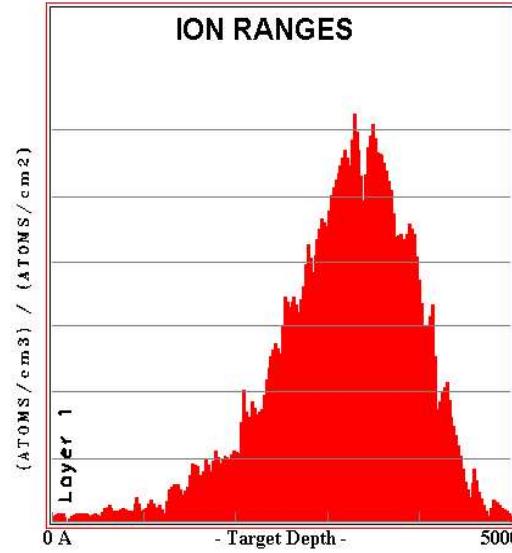
10 keV



50 keV

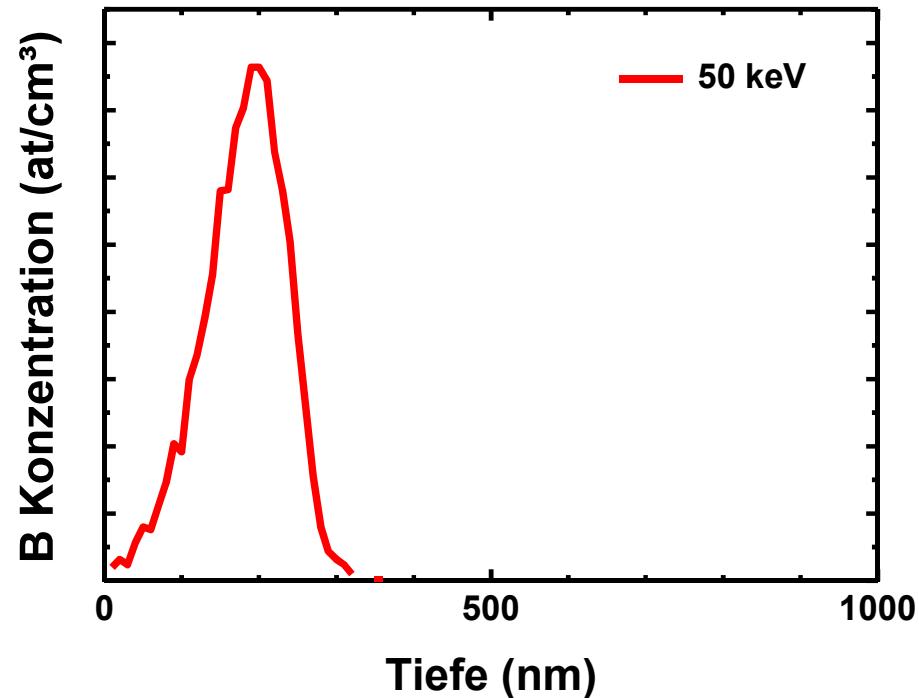


100 keV



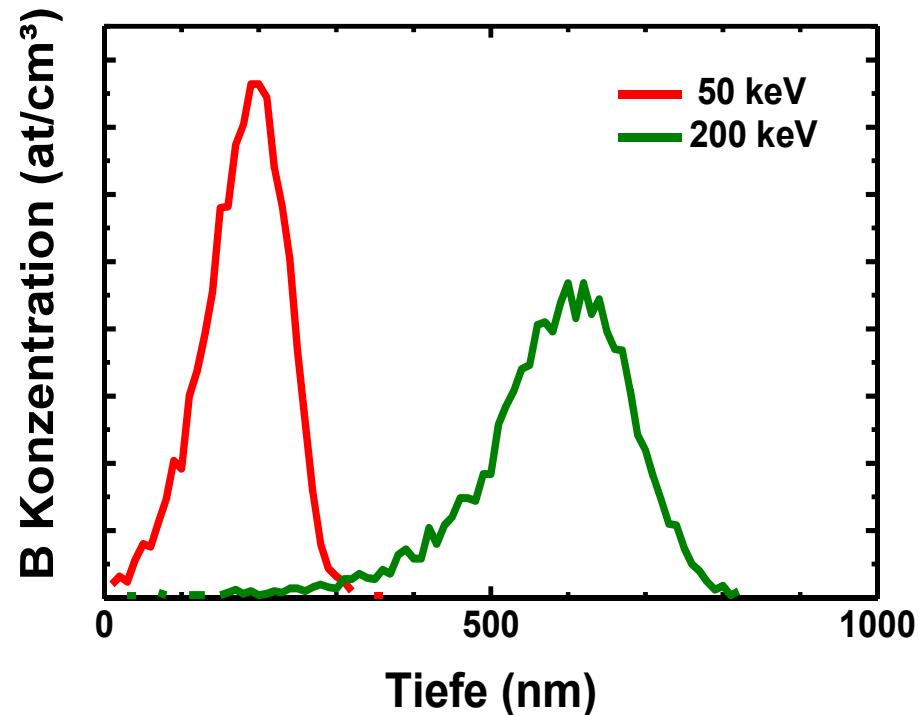
→ Größere Energie → tieferes Eindringen → breitere Verteilung

## Verschiedene Profile: Bor in Si



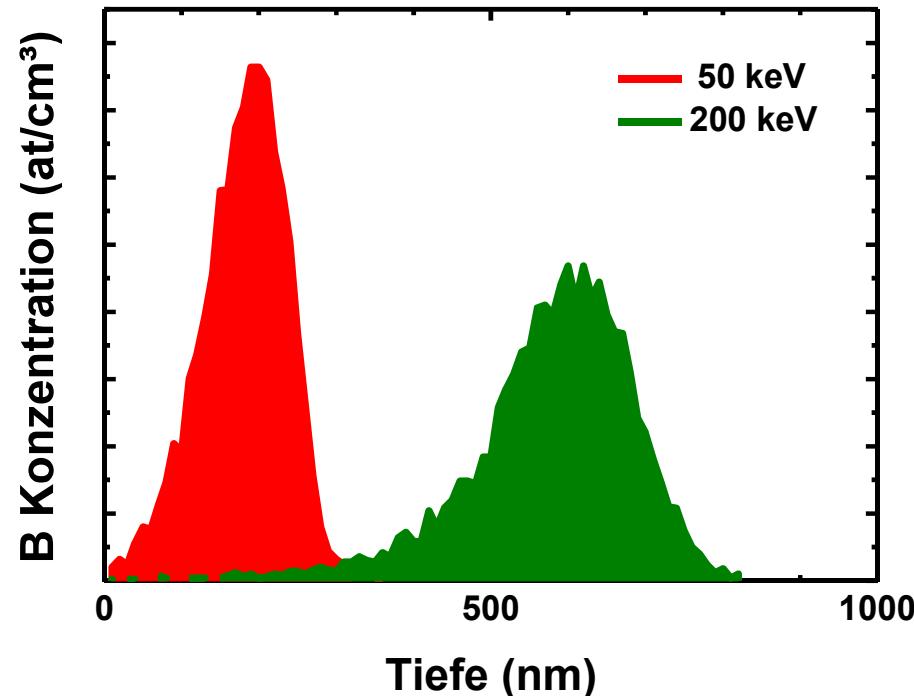
Wie sieht das Profil aus bei gleicher Dosis aber höherer Energien?

## Verschiedene Profile: Bor in Si



Gleiche Dosis aber verschiedene Energien

## Verschiedene Profile: Bor in Si

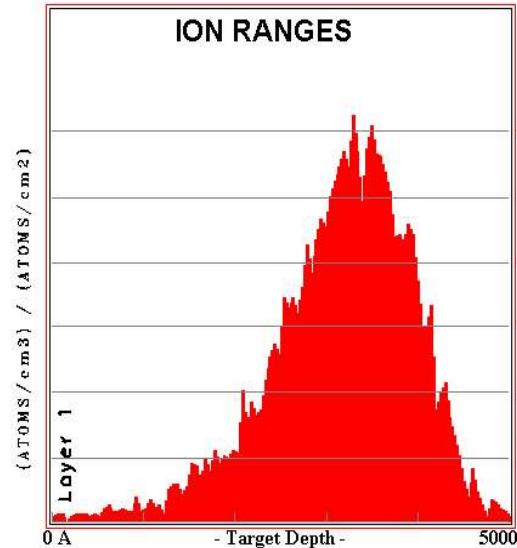


Gleiche Dosis → gleiche Flächeninhalte

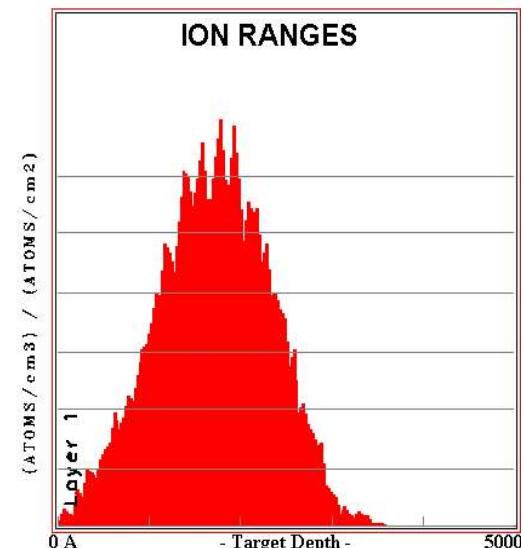
# Simulation von Profilen: Massenabhängigkeit

verschiedene Ionen in 500 nm Silizium bei 100 keV

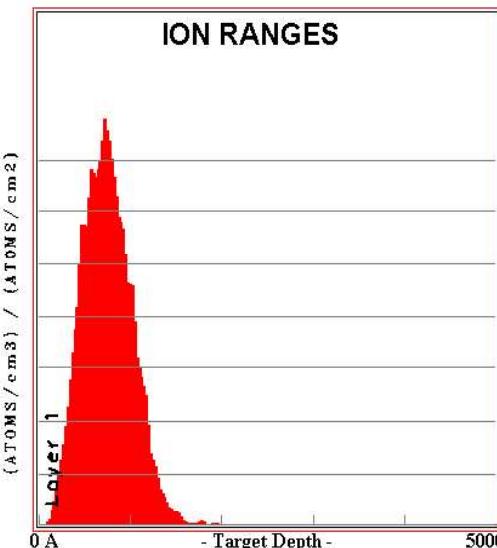
B



Al



Ga

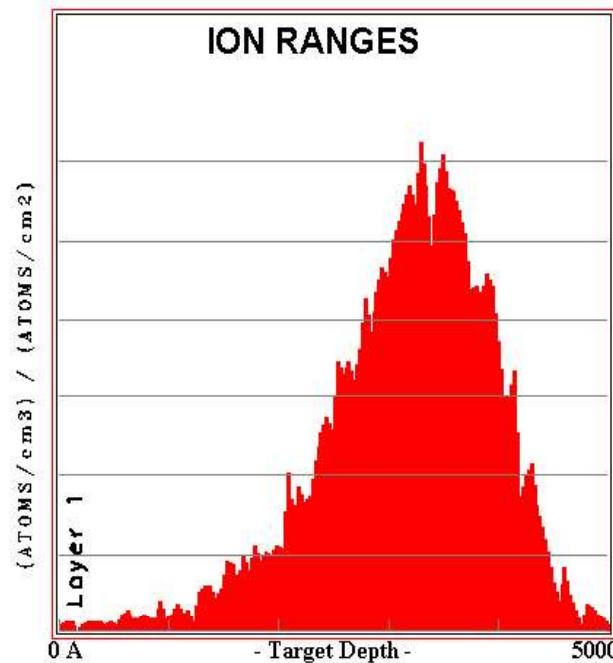


→ Leichtere Atome → tieferes Eindringen → breitere Verteilung

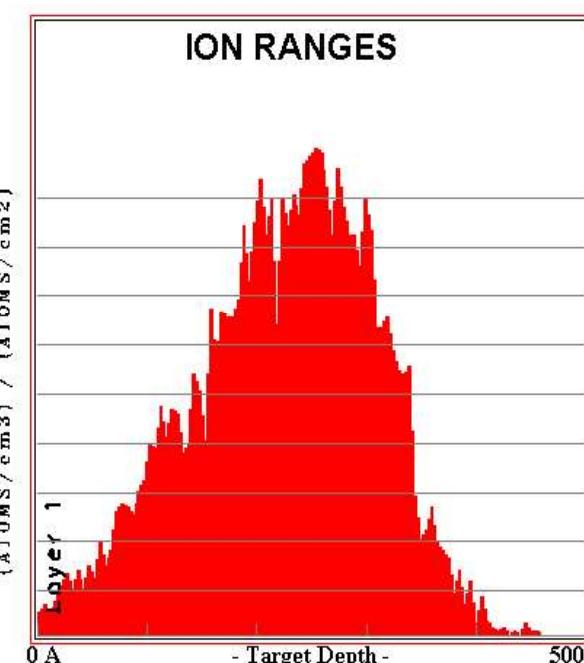
## Simulation von Profilen: Matrixabhängigkeit

Bor Implantation in 500 nm Si bzw. Ge bei 100 keV

Si



Ge



- Leichtere Matrix → tieferes Eindringen
- Schwere Matrix → breitere Verteilung

- Nur wenige implantierte Ionen werden sofort auf Gitterplätzen eingebaut.
- überwiegender Einbau als interstielle Atome
- ABER: Nur substitutionelle Dotieratome sind elektrisch aktiv.

→ Aktivierung ist notwendig

→ Ofentempern oder Kurzzeittempern  
(RTA – *Rapid Thermal Annealing*)

→ Aktivierung der Dotieratome und Ausheilung von Kristallschäden

Konzentration →



Tiefe →

Gewünschtes  
Dotierungsprofil  
(z.B. für p-Wanne)

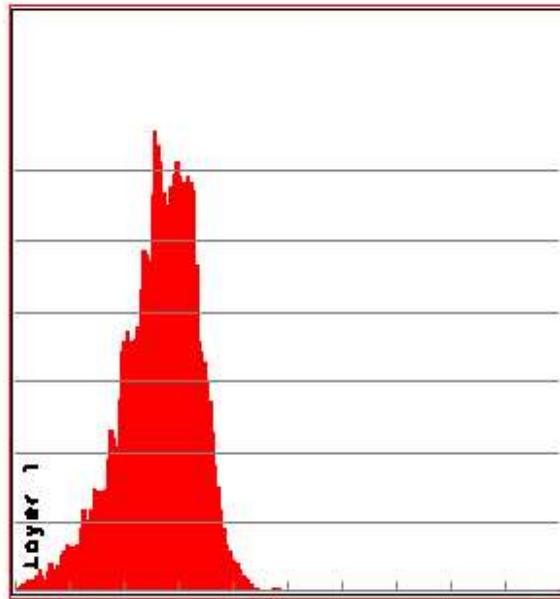
Erzielung einer homogenen Dotantenverteilung:

→ Stufenimplantation

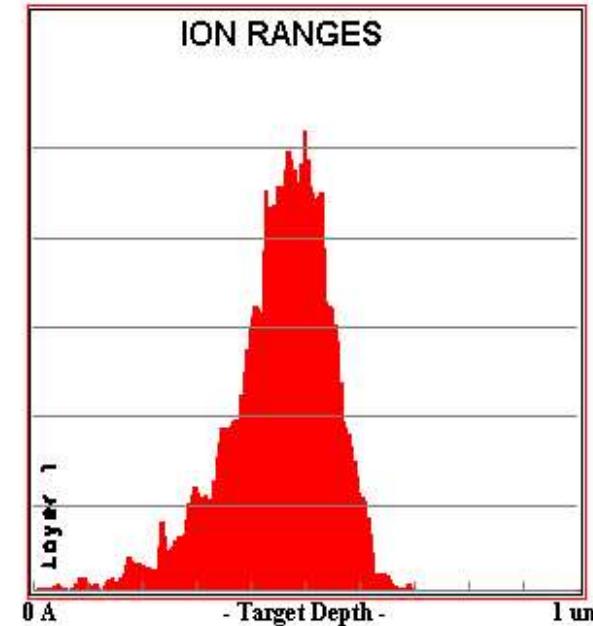
# Stufenimplantation

---

80 keV B



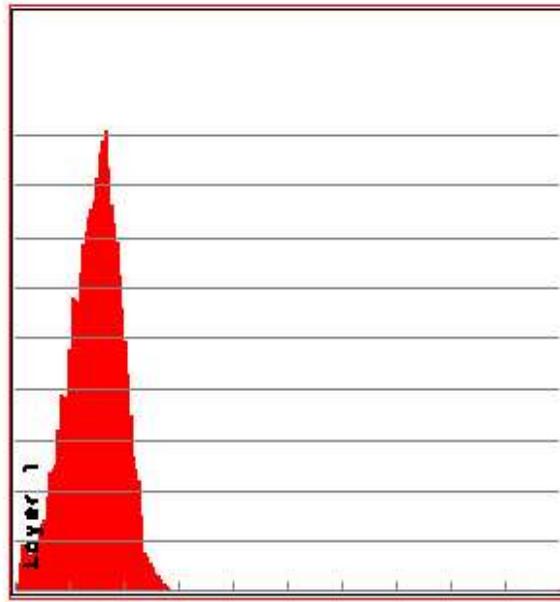
150 keV B



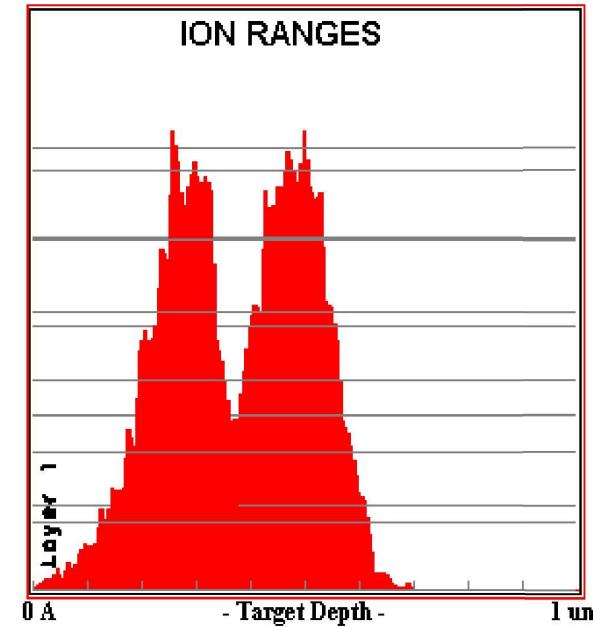
# Stufenimplantation

---

40 keV B

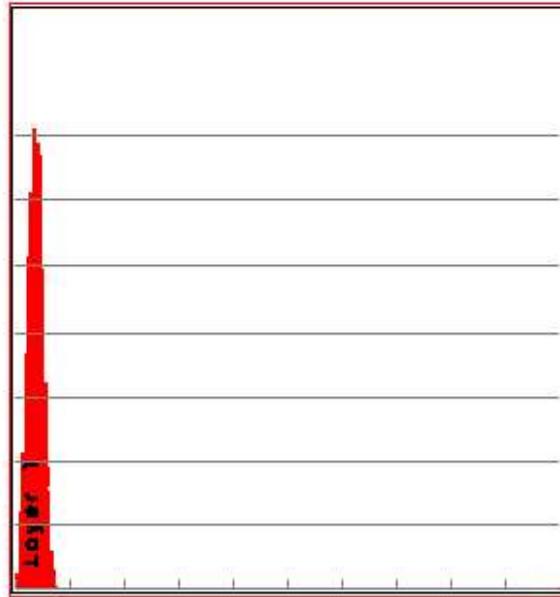


150 + 80 keV B

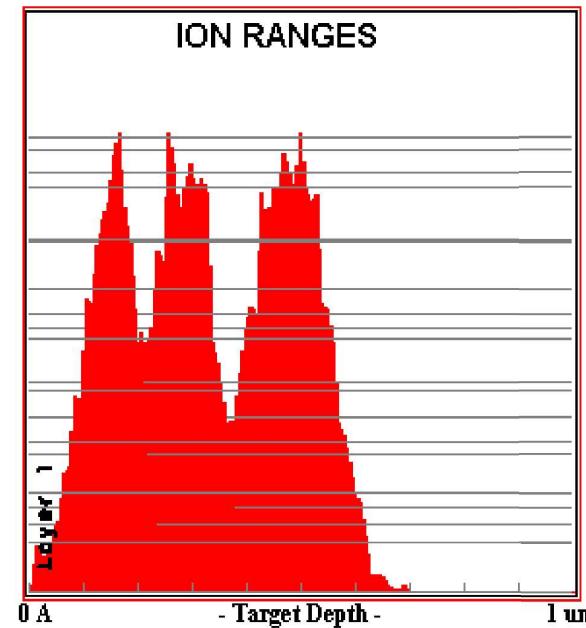


## Stufenimplantation

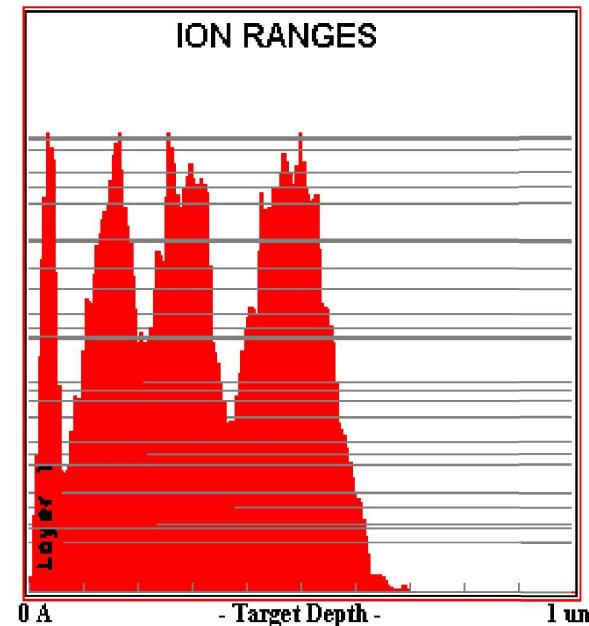
**35 keV BF<sub>2</sub>**



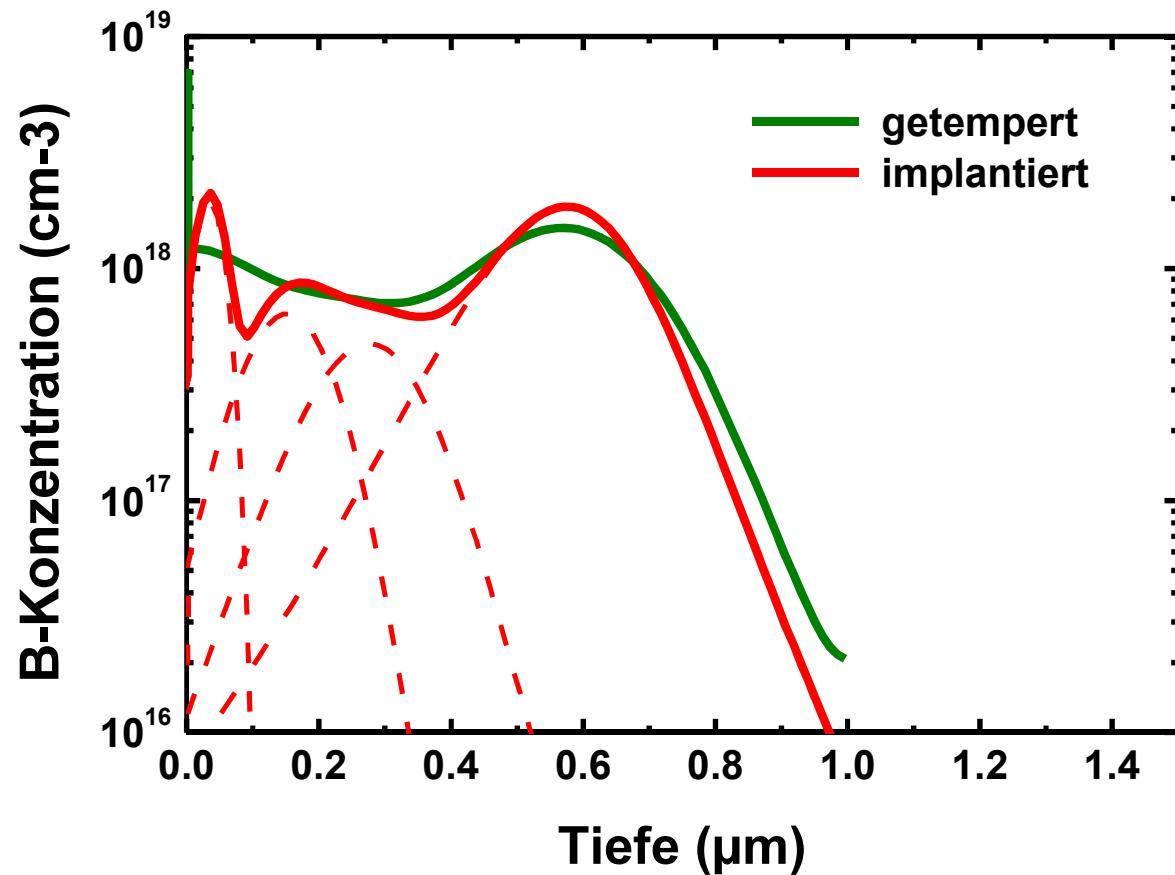
**150 + 80 + 40 keV B**



**Nachträgliches Tempern  
(Aktivierung) führt durch  
Diffusion zu homogener  
Verteilung**



$$150 + 80 + 40 \text{ keV B} \\ + 35 \text{ keV BF}_2$$



---

# Strukturübertragung (Lithografie)

## Begriffe:

- Lithographie:** auf dem Stein schreiben
- Fotolithographie:** mit Licht schreiben
- Fotoresist:** Material,  
(Fotolack)
- das beim Belichten  
seine Löslichkeit ändert

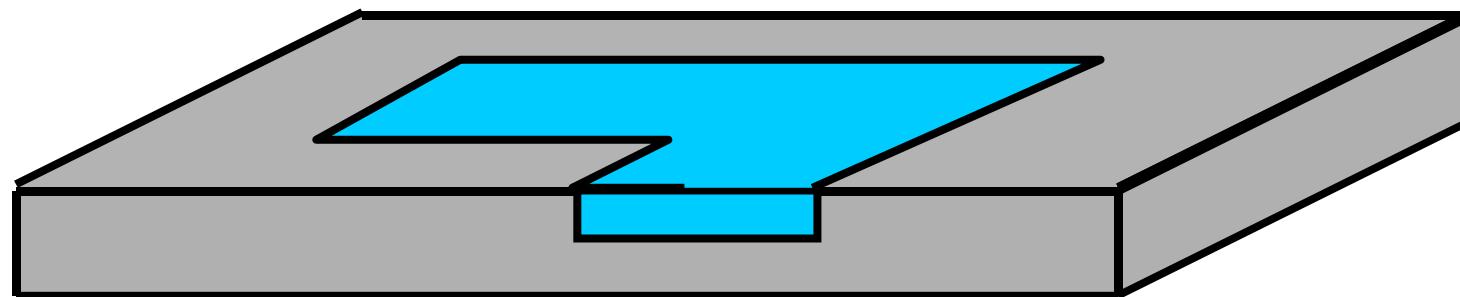
# Fotolithografie

---

**Aufgabe:**

**ein bestimmtes Gebiet (blau) dotieren mittels Implantation**

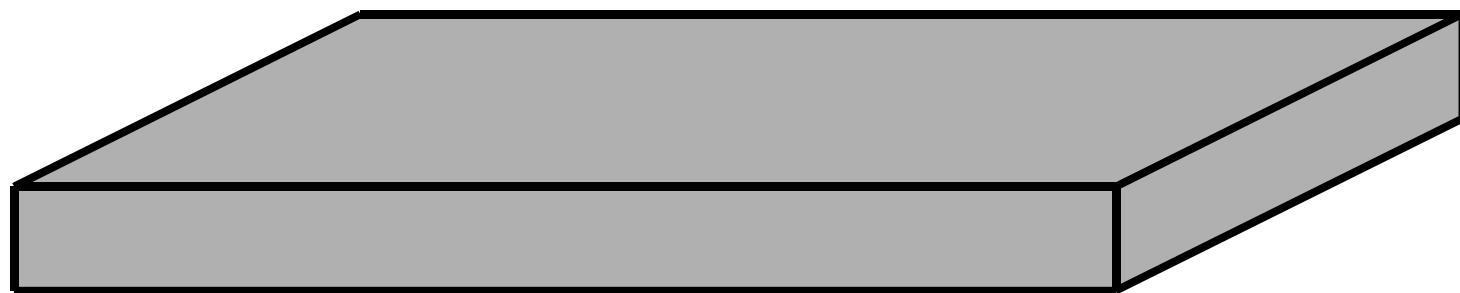
**ZIEL:**



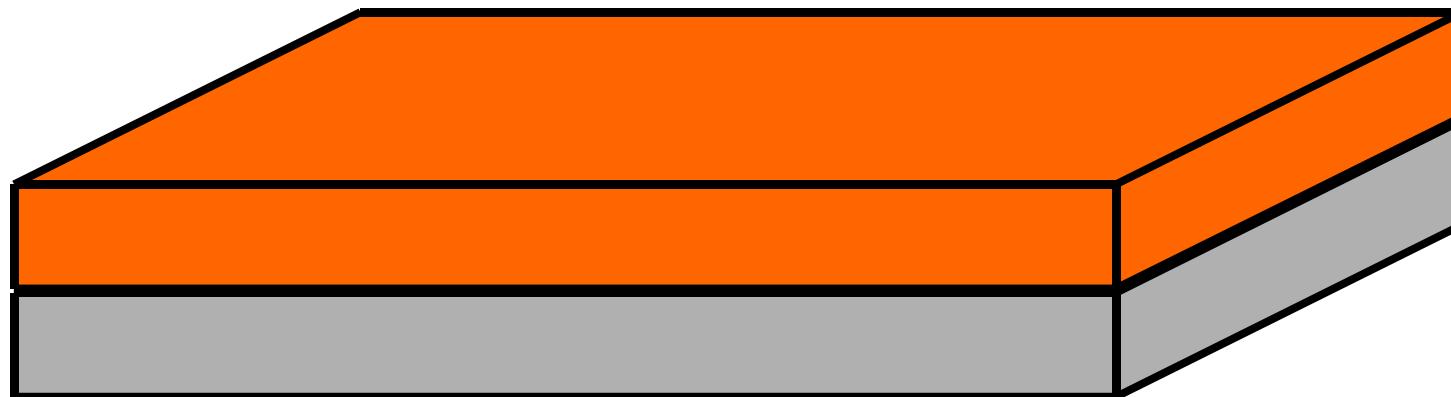
# Fotolithografie

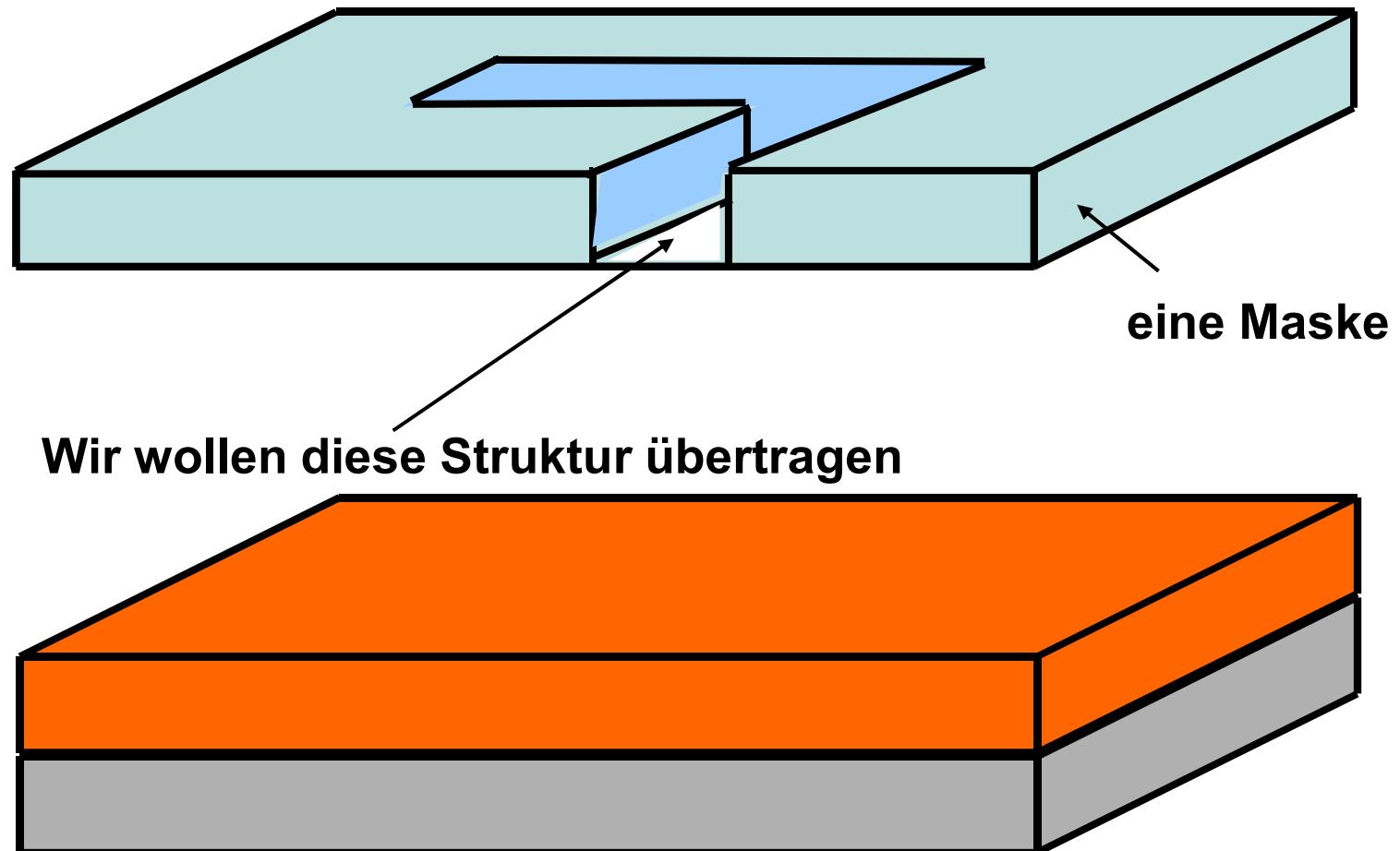
---

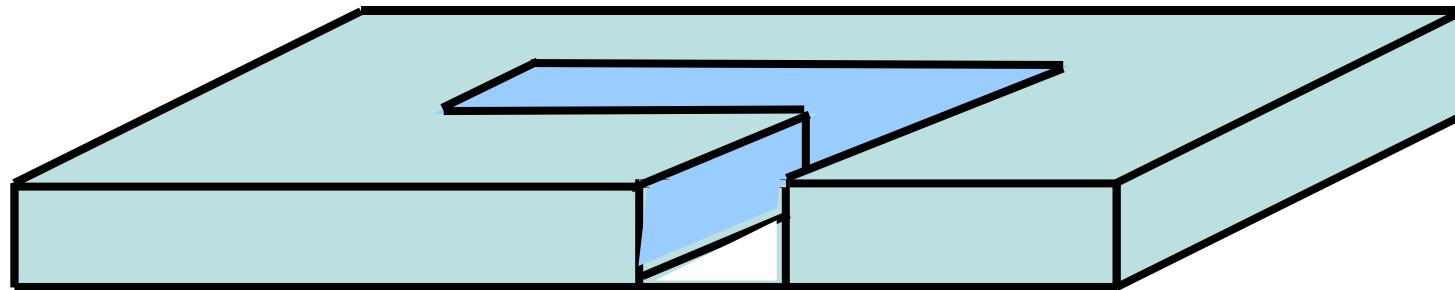
Start: ein Silizium Wafer



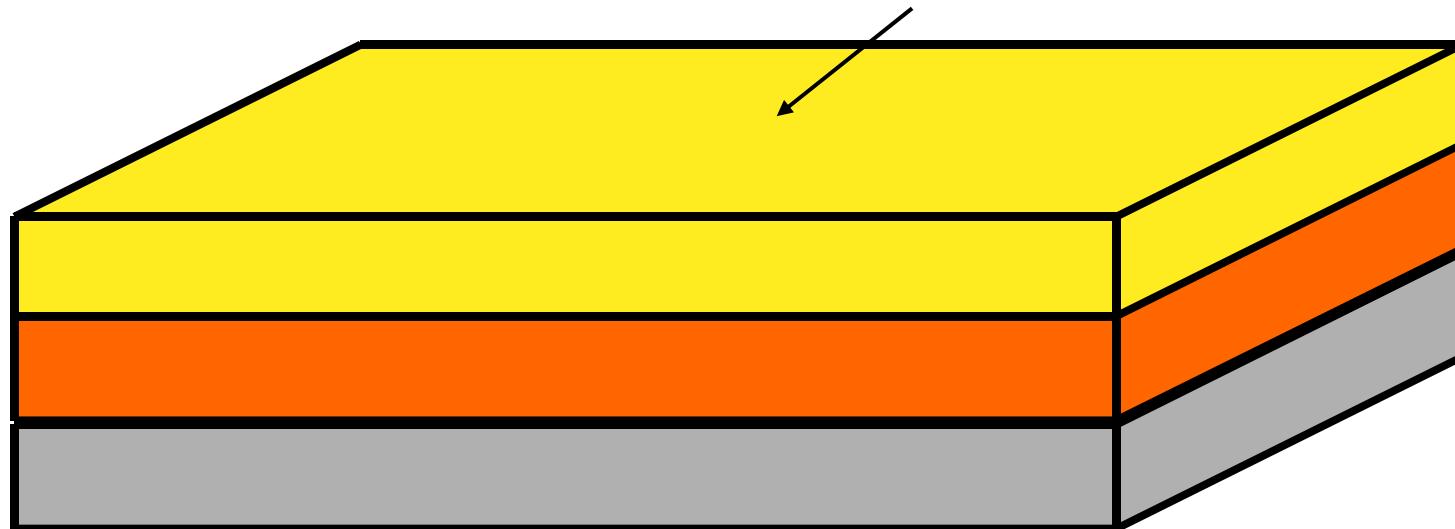
## Abscheidung von Siliziumdioxid



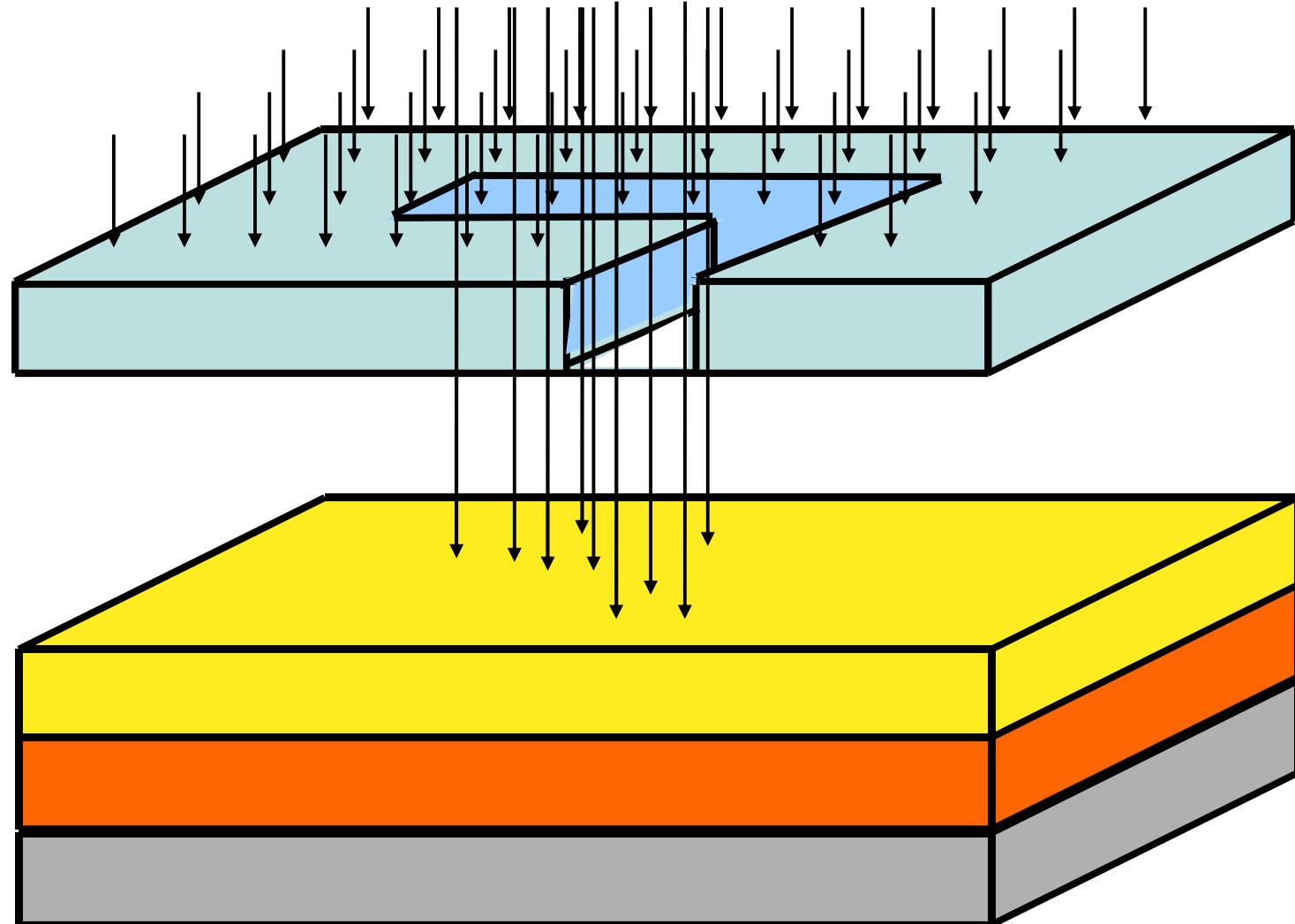




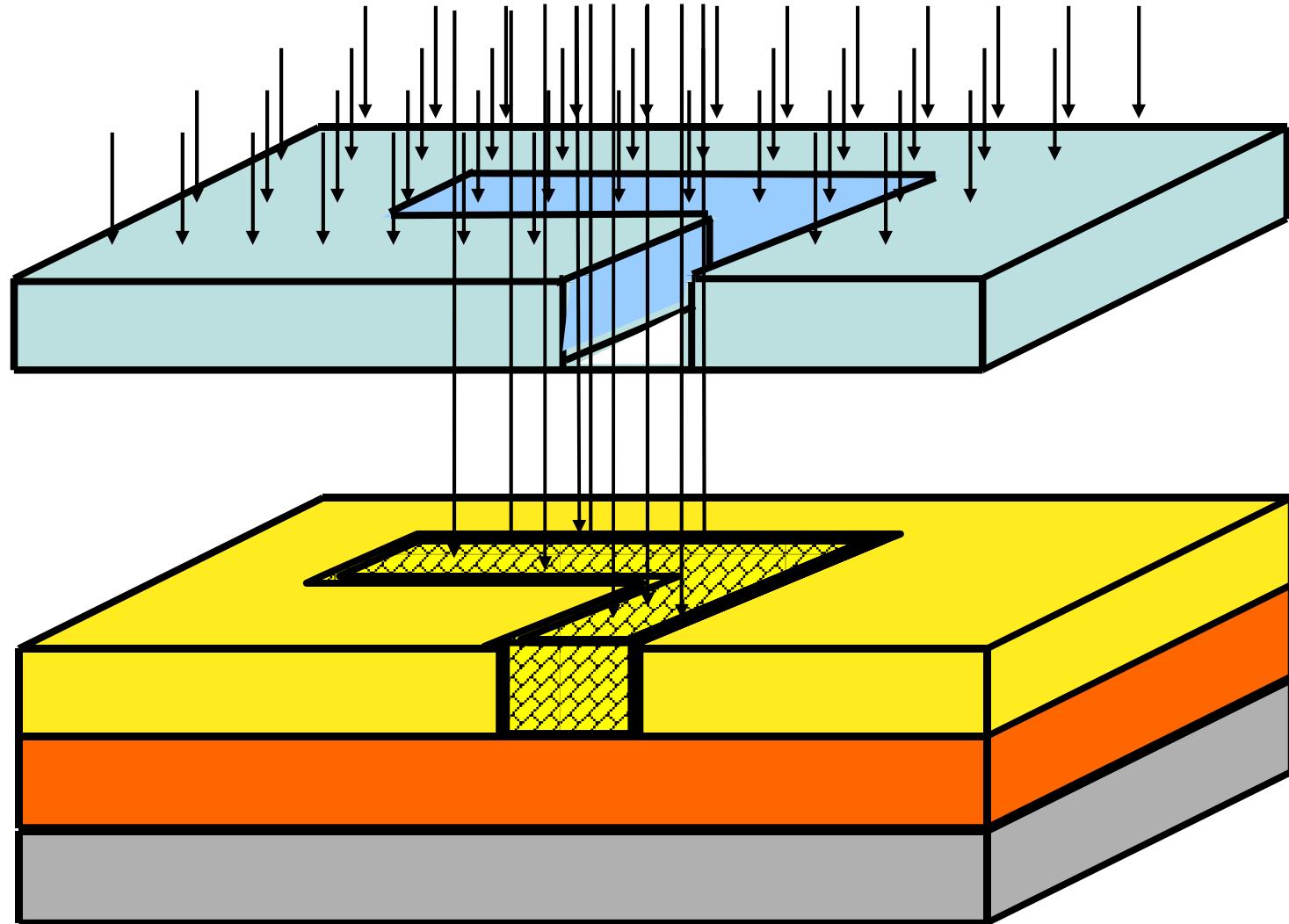
**Auftragen einer lichtempfindlichen Schicht**

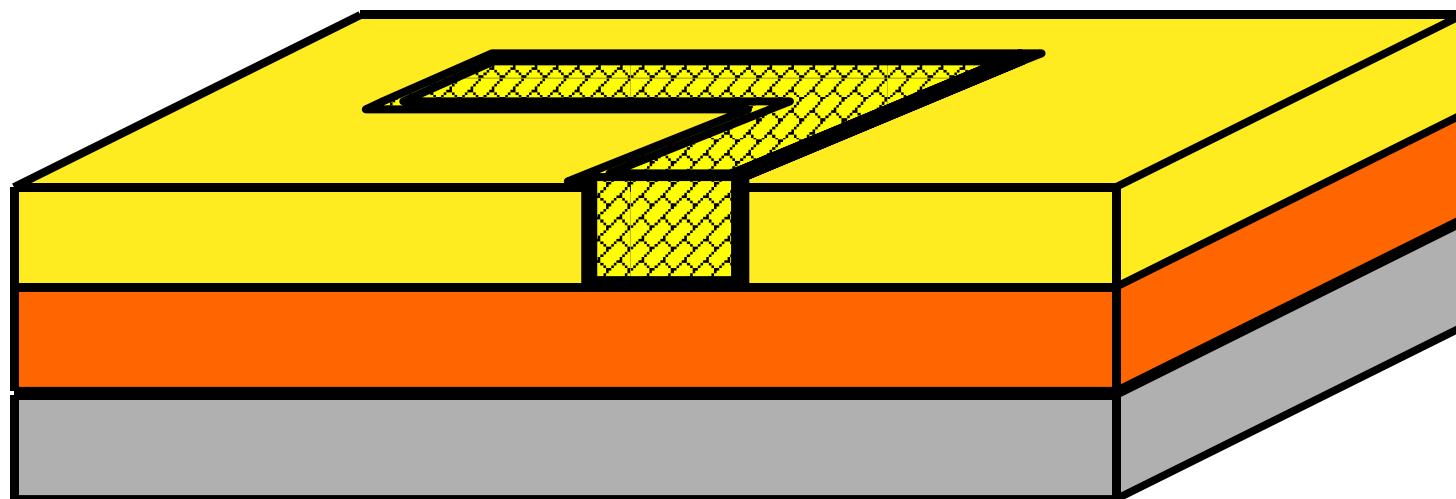


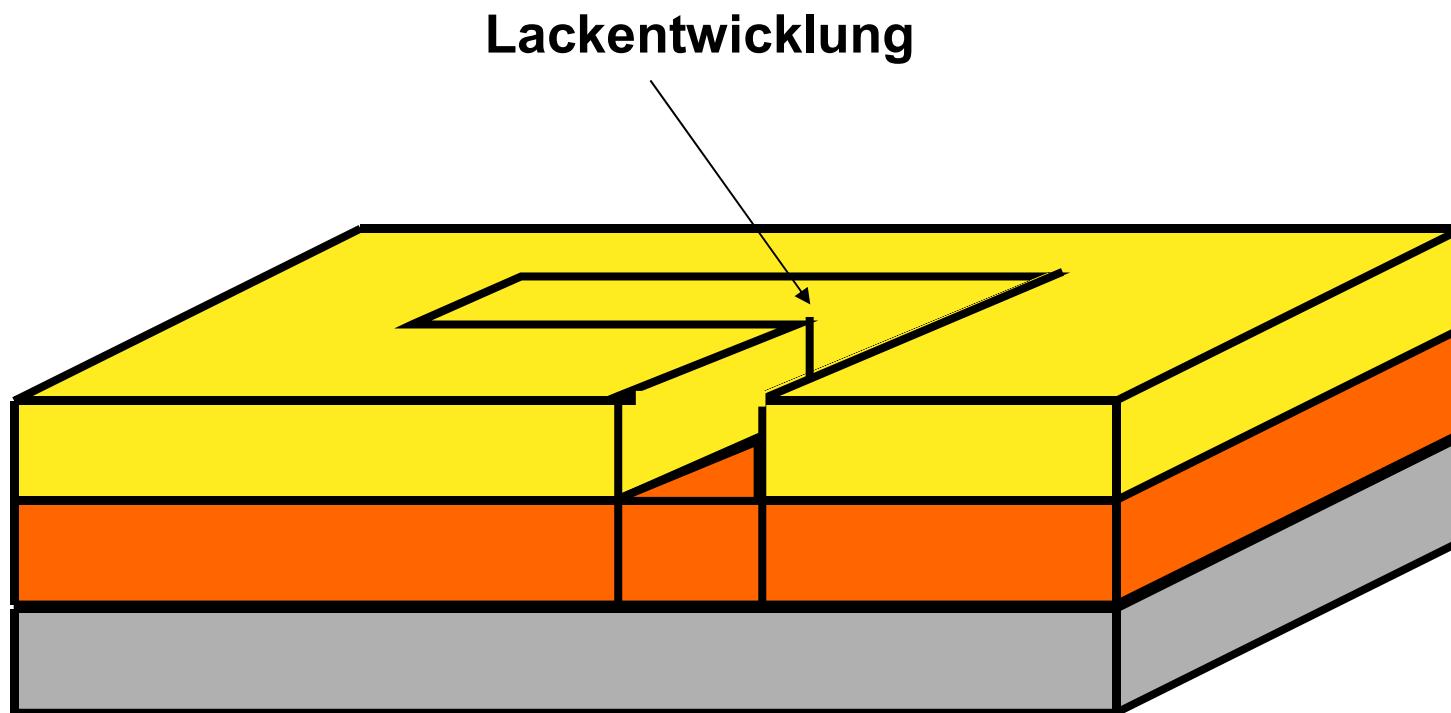
## Gleichmäßige Bestrahlung mit UV-Licht



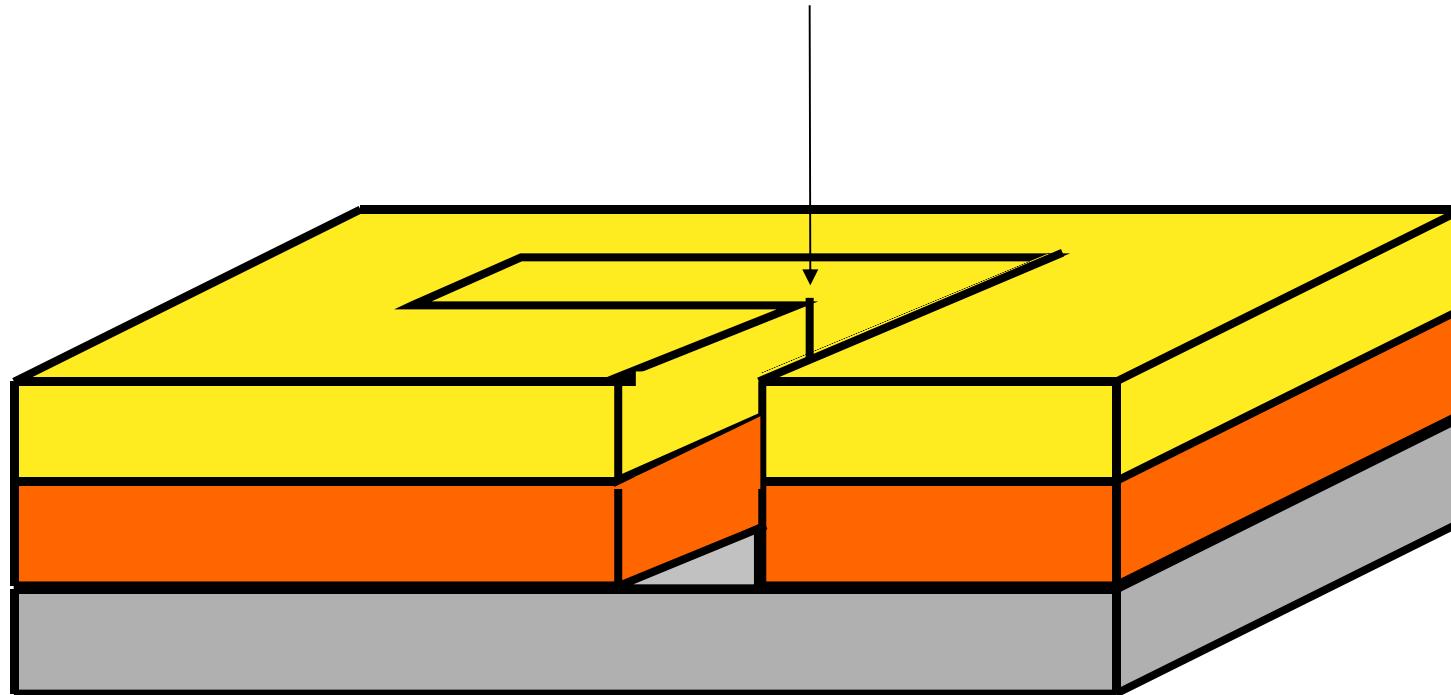
## Gleichmäßige Bestrahlung mit UV-Licht



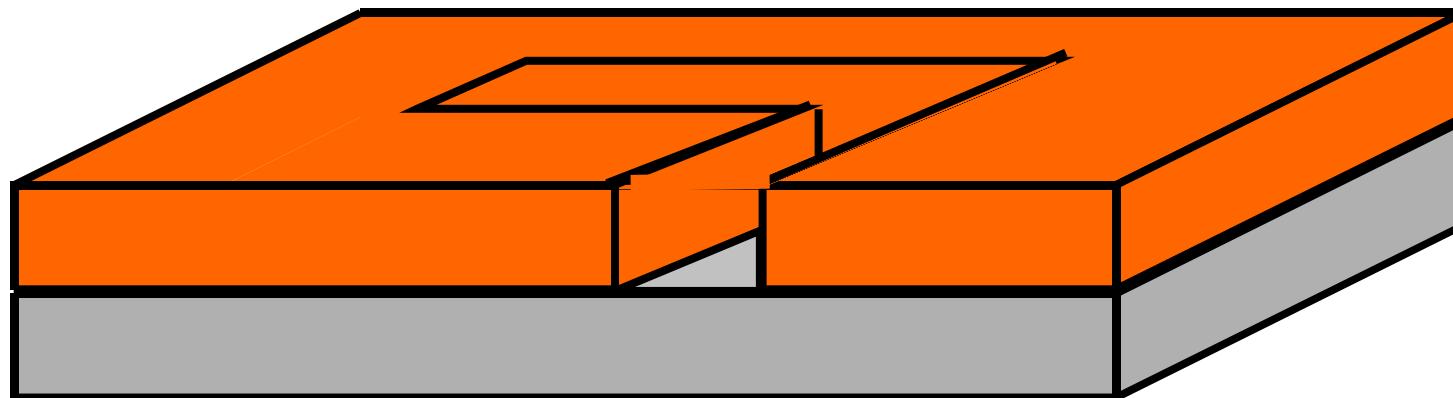




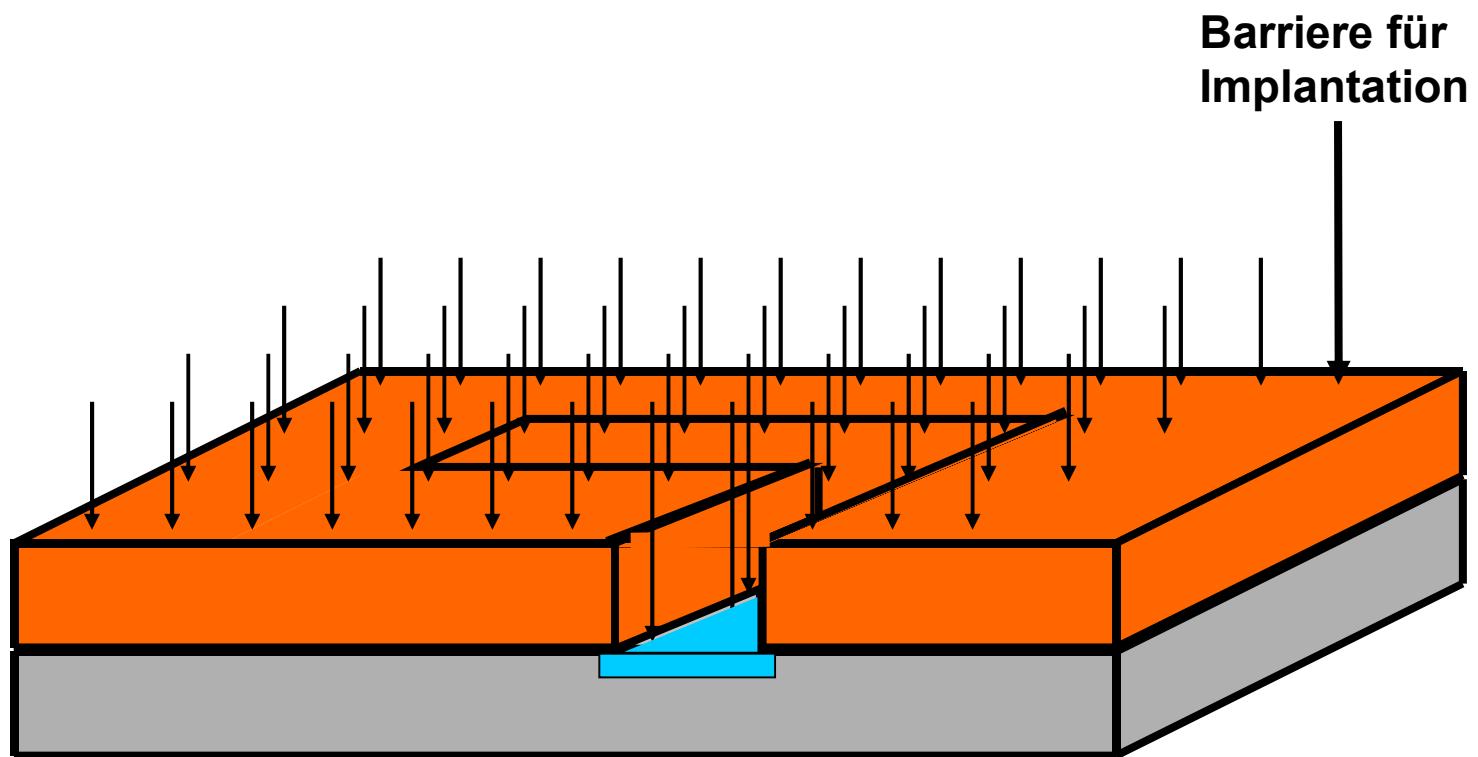
## Entfernen des Oxids (Ätzen)



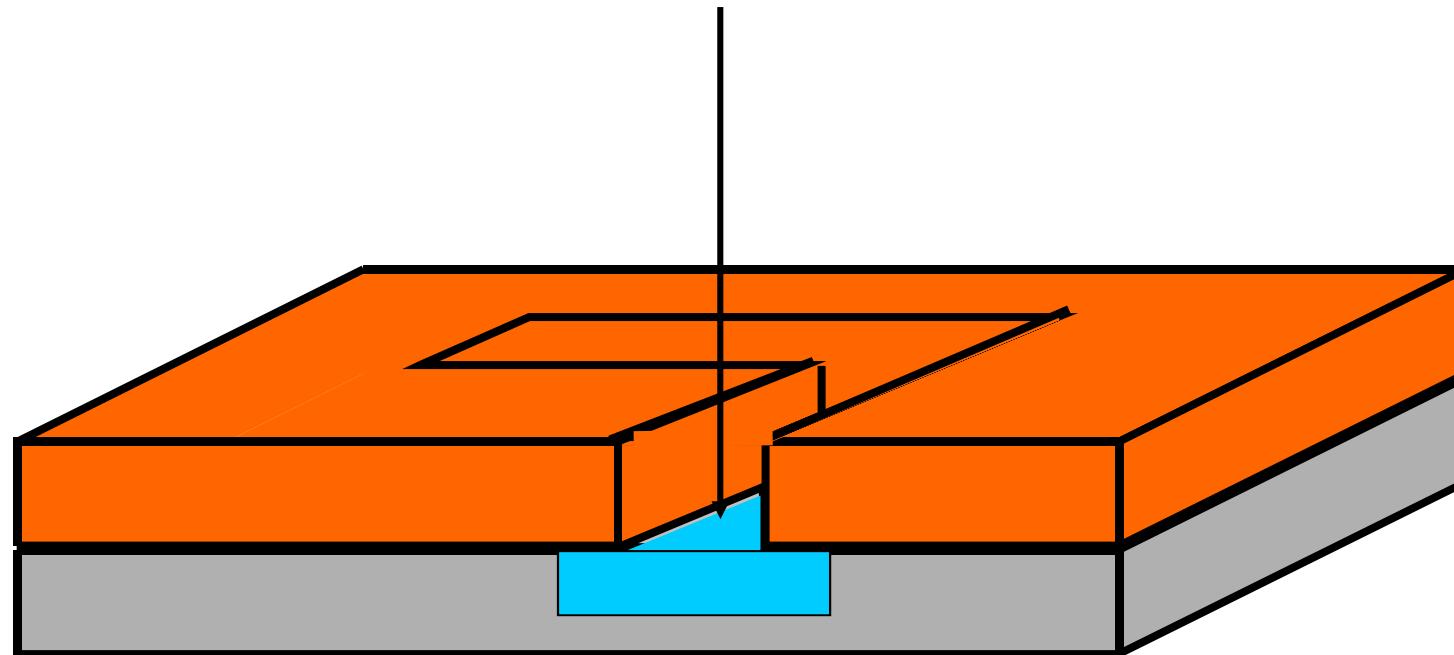
## Entfernen des Fotolacks



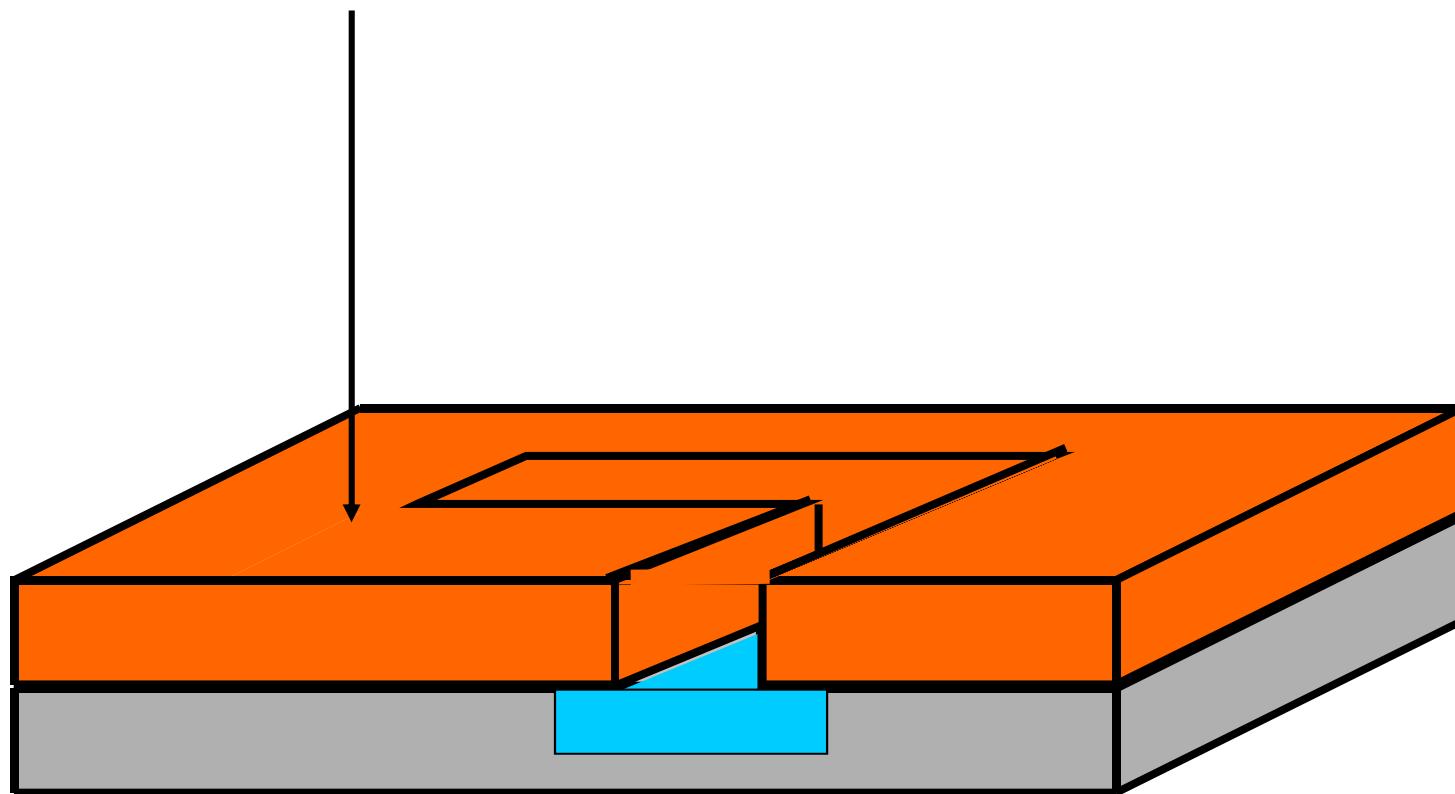
## Implantation der Dotanten



Eindiffusion/Aktivierung bei höheren Temperaturen



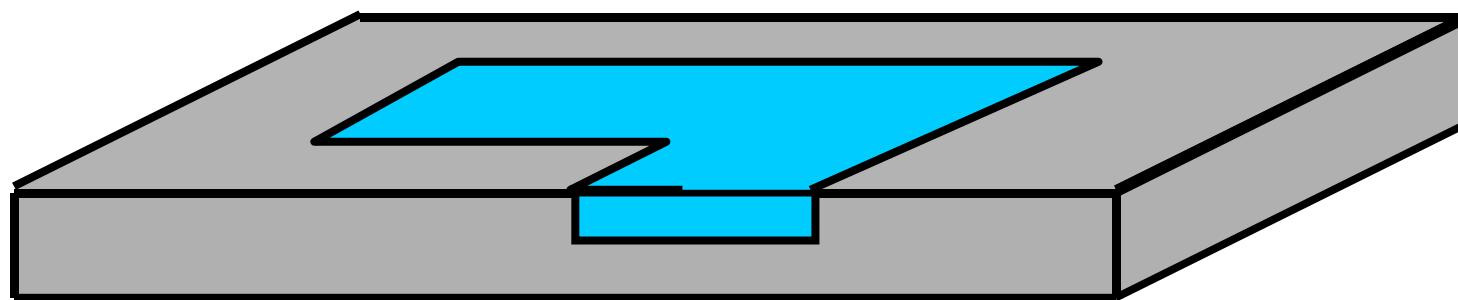
## Entfernung des Oxids



# Fotolithografie

---

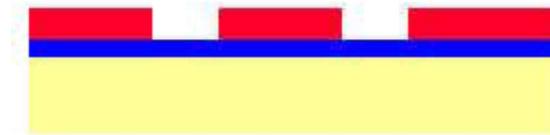
ein bestimmtes Gebiet (blau) wurde mittels Implantation  
dotiert



## Grundprozesse der Lithografie

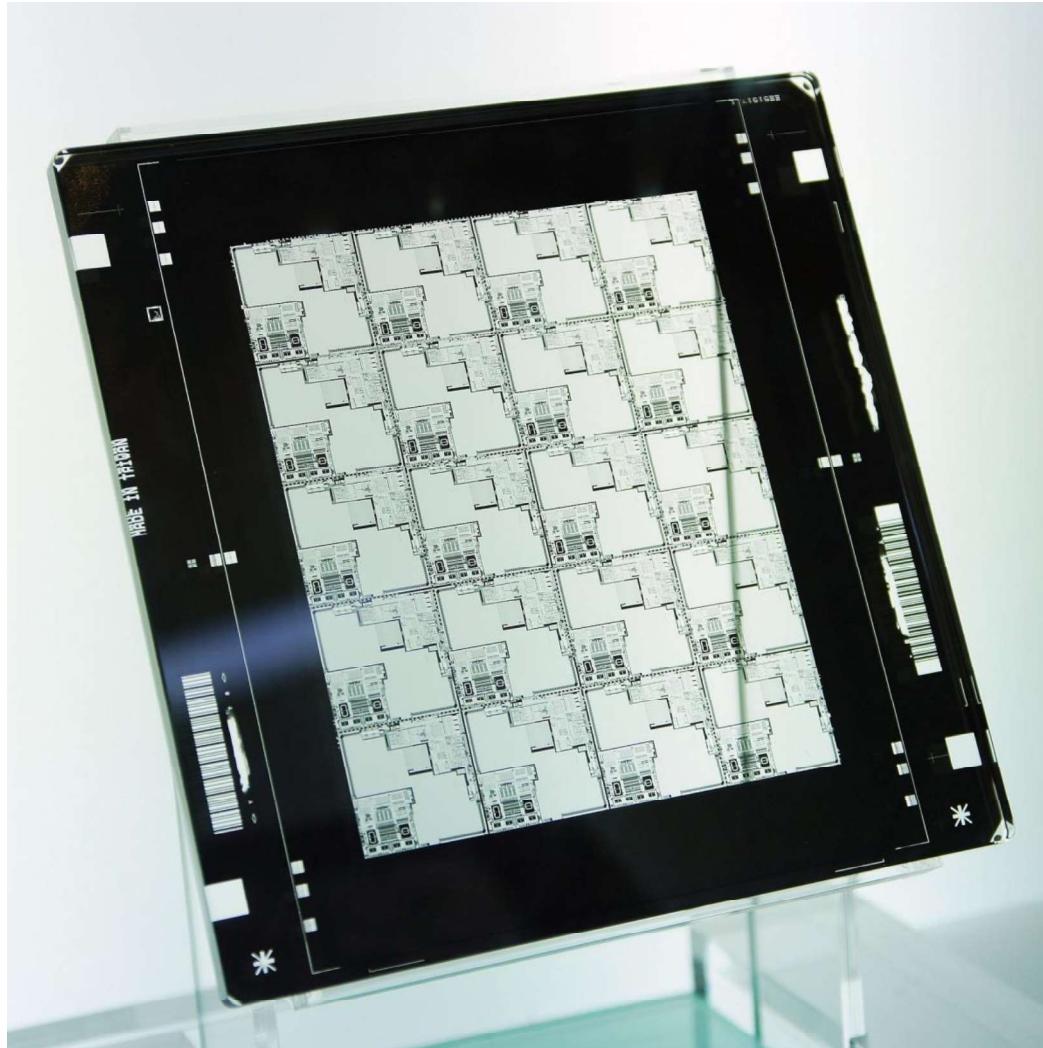
---

- Aufbringen der zu verändernden Schichten
- Aufbringen des Fotolacks
- Strukturen des Fotolacks
- Spezifische Prozessschritte, wie Implantieren, Ätzen
- Entfernen des Fotolacks



# Fotomasken

---



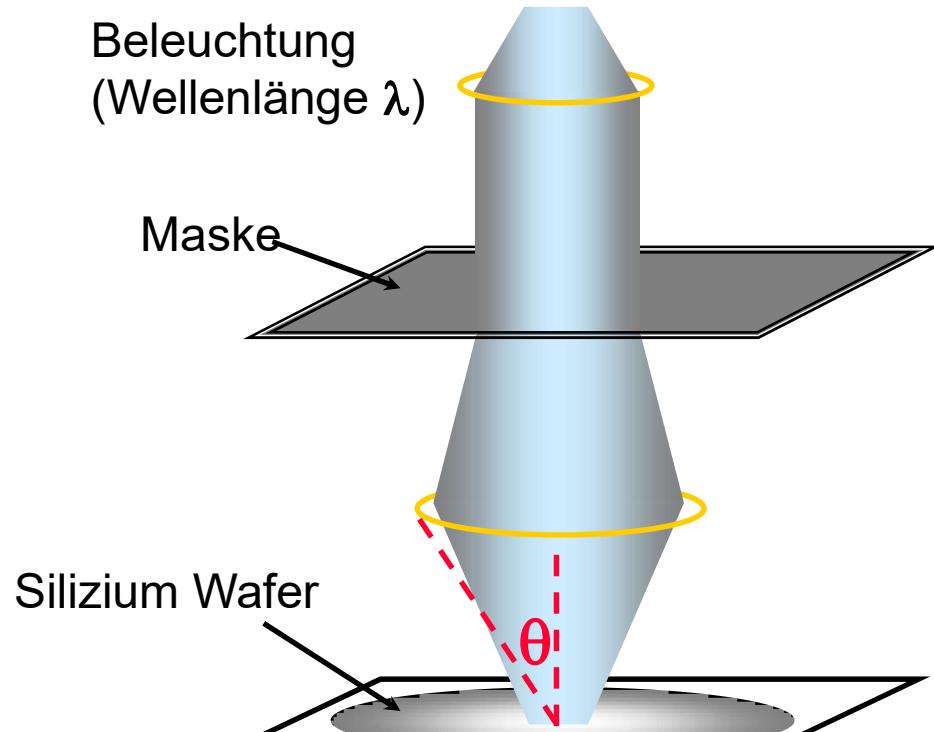
Begrenzung der  
minimalen  
Strukturgrößen:

Auflösung

$$R \propto \frac{\lambda}{NA}$$

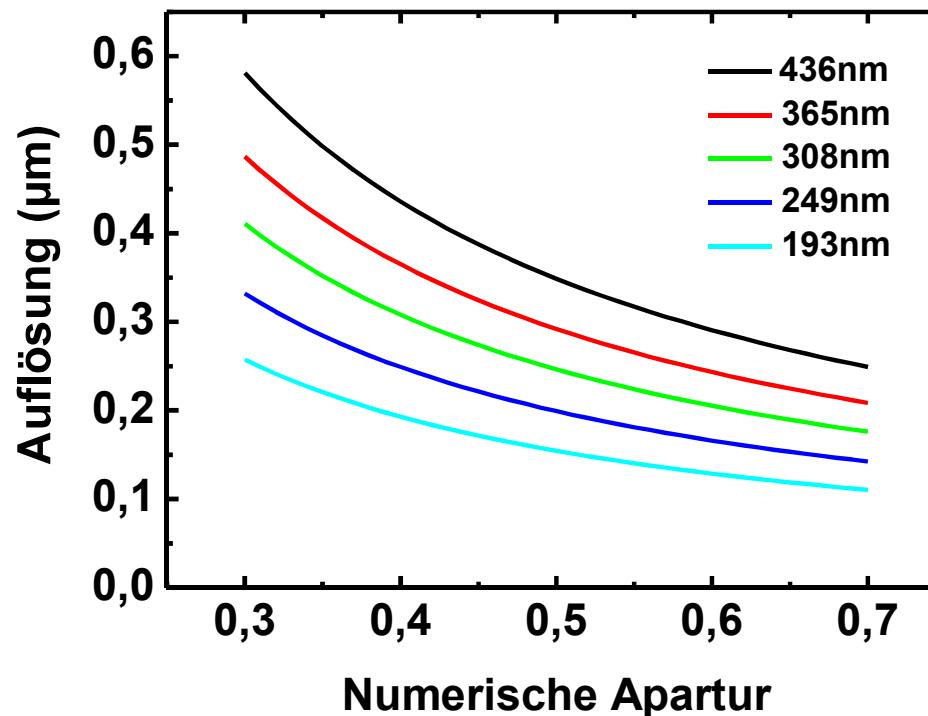
Fokustiefe

$$DOF \propto \frac{\lambda}{NA^2}$$



$$\text{Numerische Apertur: } NA = \sin(\theta)$$

## Auflösungsvermögen

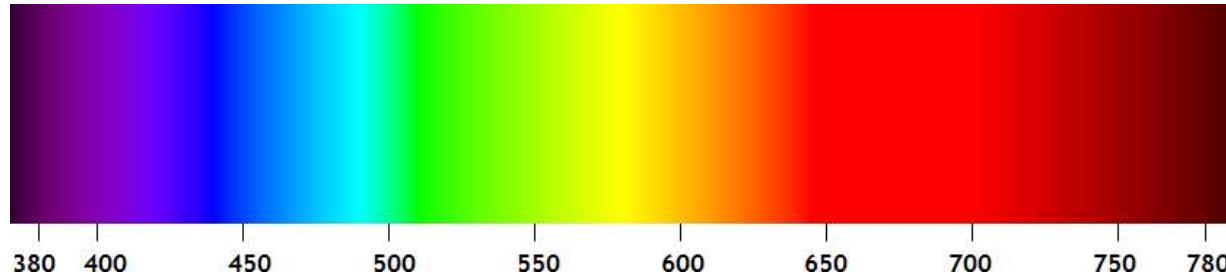


$$R \propto \frac{\lambda}{NA}$$

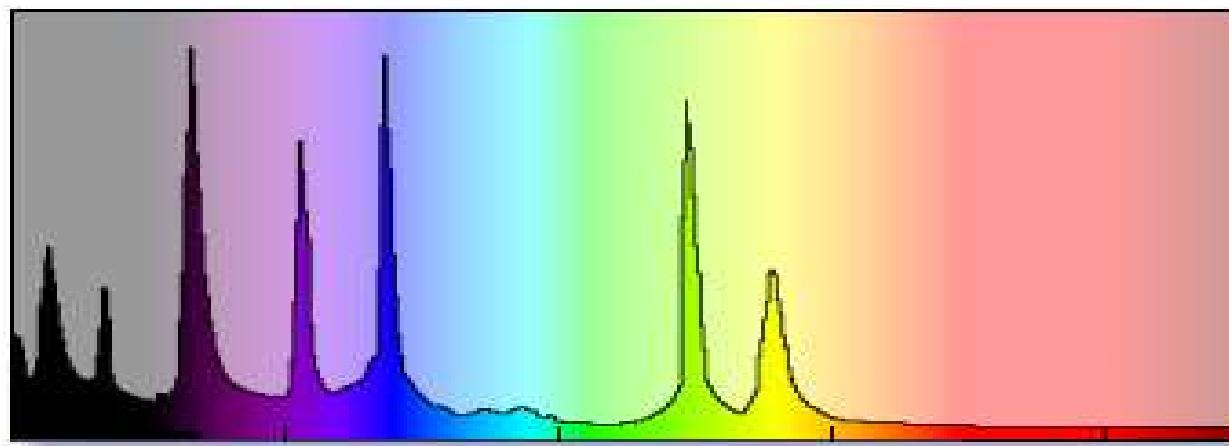
→ Auflösung unterhalb der Wellenlänge ist möglich

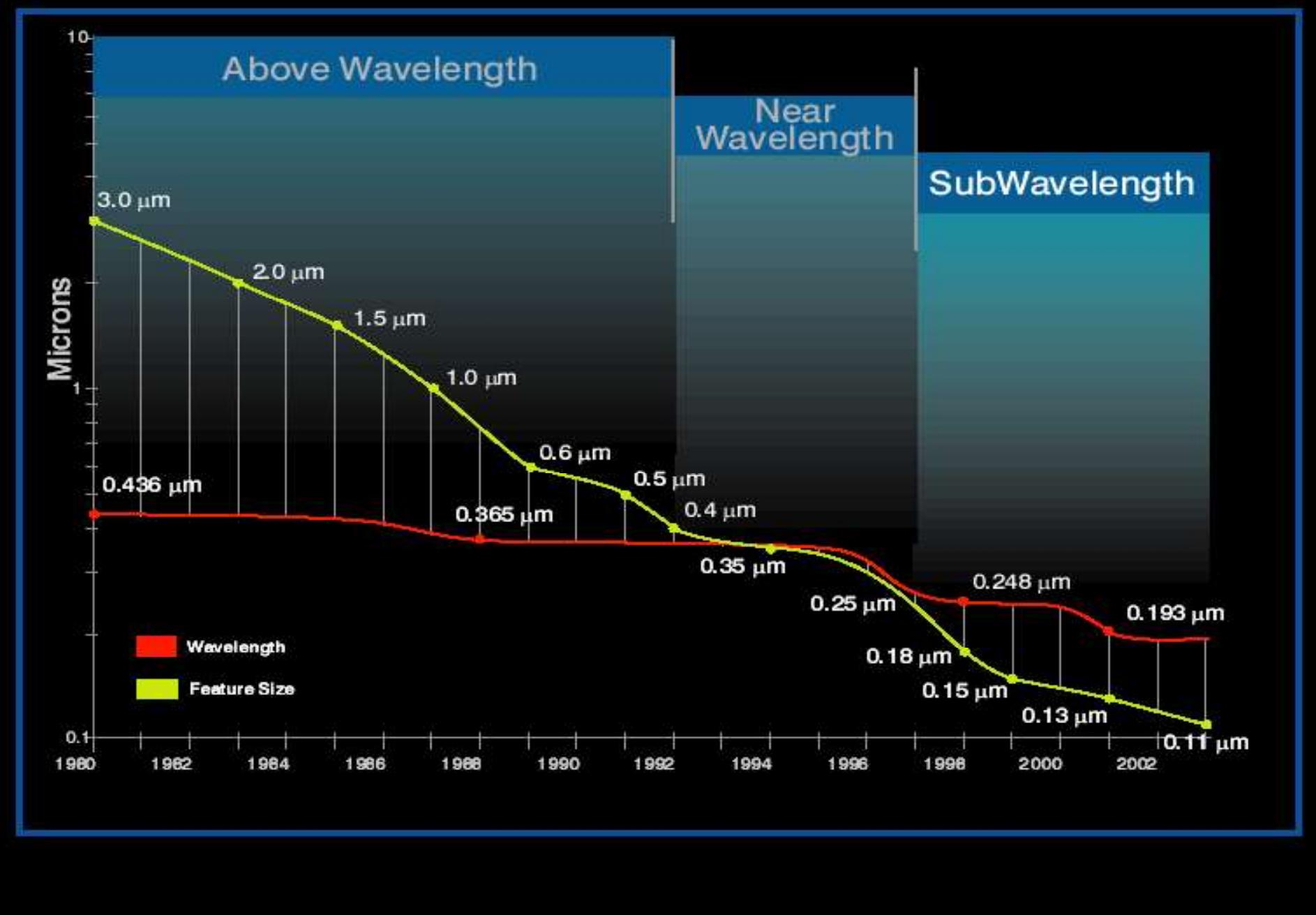
## Lichtquellen: sichtbares Licht

---



Quecksilberdampflampe

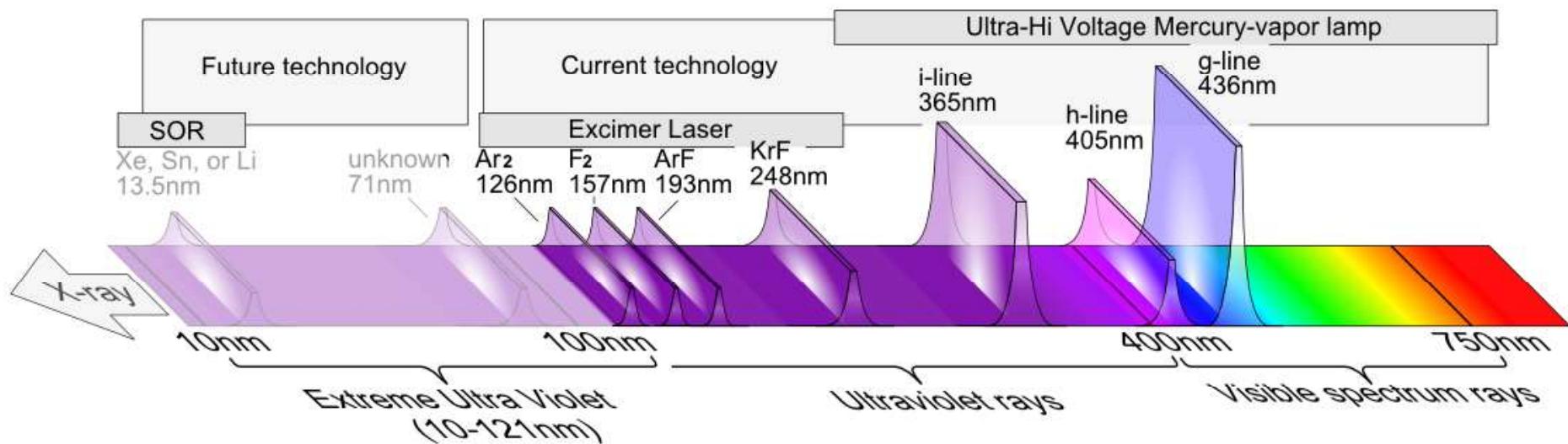




### Excimer Laser für tiefes UV-Licht

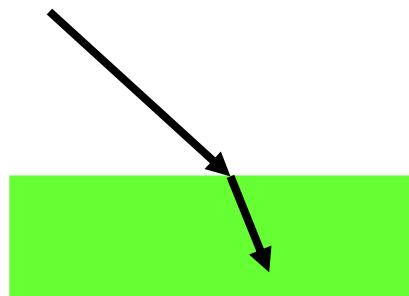
- XeF Laser 351 nm
- XeCl Laser 308 nm
- KrF Laser 248 nm
- ArF Laser 193 nm
- F<sub>2</sub> Laser 157 nm

# Lithografie-Entwicklung (Lichtquellen)



Im Inneren eines Festkörpers breitet sich eine elektromagnetische Welle infolge der Polarisation der Elektronen mit kleinerer Geschwindigkeit aus als im Vakuum.

→ Die Welle wird an der Grenzfläche gebrochen:



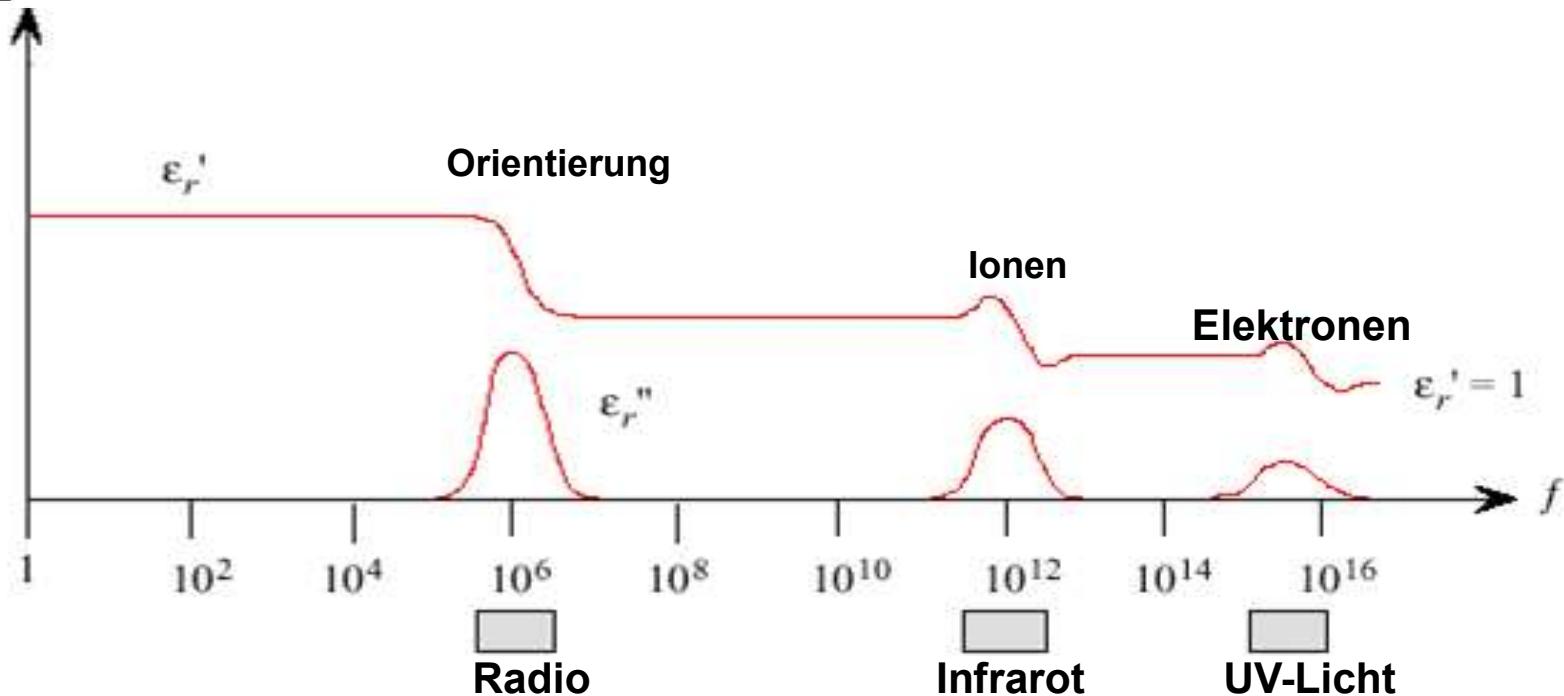
$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r}$$

**Clausius-Mossotti-Gleichung**

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{\alpha_{electron} \cdot N}{3\epsilon_0}$$

## Frequenzabhängigkeit der Polarisation



Für tiefes UV-Licht beträgt  $\epsilon \sim 1$ ; → Brechzahl  $\sim 1$

→ Es gibt keine geeigneten Linsensysteme

→ Fokussierung nur über Reflektionsverfahren

---

# Strukturerzeugung (Ätzen)

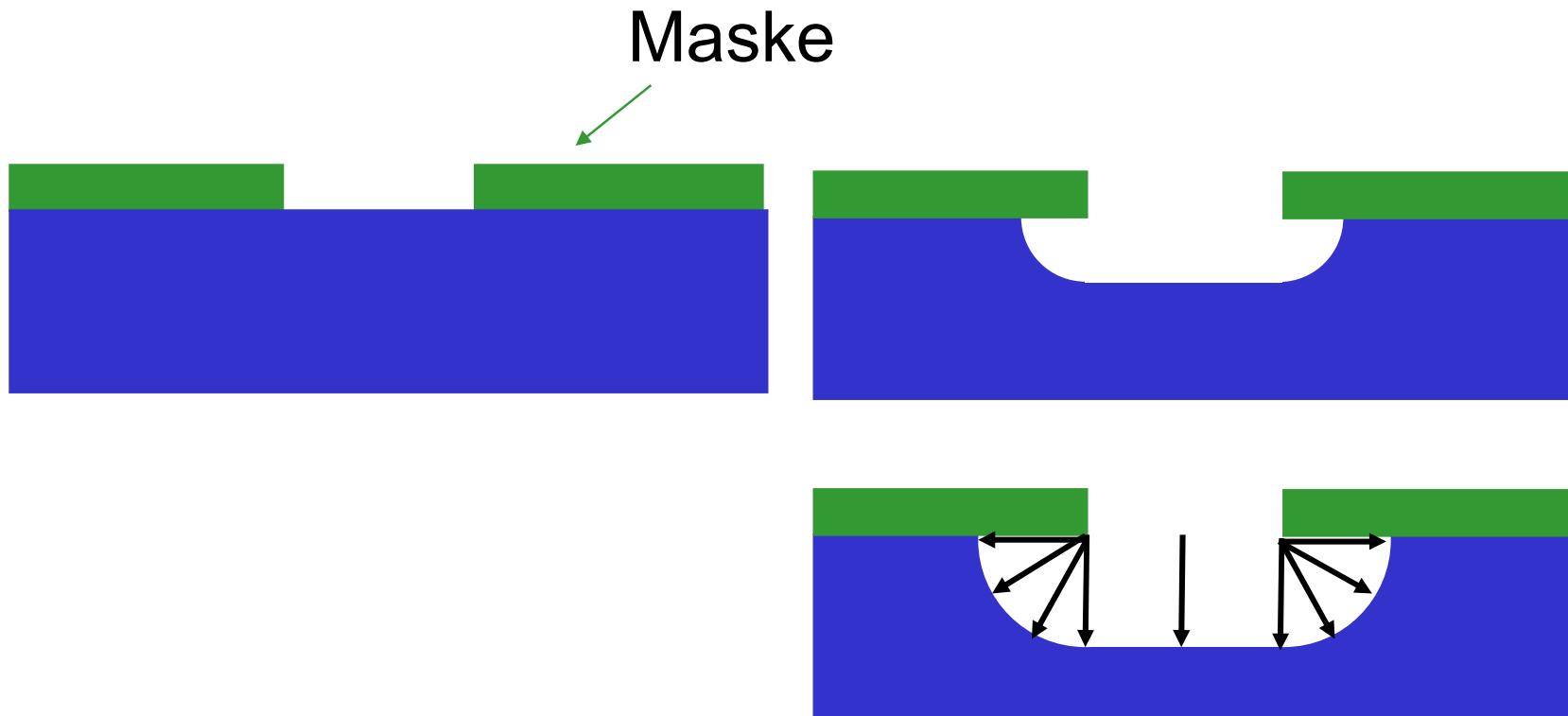
## Nassätzen: Definitionen

---

- **Ätzrate**  
abgetragene Schichtdicke pro Zeiteinheit  $\ddot{A}$  (nm/min)
- **Selektivität**  
Verhältnis der Ätzraten verschiedener Schichten zueinander
- **Ätzstop**  
Ätzrate für Substanz 2 ist extrem klein gegenüber 1:  $\ddot{A}_1 \gg \ddot{A}_2$   
Beispiel: verdünnte Flusssäure ätzt  $\text{SiO}_2$  und stoppt auf Si
- **Anisotropie**  
Verhältnis vertikaler zu horizontaler Ätzrate
- **nasschemische Prozesse sind in der Regel isotrop**  
**→ ätzen in jede Richtung gleich schnell**

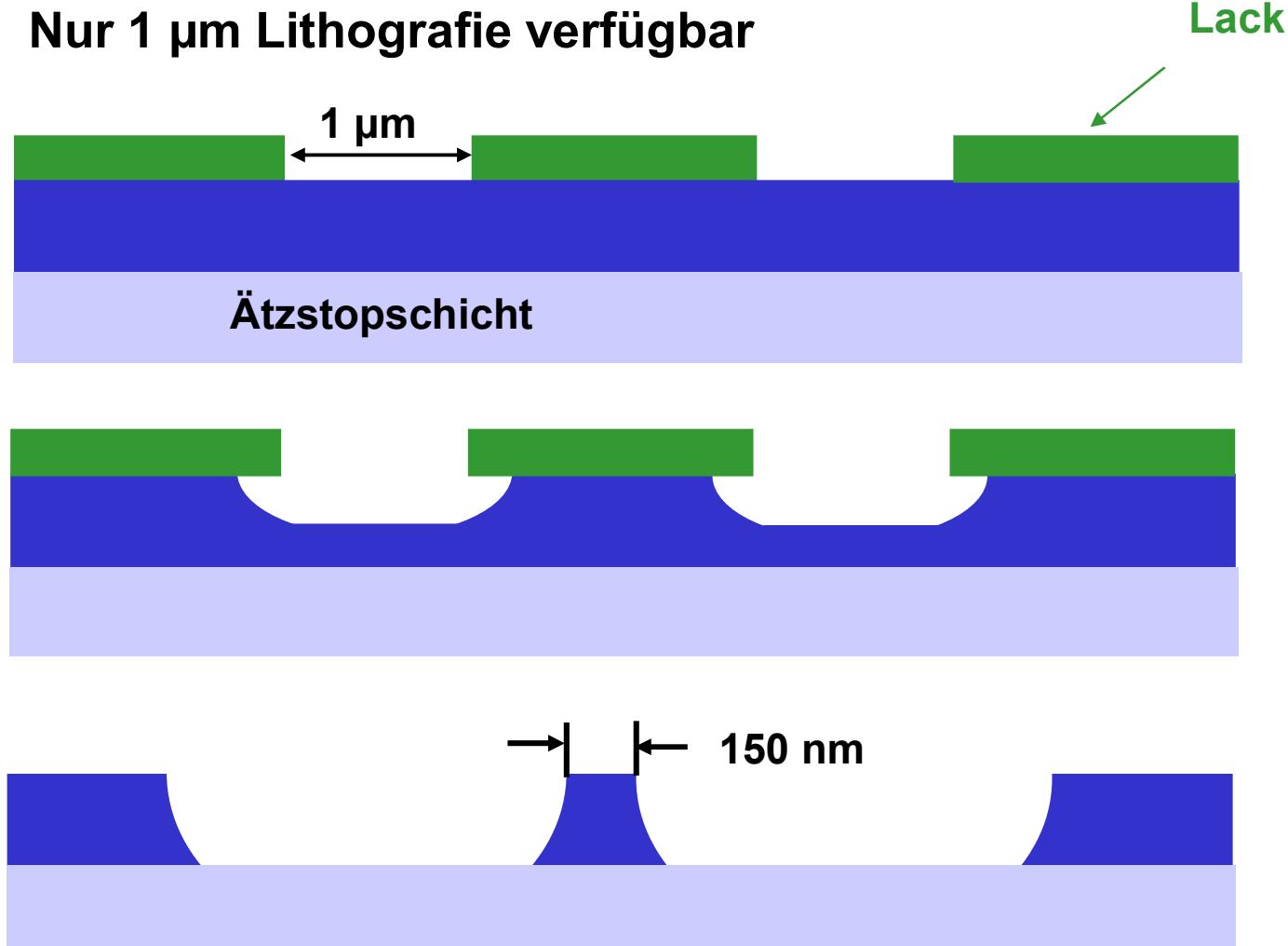
## Isotropes Ätzen (Nasschemie)

→ Ätzrate ist in jeder Richtung gleich



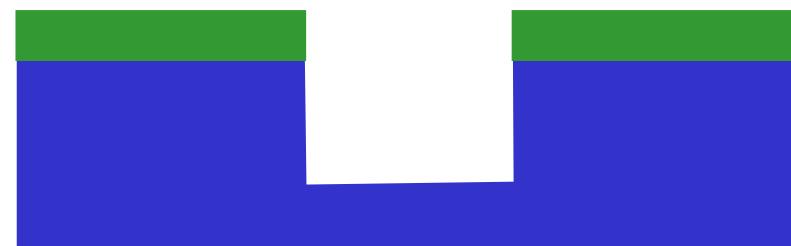
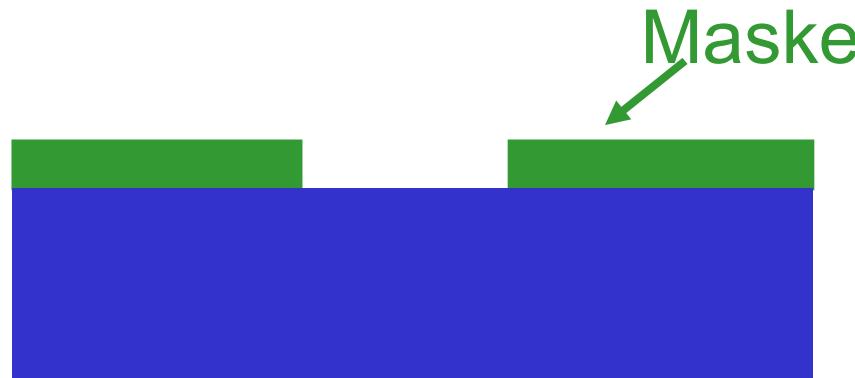
## Isotropes Ätzen: Ausnutzen der Unterätzung

Nur 1 µm Lithografie verfügbar

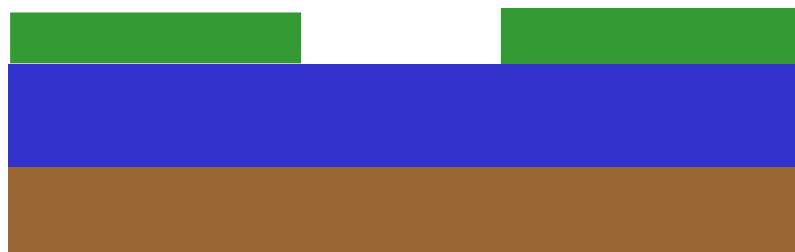


## Anisotropes Ätzen

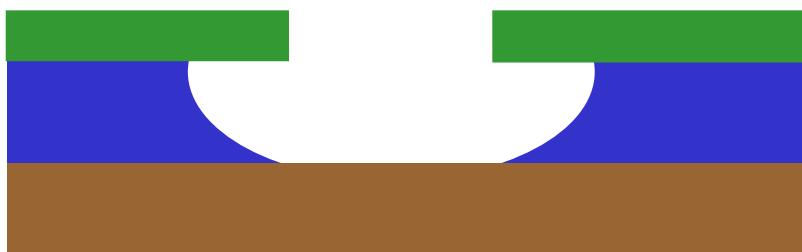
→ Eine ausgezeichnete Ätzrichtung  
(z.B. Reaktives Ionenätzen – RIE)



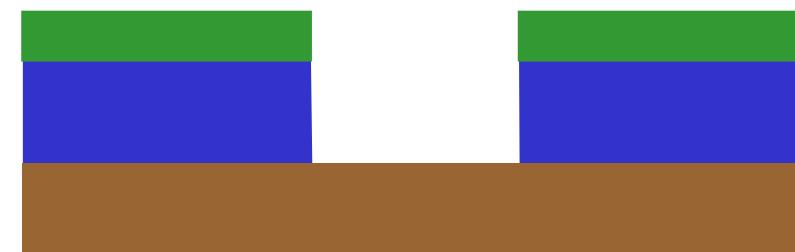
Maske



Isotrop

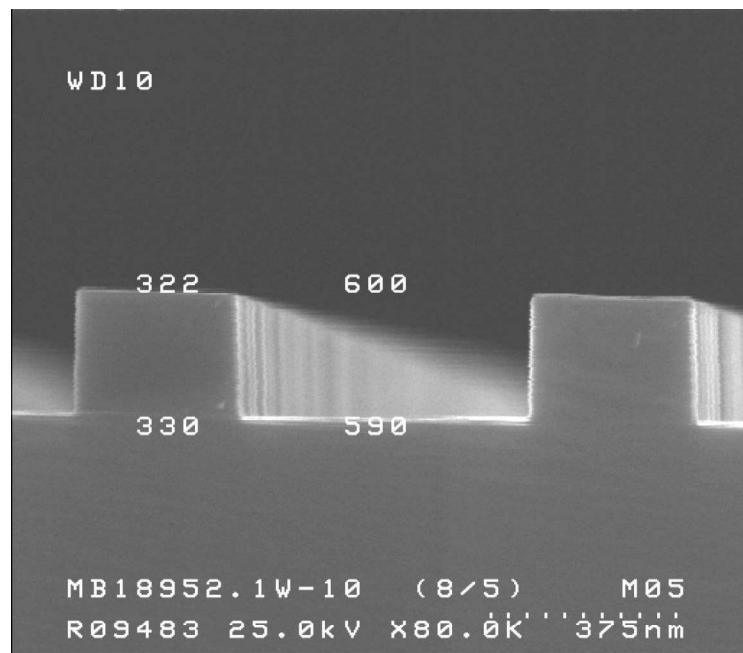


Anisotrop



## Ätzprofile

### Anisotrop



### Isotrop

