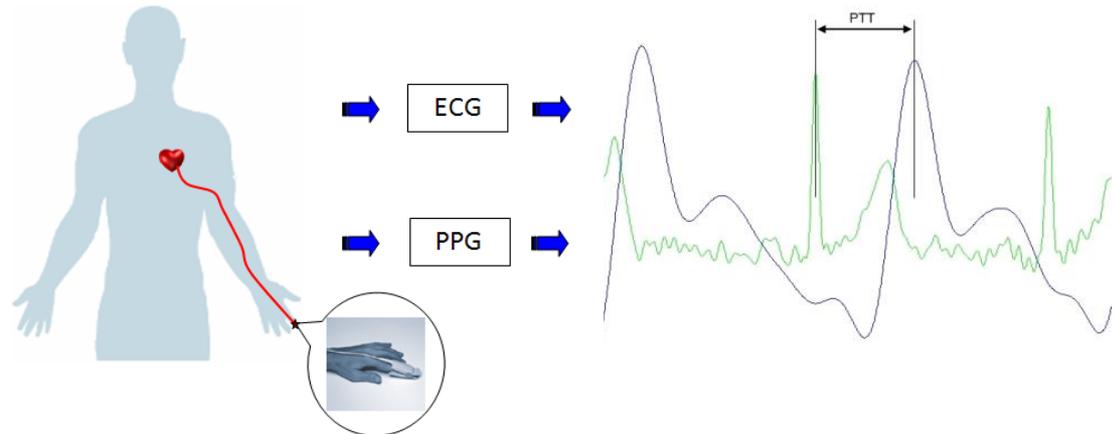


Vorlesung Mikrosystemtechnik Teil 3: Waferherstellung

Stefan Hey

Institut für Technik der Informationsverarbeitung



Gliederung

- Grundlagen
- Waferherstellung

ÜBERBLICK ÜBER MIKROSYSTEME

Historie

- Beginn 80er : Nutzung der Mikrostrukturtechnik zur Herstellung von:
 - Mikromechanischen Elementen auf Si
 - Mikrooptischen Elementen auf SiO₂ , Glas und PMMA
 - Integrierte optoelektronische Schaltkreise

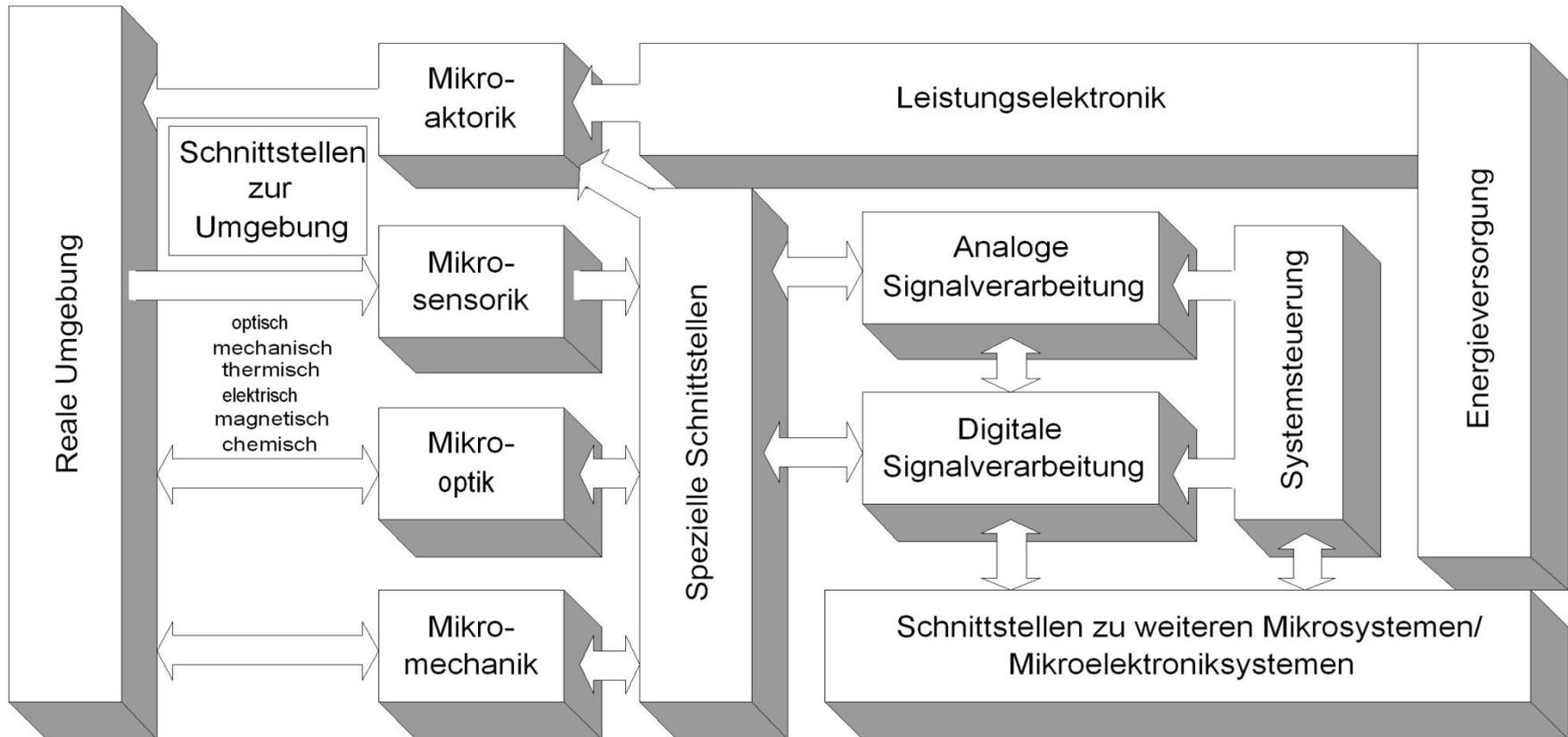
- Nach ersten Erfolgen in der Herstellung von Komponenten wurde die Vision der Mikrosystemtechnik Ende der 80 Jahre entwickelt.

- Ende der 80er: Weltweit werden Forschungsprogramme eingerichtet

- Deutschland:
 - BMFT: Mikrosystemtechnik I 90-94 DM 400 Mio
 - BMFT: Mikrosystemtechnik II 94-99 DM 350 Mio
 - BMBF: Mikrosystemtechnik 2000+ € 200 Mio.
 - BMFT (Karlsruhe): Mikrosystem Projekt beim FZK € 30 Mio./Jahr

- **Mikrosystemtechnik** ist die Erweiterung der **Mikroelektronik** um mechanische, optische, chemische und biologische Funktionen zusätzlich zur Informationsverarbeitung (Elektronik).
- Die dabei eingesetzten Mikrotechnologien beruhen auf den überaus erfolgreichen Prinzipien der Mikroelektronik:
 - **Miniaturisierung:** Gewicht, Raum-, Ressourcen- und Energiebedarf sind extrem reduziert: mehr Funktion auf immer kleinerem Raum
 - **Batchprozessierung:** Herstellung vieler gleicher Strukturen parallel anstatt sequentiell: mehr Funktion zu immer niedrigeren Kosten

Allgemeiner Aufbau eines Mikrosystems



- Sensoren
- Aktoren
- Daten- und Signalverarbeitung
- Schnittstellen

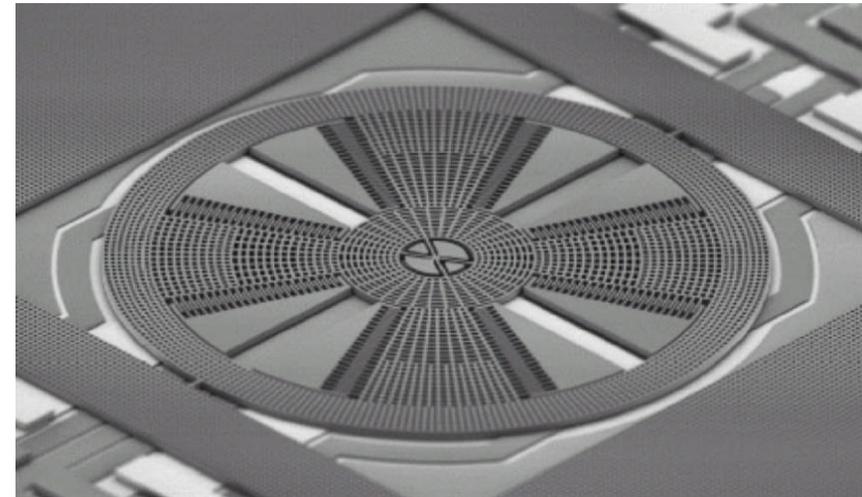
Allgemeiner Aufbau eines Mikrosystems

■ Sensoren

- Umwandeln physikalischer Größen (z.B. Kraft, Temperatur, Druck, Beschleunigung,...) in elektrische / optische Signale
- Problem: Querempfindlichkeiten (z.B. Temperatur)
- Lösung: intelligente Sensorsysteme, Signalverarbeitung vor Ort, Filterung von Störgrößen

■ Aktoren

- Umwandlung elektrischer Signale in physikalische Größen (z.B. Kraft, Drehmoment, Längenänderung,...)
- Prinzipien:
 - Elektrostatik
 - Elektromagnetik
 - Piezoelektrik
 - ...

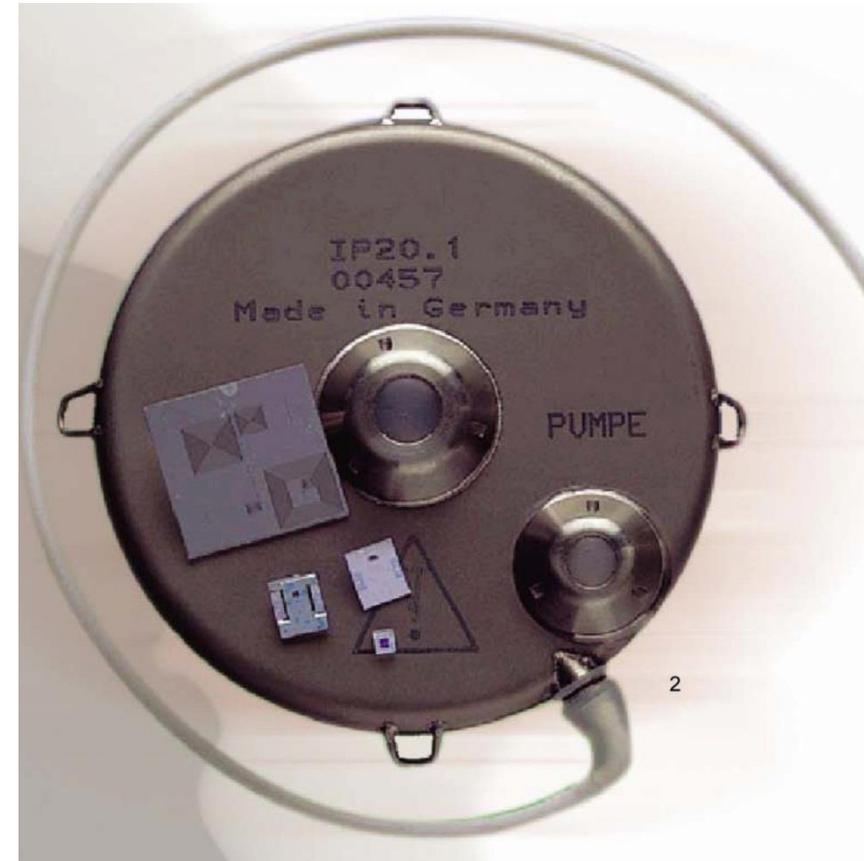


ESP Drehratensensor aus Silizium (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Allgemeiner Aufbau eines Mikrosystems

- Signal- und Datenverarbeitung
 - Verarbeitung der Sensordaten
 - Schnittstellen ansprechen
 - Ansteuerung der Aktoren
 - Durchführen von Selbsttestroutinen
 - Statistische Bewertung von Daten
 - Echtzeitfähigkeit durch Signalvorverarbeitung in Sensoren

- Schnittstellen
 - Transport von „Information“ ...
 - ...zur Umwelt
 - ...zu anderen Mikrosystemen
 - ...zwischen den Komponenten
 - ...zum Benutzer



Mikropumpen zur hochgenauen Abgabe von Flüssigkeiten
 (Quelle: tricumed Medizintechnik GmbH)

Fertigungstechniken

Monolithisch Integrierte

- Alle Funktionen auf einem Substrat (Si) durch Halbleitertechnologie realisiert
- Große Stückzahlen
- Maximale Integrationsdichte
- Hohe Zuverlässigkeit
- Fertigung durch große Halbleiterhersteller

Hybrid-Integrierte

- Komponenten separat mit unterschiedlicher Technologie hergestellt und anschließend auf Substrat platziert und elektrisch bzw. mechanisch montiert
- Kleine Stückzahlen herstellbar
- Geringe Integrationsdichte
- Auch von kleineren Unternehmen (KMU, SME) realisierbar

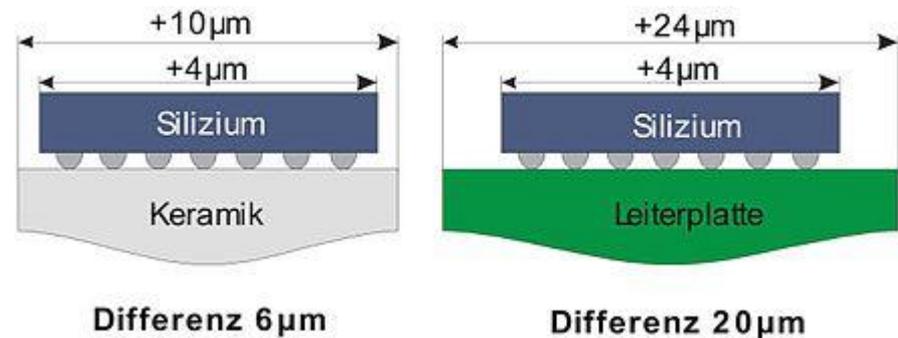
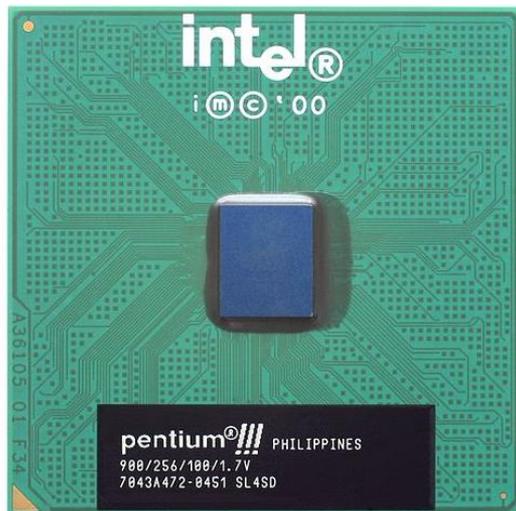
Aufbau und Verbindungstechnik

Probleme

- Verschiedene Eigenschaften der
 - Komponenten
 - Materialien
 - Fügeverfahren

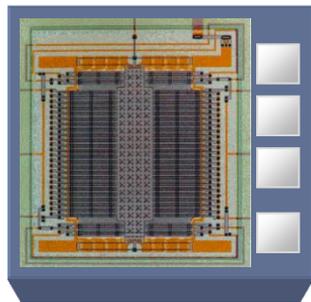
Lösung

- Montage der einzelnen Komponenten auf einem Motherboard
- Verbindung der einzelnen Komponenten durch Flip-Chip-Technik
- Verbindung mit der Außenwelt durch TAB-Technik

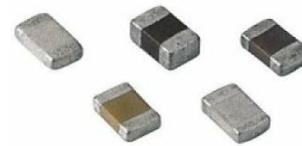


Technischer Aufbau von Mikrosystemen

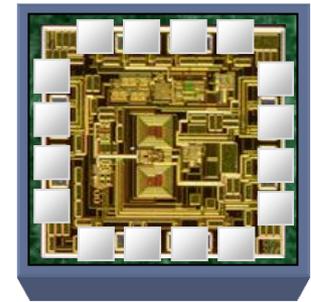
- Sensorchip: Wandlung der zu detektierenden Größe in eine elektrische Größe (C, I, U, R)
- Elektronikchip: Wandlung der elektrischen Größe in ein elektrisches Standardsignal (I, U, digitaler Ausgang)
- Diskrete Bauteile: Dienen zur Kalibrierung oder als genaue Referenzgröße, die nicht On Chip hergestellt werden kann



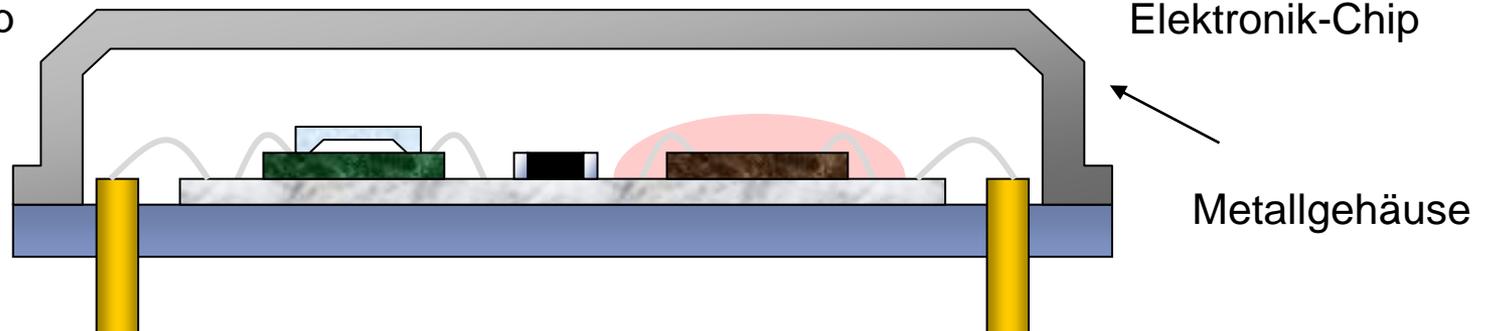
Sensor-Chip



Diskrete Bauteile
(Widerstände, Kapazitäten)

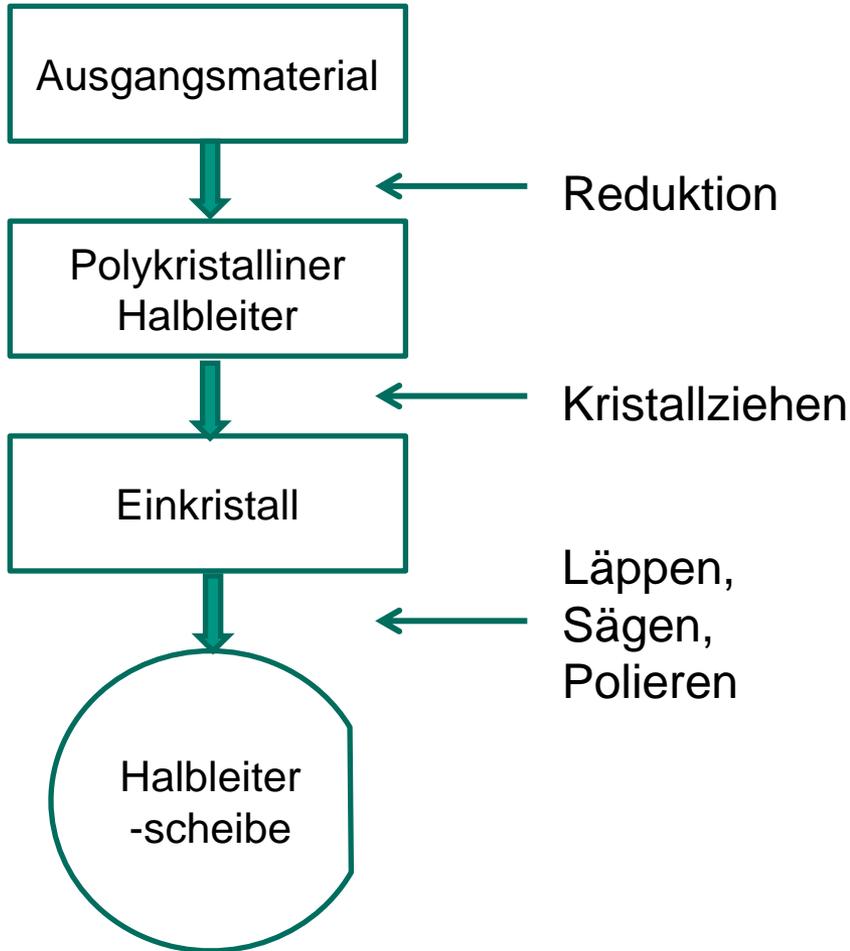


Elektronik-Chip

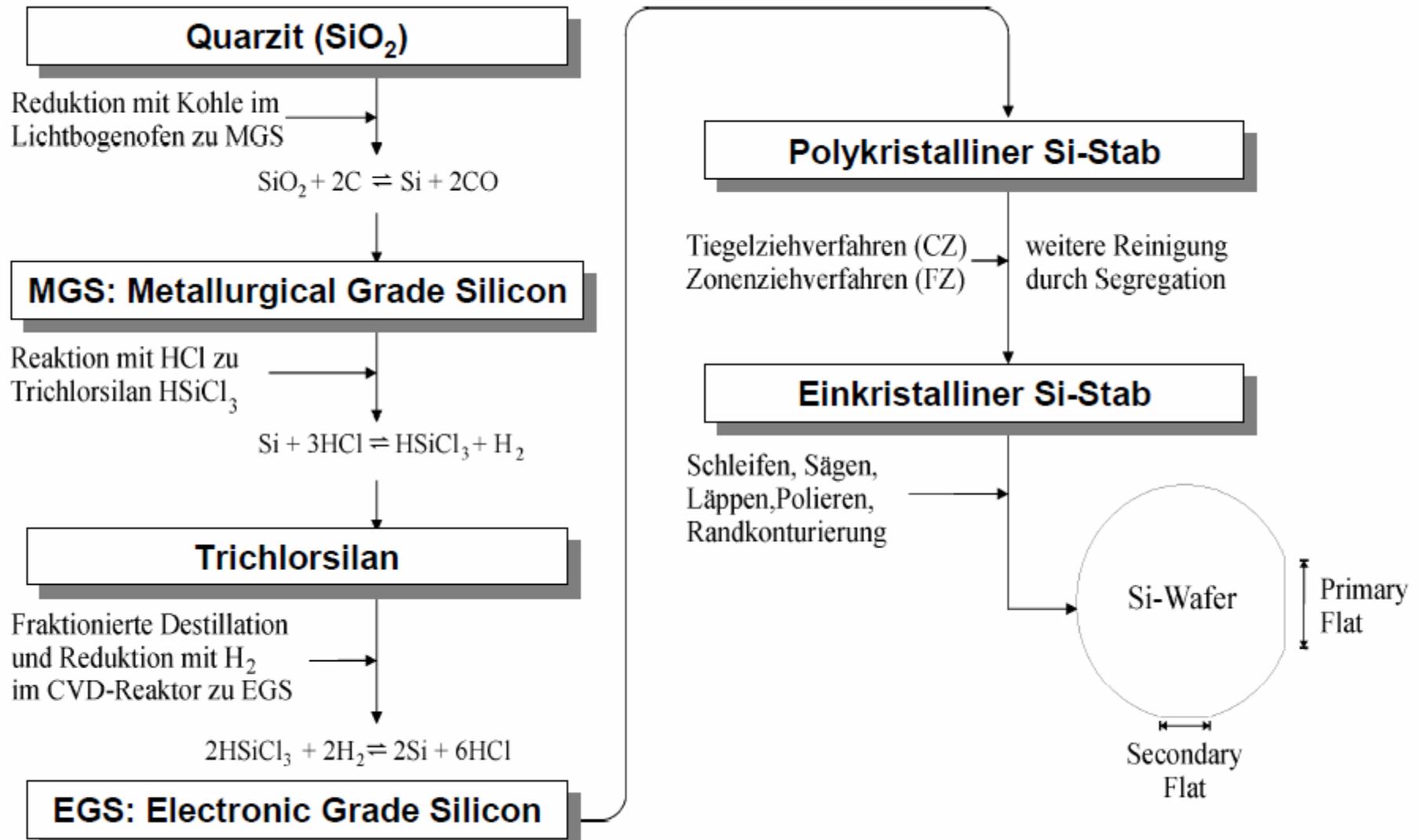


MATERIALIEN DER MIKROSYSTEMTECHNIK

Prozessfolge zur Waferherstellung



Prozessfolge zur Waferherstellung



Prozessfolge zur Waferherstellung

Ausgangsmaterial



Reinheit: 98-99%Si
 (= technisches
 Silizium =
 metallurgical
 grade MGS)

- Silizium ist mit 25.7 % (Gewicht) nach Sauerstoff das zweithäufigste Element der Erdkruste
- Silizium kommt nicht elementar vor, sondern in oxidierter Form SiO_2 (Quarz)
- Quarz ist zu etwa 17% in der Erdkruste vorhanden
- Aus SiO_2 wird unter Zugabe von Kohlenstoff reines Si gewonnen. Aus 60 t Quarz + 25 t Holzkohle (aus 90 t Holz) -> 28 t Silizium
- Energieverbrauch sehr hoch: ~14 MWh/t
- Produktion in Ländern mit billigen Rohstoffen und Wasserkraftwerken (Brasilien, Australien)
- Herstellung : ~ 1 Mill. Tonnen/Jahr,
- 90 % des MG-Siliziums gehen in die Aluminium/Stahl-Industrie, 5% woanders, 5% in Wafer

Prozessfolge zur Waferherstellung

Ausgangsmaterial



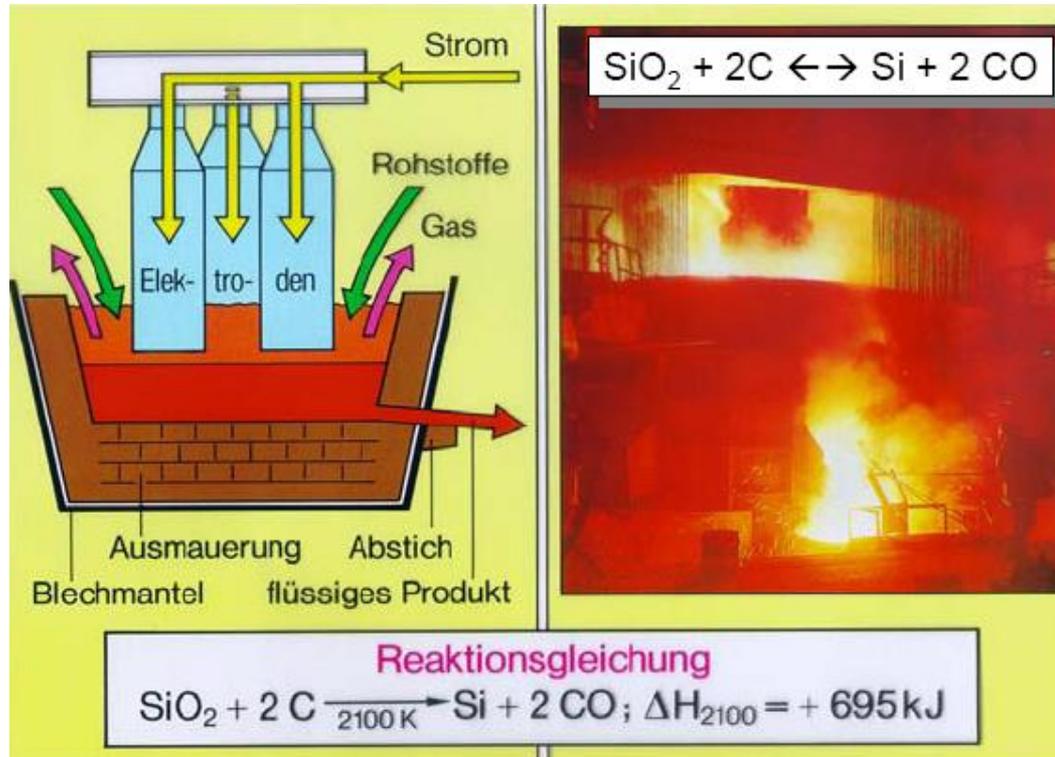
Reinheit: 98-99%Si
(= technisches
Silizium =
metallurgical
grade MGS)

Bogenentladungsreaktor



Silizium-Herstellung

■ Reduktion von Quarz (SiO₂) zu metallurgischem Si

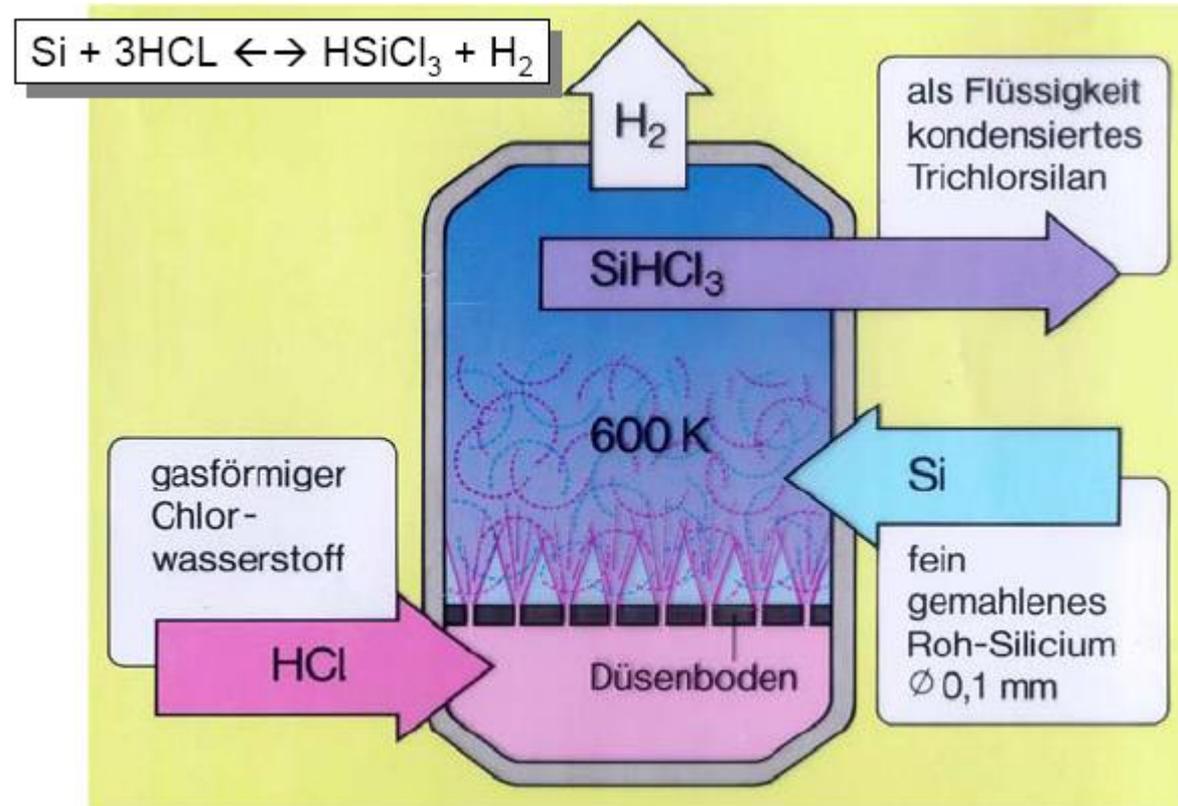


$$\text{SiO}_2 + 2\text{C} \xrightarrow{2100\text{K}} \text{Si} + 2\text{CO}; \Delta H_{2100} = + 695\text{kJ}$$

- Energieintensiv: 250 kWh für 1 kg technisches Silizium (MGS)
- 2002: 4,1 Mio t (90 % Legierung für Stahl, 5 % für MST)

Silizium-Herstellung

■ Trichlorsilan Destillation



Prozessfolge zur Waferherstellung

Ausgangsmaterial



Reinheit: 98-99%Si
 (= technisches
 Silizium =
 metallurgical
 grade MG)



Trichlorsilan
Reinheit:
99,999999999%

- Fremdatome können in einem Halbleitermaterial die elektrischen Eigenschaften stark verändern
- => alle vorhandenen Verunreinigungen aus dem Silizium entfernen
- bei der Bauelementherstellung werden durch gezielte Zugabe von Fremdatomen (Dotierung) reproduzierbare elektrische Eigenschaften erzielt
- Zur chemischen Reinigung wird MG-Silizium zermahlen und mit Salzsäure HCl in das Gas Trichlorsilan SiHCl_3 umgewandelt
- Durch vielfach wiederholte Destillation werden die entstandenen Verunreinigungsgase von SiHCl_3 getrennt

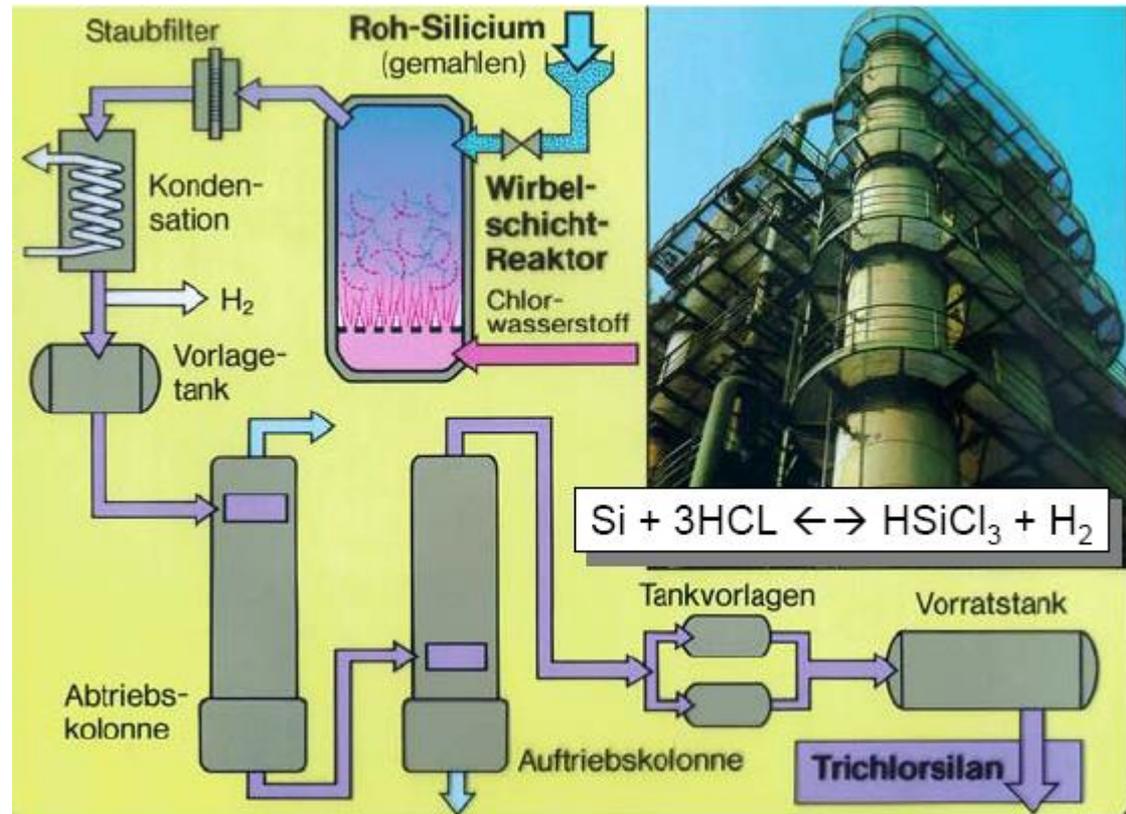
Prozessfolge zur Waferherstellung

Ausgangsmaterial

Reinheit: 98-99%Si
 (= technisches Silizium = metallurgical grade MG)

Trichlorsilan
 Reinheit: 99,999999999%

Trichlorsilanherstellung



Silizium-Herstellung

■ Trichlorsilan Destillation

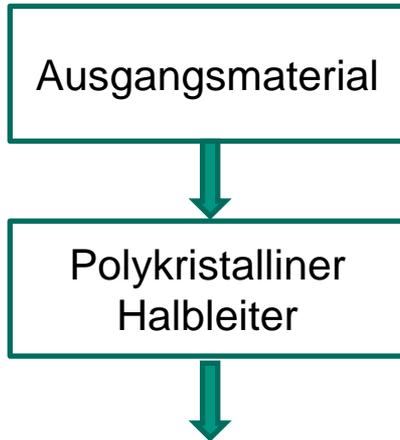


Destillationsanlage für Trichlorsilan
bei Wacker, Burghausen

Zweitgrößter Hersteller von
Polysilizium bzw. Reinstsilizium
(33.000 t in 2010)

Quelle: Wacker Chemie

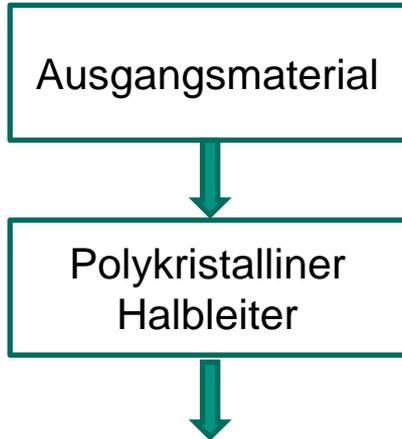
Prozessfolge zur Waferherstellung



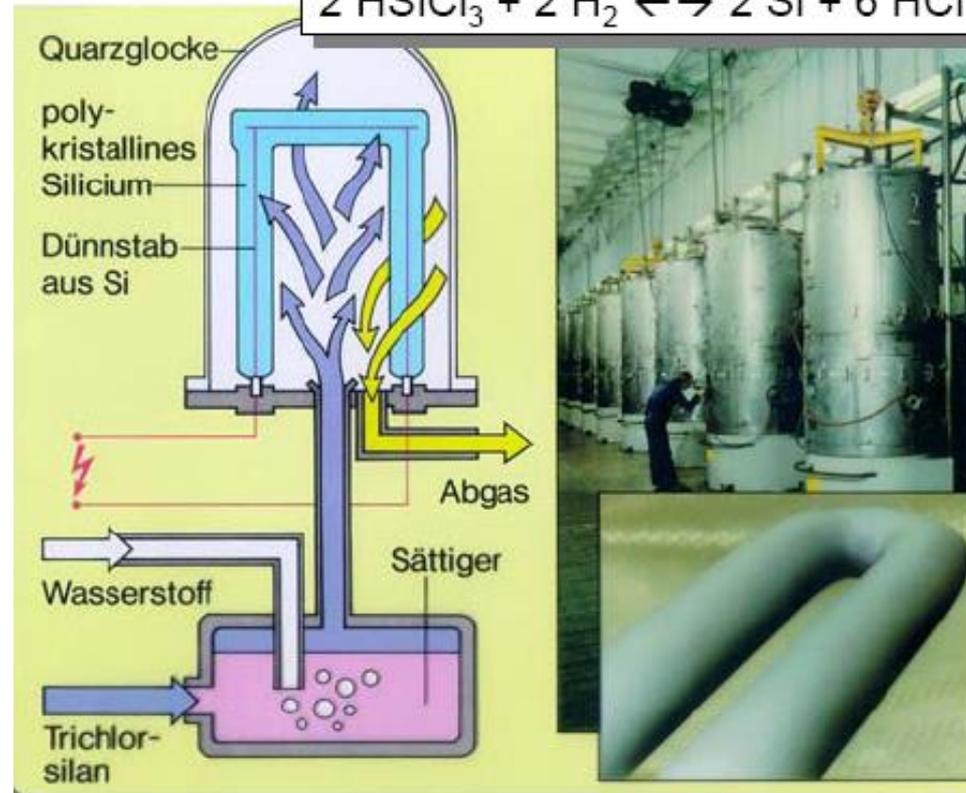
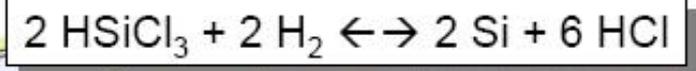
Polykristalliner Wafer für Solarzelle

- Festes, hochreines Silizium erhält man durch die Umkehrreaktion (Siliziumabscheidung)
- Jährlich werden in D etwa 33.000 Tonnen von diesem Reinstsilizium für die Halbleiterhersteller erzeugt
- Energieverbrauch: etwa 250kWh/kg im TCS-Prozess
- Umweltbelastung durch Chlorprodukte
- Herstellungspreis von etwa 40-60 €/kg Reinstsilizium

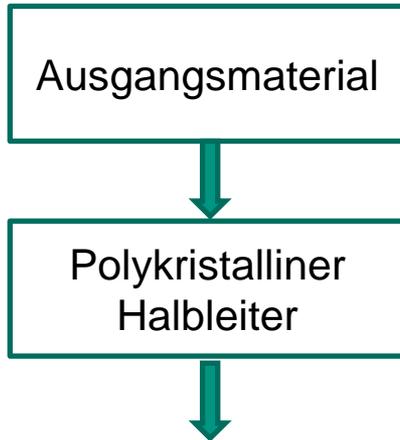
Prozessfolge zur Waferherstellung



Polykristallherstellung



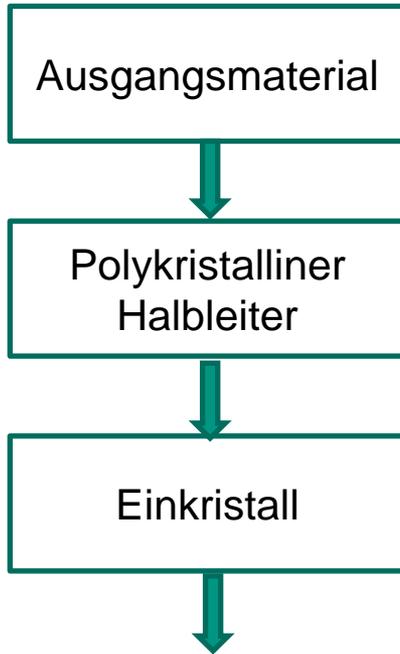
Prozessfolge zur Waferherstellung



Polykristallherstellung

- **Silizium Abscheidungsreaktor**
- Siemens Prozess zur Erzeugung von EGS (Electronic Grade Silicon)
- Die Reinheit von EGS liegt für die wichtigsten Verunreinigungen im Bereich einzelner ppb (parts per billion) oder darunter!
- Die Abscheidung erfolgt über einige Tage (Stäbe mit mehreren Metern Länge und über 200 mm Durchmesser)

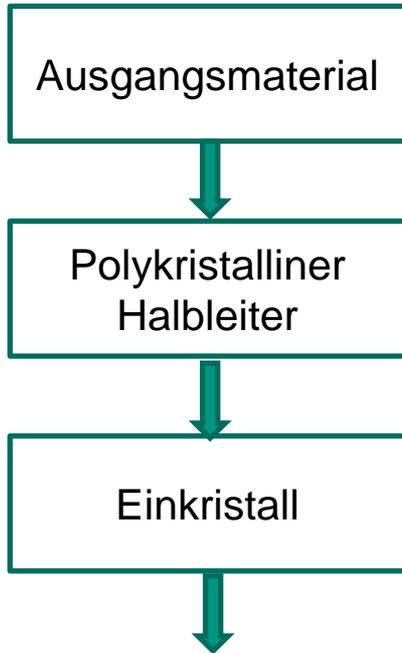
Prozessfolge zur Waferherstellung



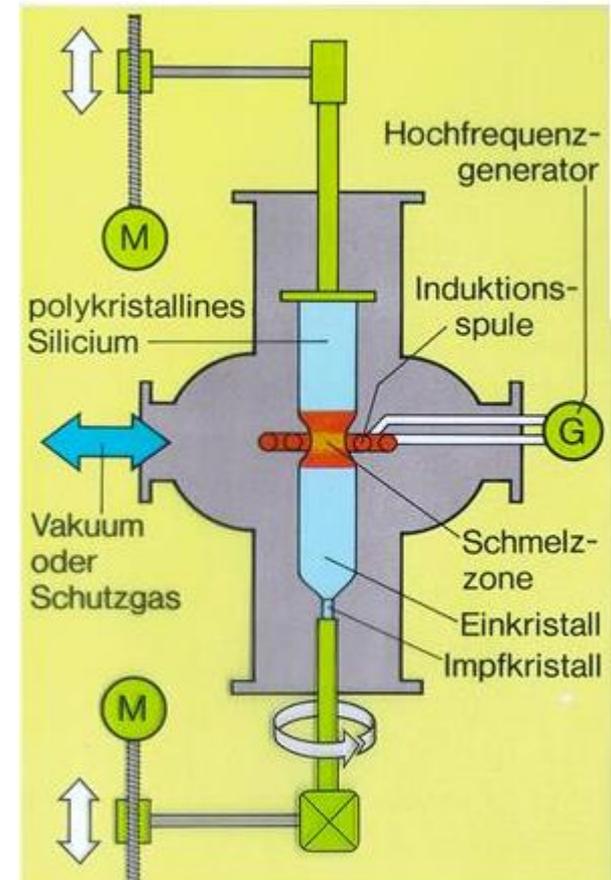
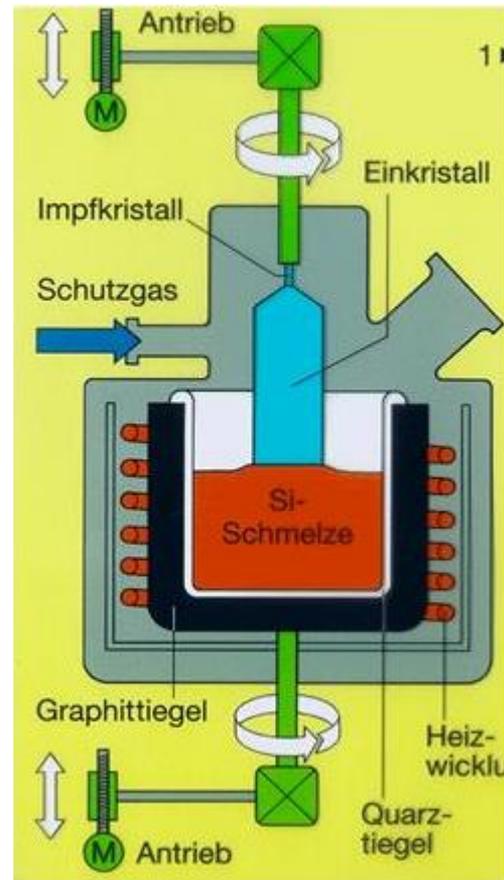
- An Korngrenzen von Polykristallen weichen die Eigenschaften vom Vollmaterial ab
- Reproduzierbare Bauelemente nur in Einkristallen herstellbar
- Herstellung von Einkristallen durch
 - Tiegelziehverfahren
 - Zonenschmelzverfahren
- Tiegelziehverfahren
 - Impfkristall in Kontakt mit der Schmelze
 - Drehen ($<1\text{U}/\text{min}$) und ziehen (cm/h)
 - Dicke hängt von Prozessparametern ab
- Zonenschmelzverfahren
 - Ziehen durch Hochfrequenzspule
 - Reinigung des Siliziums



Prozessfolge zur Waferherstellung

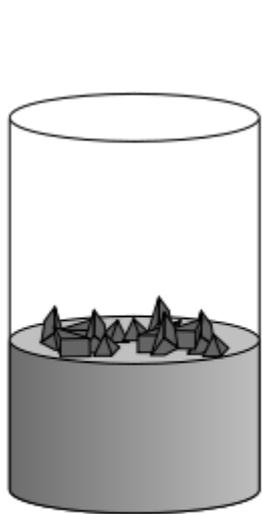


Einkristallherstellung

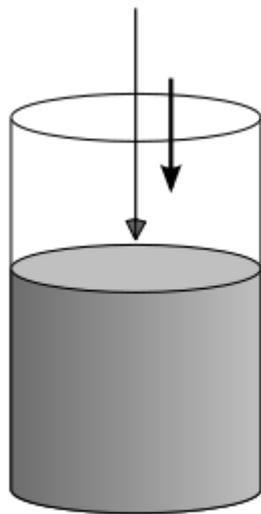


Kristallziehen

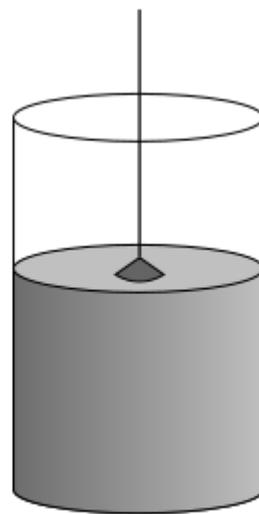
■ Prinzip der Zugtechnik



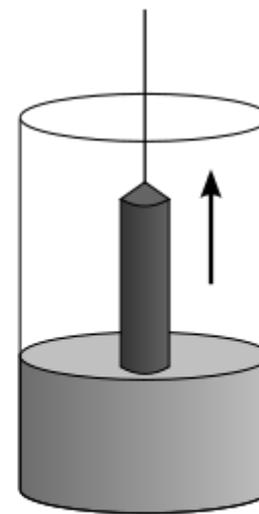
Schmelzen von
Polysilicium,
Dotierung



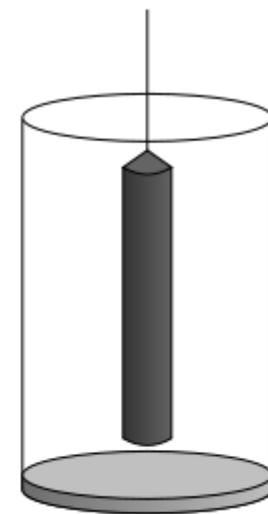
Einbringen
des
Keimlings



Beginn des
Kristall-
wachstums



Kristall-
ziehen

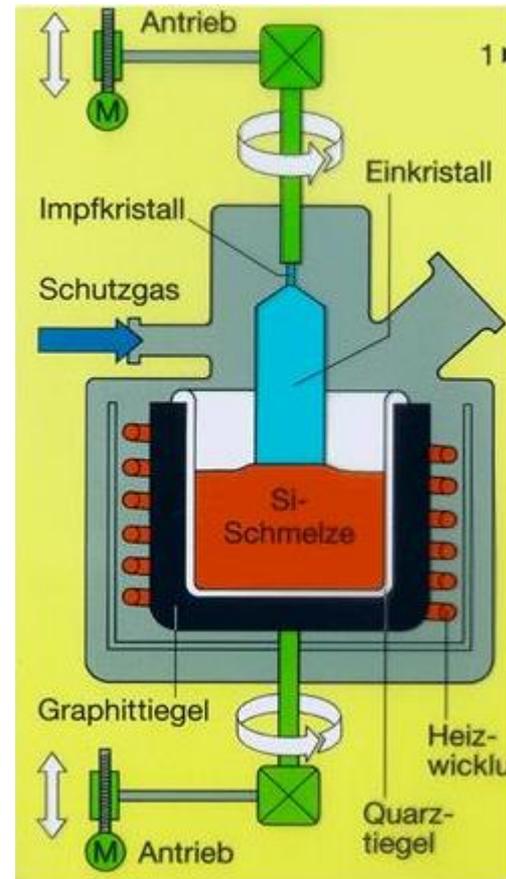


Kristall (Ingot)
mit
Restschmelze

Kristallziehen

■ Tiegelziehverfahren (Czochralski-Verfahren)

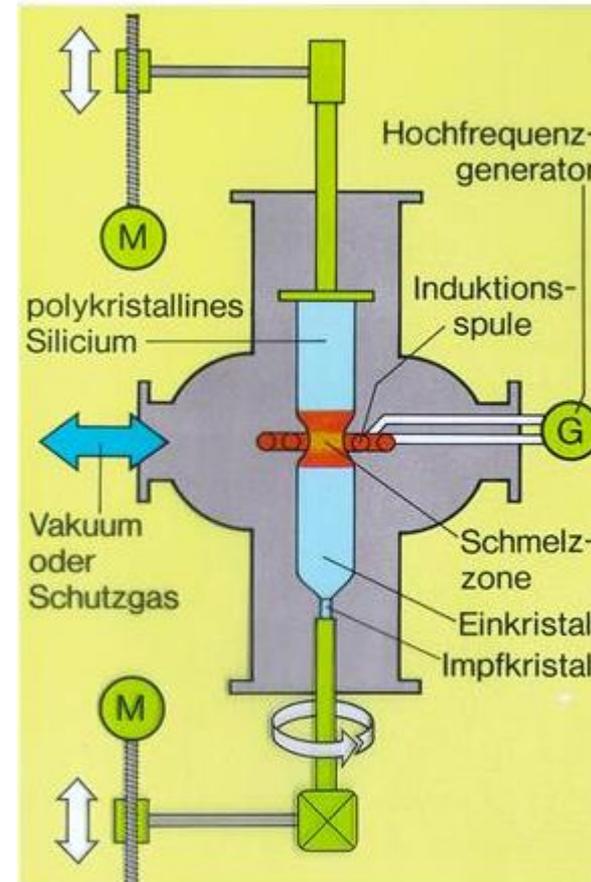
- Weitere Verringerung von Verunreinigungen
- Herstellung von hochreinem, einkristallinem Silizium
- Verunreinigungen bleiben in der Schmelze zurück



Quelle: <http://it-material.de>

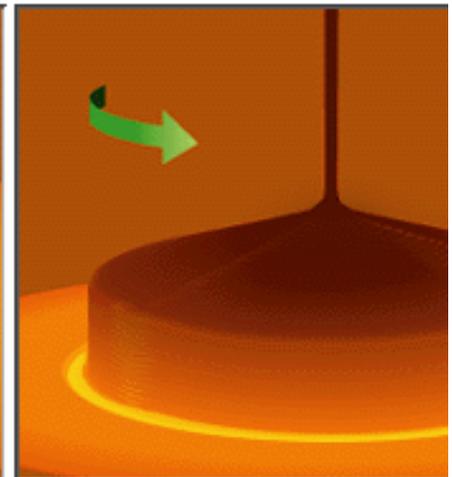
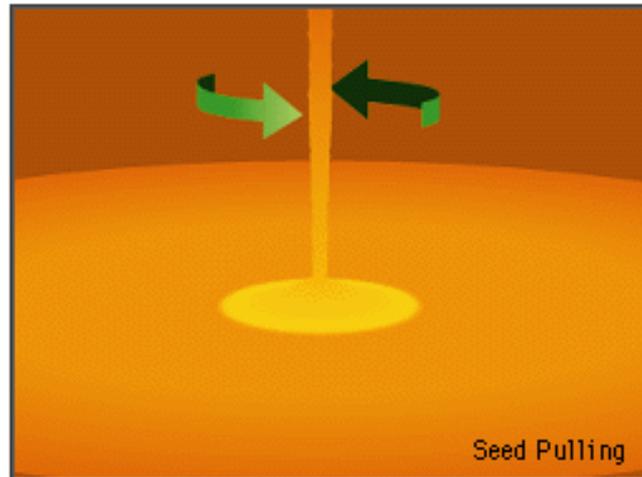
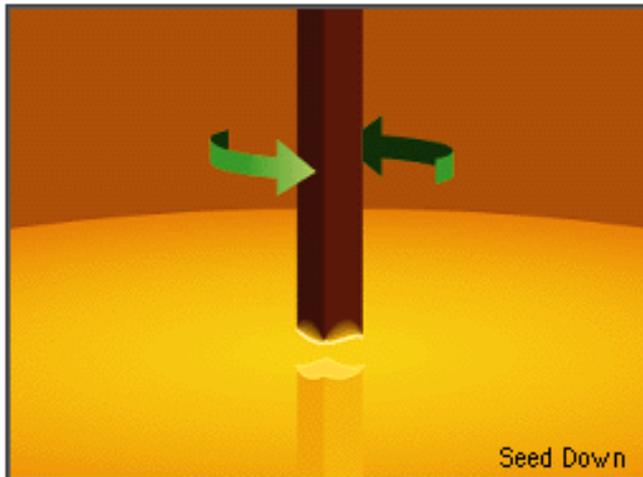
Kristallziehen

- Zonenziehverfahren (Float-Zone-Verfahren)
- Verunreinigungen sammeln sich in der Schmelze (->Segregation)
- Prozess kann wiederholt werden für höhere Reinheit

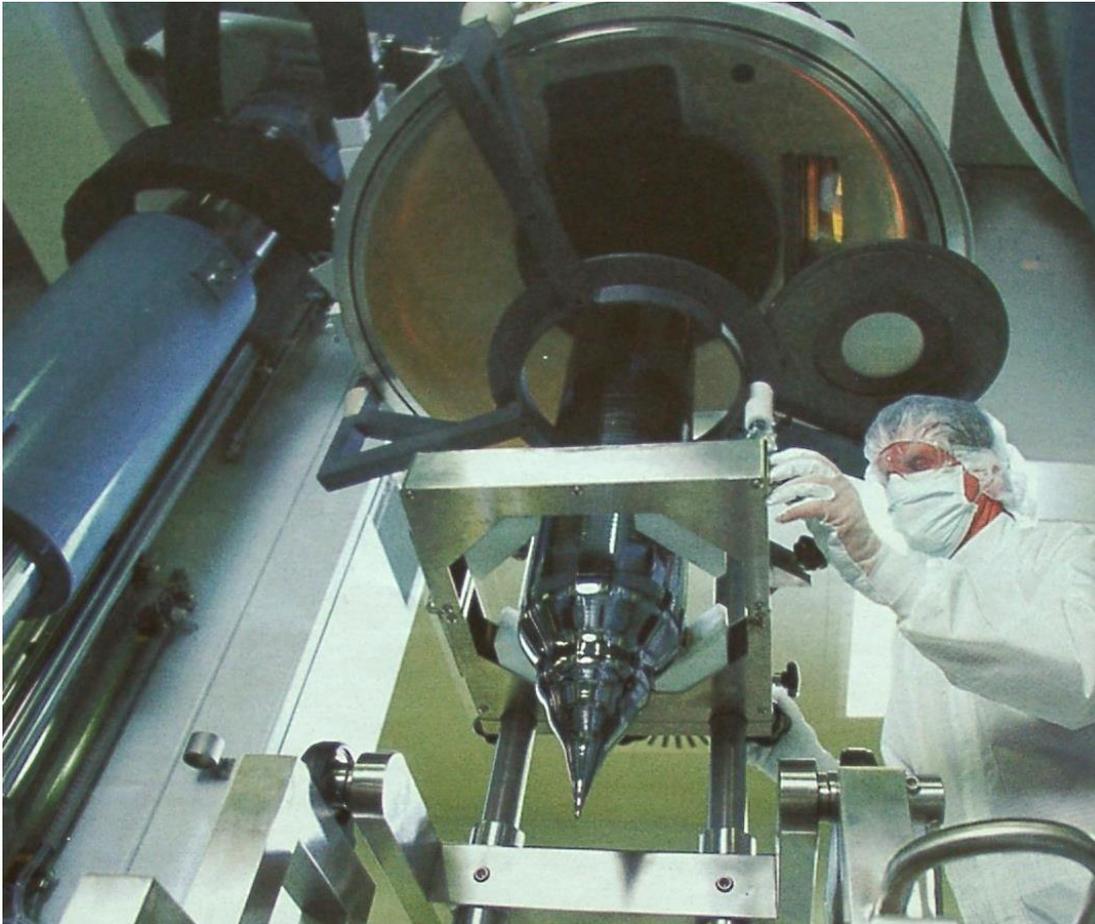


Quelle: <http://it-material.de>

Visualisierung Kristallziehen



Silizium Einkristall - Kristallziehhanlage



Ingot

Reinigung durch Segregation

- Die Löslichkeit vieler Verunreinigungen unterscheidet sich in der flüssigen Phase von der in der festen Phase
- Der Segregationskoeffizient k_0 kann aus der atomaren Konzentration der Verunreinigung in der festen Phase c_s und der atomaren Konzentration der Verunreinigung in der flüssigen Phase c_l berechnet werden:

$$k_0 = \frac{c_s}{c_l}$$

- Ist der Segregationskoeffizient kleiner als 1, so sammeln sich die Verunreinigungen in der flüssigen Phase an

Reinigung durch Segregation

$$k_0 = \frac{c_s}{c_l}$$

- c_s : S_i (solidus) Löslichkeit in der festen Phase
- c_l : S_i (liquidus) Löslichkeit in der flüssigen Phase, weitab von den Phasengrenzen

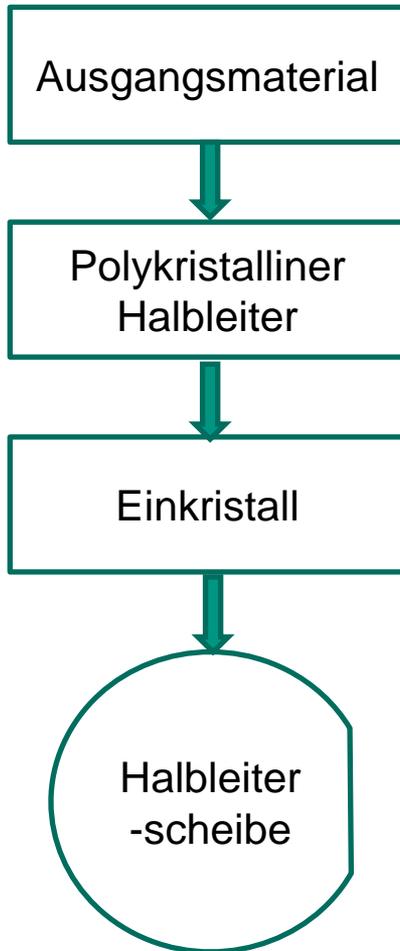
Segregationskoeffizienten für Si

Material	k_0	Material	k_0
Al	2×10^{-3}	As	0,3
Au	$2,5 \times 10^{-3}$	B	0,8
Bi	7×10^{-4}	C	7×10^{-2}
Co	8×10^{-6}	Cr	$< 10^{-8}$
Cu	4×10^{-4}	Fe	8×10^{-6}
Ga	8×10^{-3}	Ge	0,33
In	4×10^{-4}	Li	0.01
Mg	8×10^{-6}	Mn	$\sim 10^{-5}$
N	$\sim 10^{-7}$	Na	$1,65 \times 10^{-3}$
Ni	8×10^{-6}	O	1.25
P	0,35	S	10^{-5}
Se	$< 10^{-8}$	Sn	0,016
Ta	10^{-7}	Te	8×10^{-6}



Schutzatmosphäre erforderlich

Prozessfolge zur Waferherstellung

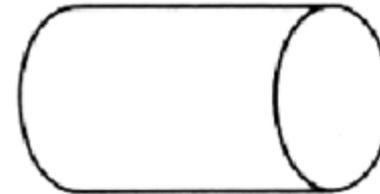


- Sägen der Scheiben
 - Innenlochsäge (sägen von kürzeren Stücken)
 - Rund schleifen, Flats anbringen
 - Scheiben sägen
 - **Innenlochsäge:**
 - Vorteil: geringer Materialverlust, sehr ebene Wafer -> kurze Nachbearbeitungszeiten
 - Nachteil: Einzelscheibenprozess
 - **Drahtsäge:**
 - Vorteil: viele Wafer gleichzeitig
 - Nachteil: hoher Materialverlust, inhomogene Scheibendicken -> lange Nachbearbeitungszeiten
- Kanten schleifen
- Läppen
- Polieren (physikalisch, chemisch)

Bearbeiten des Einkristalls



Rohkristall



Kristall abdrehen um Unebenheiten zu beseitigen und absägen, um die Enden zu entfernen



In Scheiben sägen (vorher werden flats für die Orientierung angebracht)



Ecken abrunden



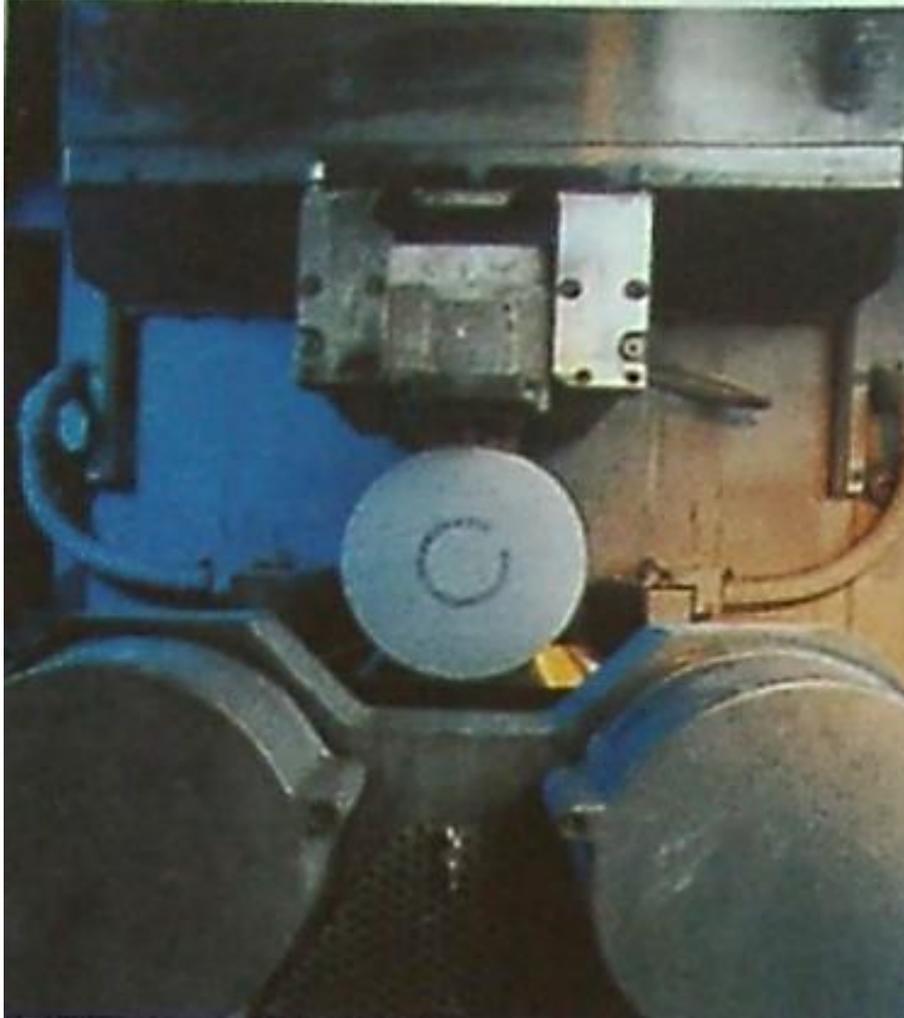
Wafer läppen und polieren

Rundschleifen eines Kristalls



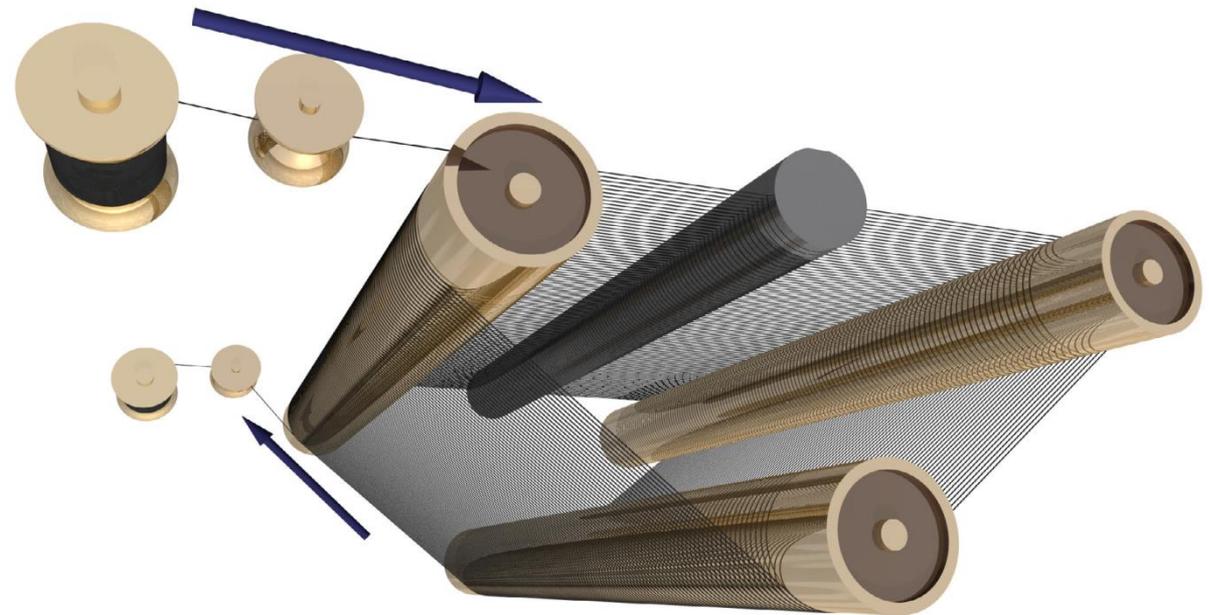
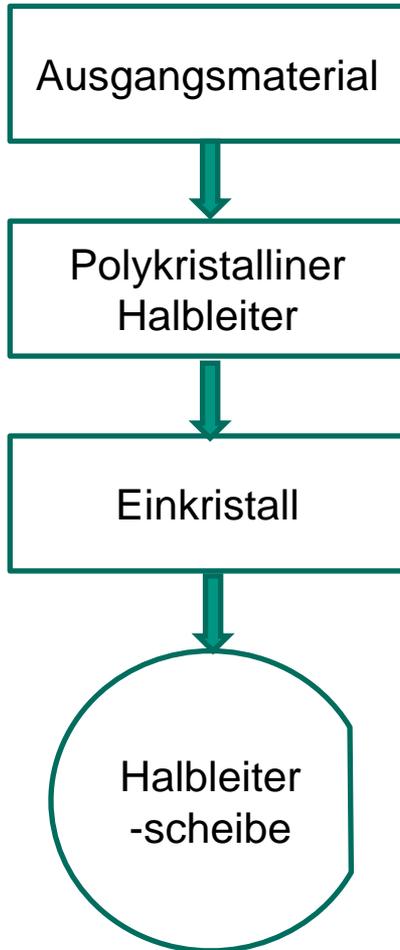
Der extrem spröde Silizium-Einkristall lässt sich nur durch Abschleifen auf den gewünschten Durchmesser bringen

Sägen in Wafer



Die Drahtsäge scheidet
den Einkristall in Scheiben

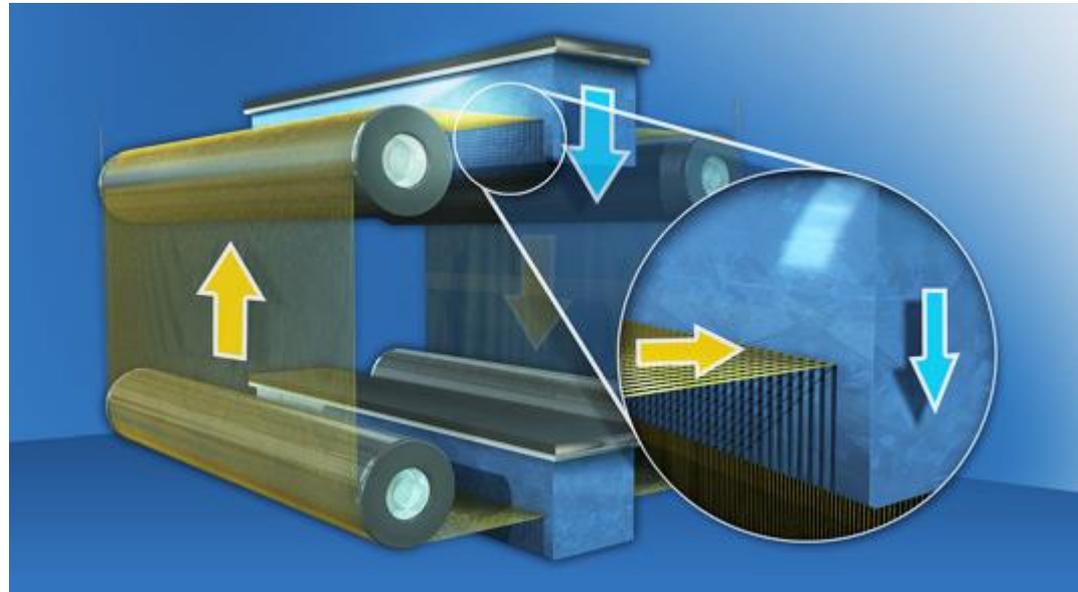
Prozessfolge zur Waferherstellung



Der Draht wird pro Sägevorgang nur einmal über den Si-Zylinder entlang geführt, wodurch die Gesamtlänge des Drahts 100 km betragen kann

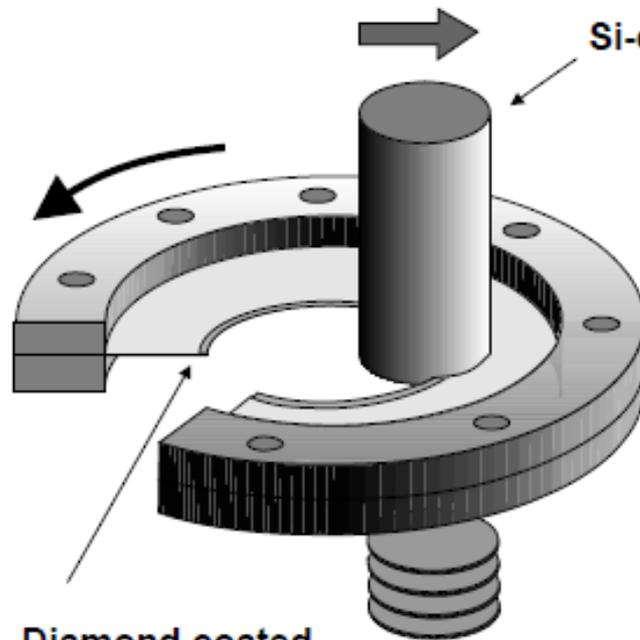
Sägen in Wafer

- Sägen von Wafern für Solarzellen



Quelle: Solar World

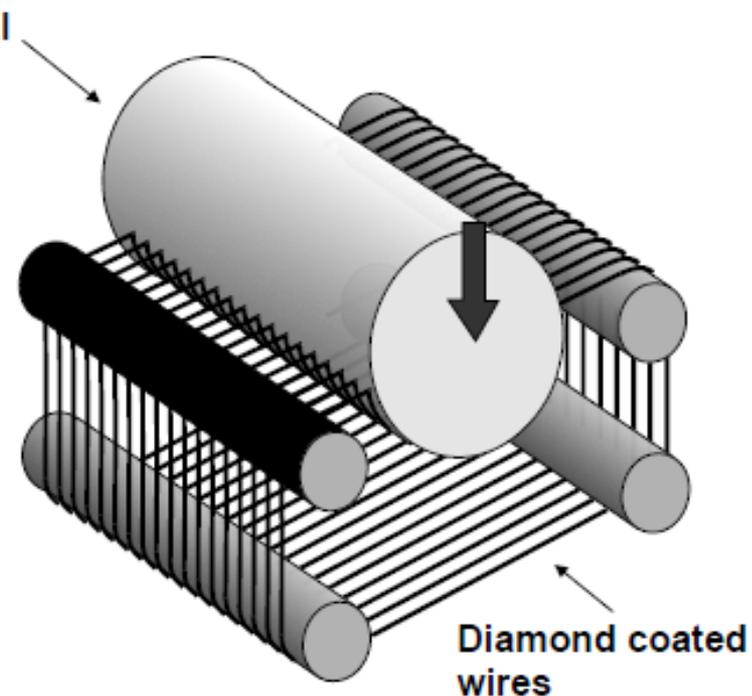
Sägen in Wafer



Diamond coated
cutting edge

a

Innenlochsäge



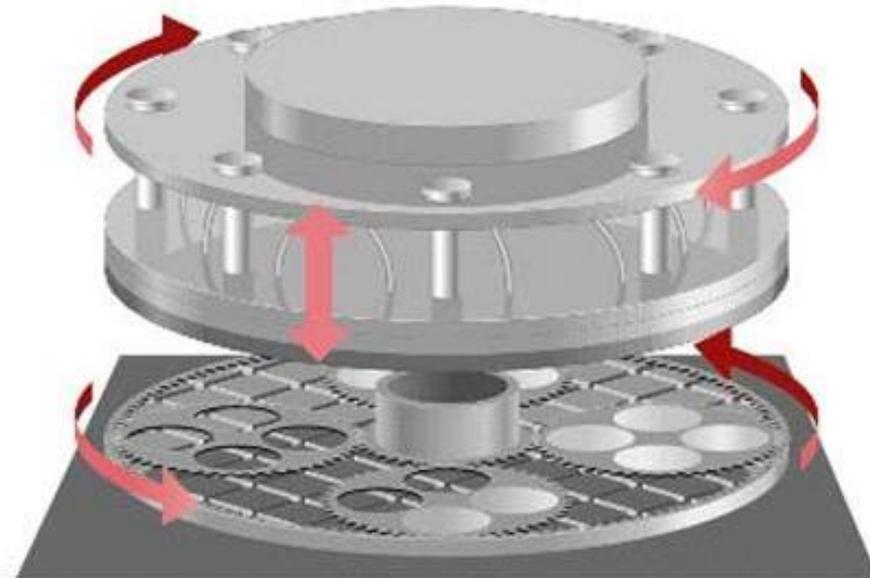
Diamond coated
wires

b

Drahtsäge

Wafer bearbeiten

■ Läppen



Die geschnittenen Scheiben werden zwischen zwei gegenläufigen **Läppscheiben** und feinem **Korundpulver** (Aluminiumoxid) als Schleifmittel mechanisch geläppt. Dadurch wird die **Waferoberfläche geglättet** und die **Keiligkeit eliminiert**. Zudem werden alle mechanischen Defekte wie Sägemarken entfernt.

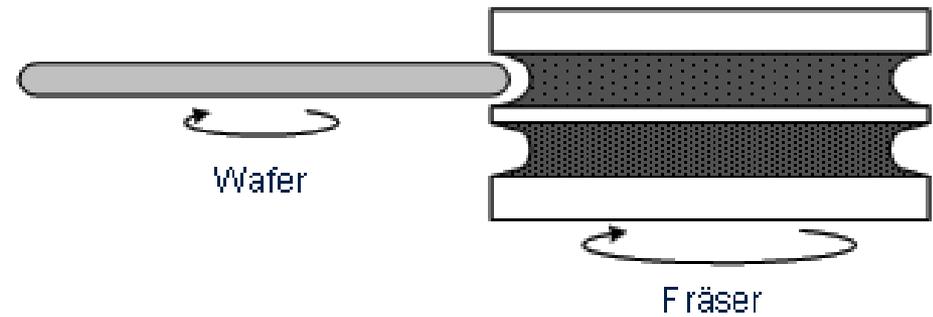
Wafer bearbeiten

- Läppen

- Scheibenrand abrunden

- Ätzen

- Polieren



Wafer bearbeiten

- Läppen

- Scheibenrand abrunden

- Ätzen

- Polieren

Ätzen des Wafers in einer Lösung aus Salpetersäure und Essigsäure zur Entfernung von mechanischen Fehlern und Brüchen (Cracks).
Anschließend Reinigung mit Reinstwasser.

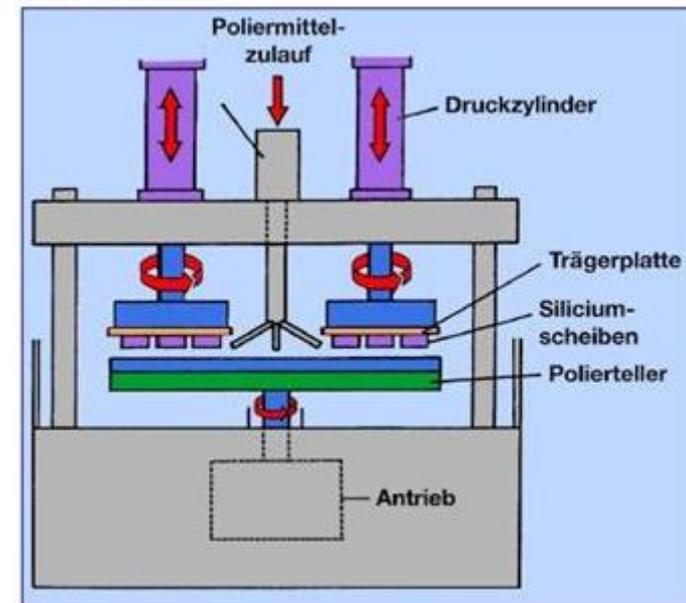
Wafer bearbeiten

- Läppen

- Scheibenrand abrunden

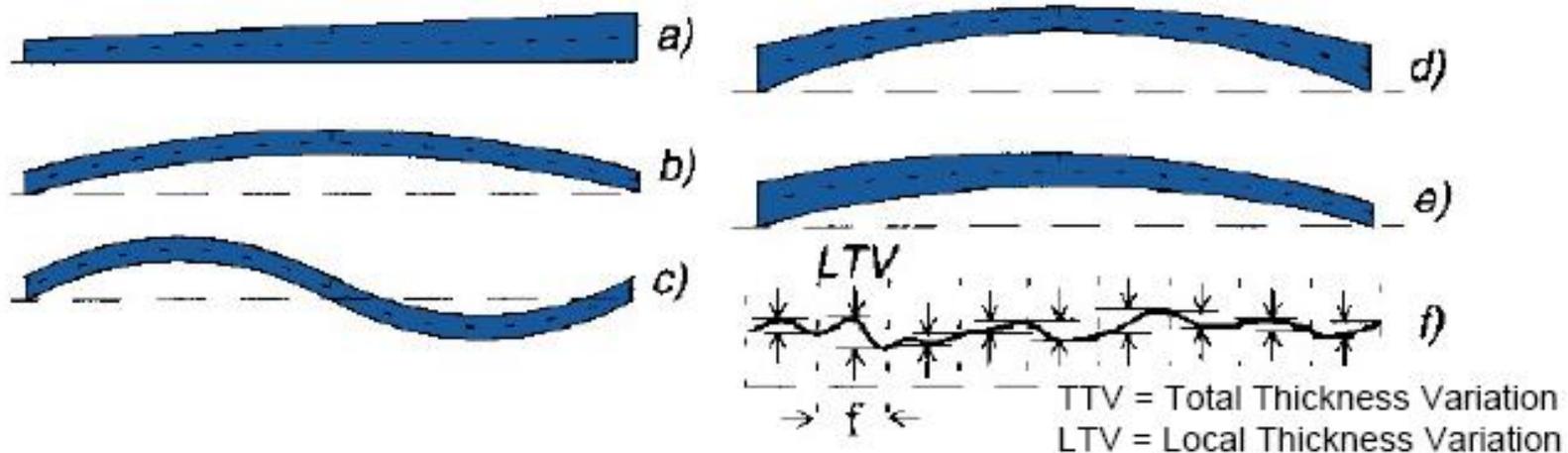
- Ätzen

- Polieren



Reihe von chemisch-mechanischen Polierschritten
Kieselsäurepulver, Ätznatron und Reinstwasser als Poliermittel

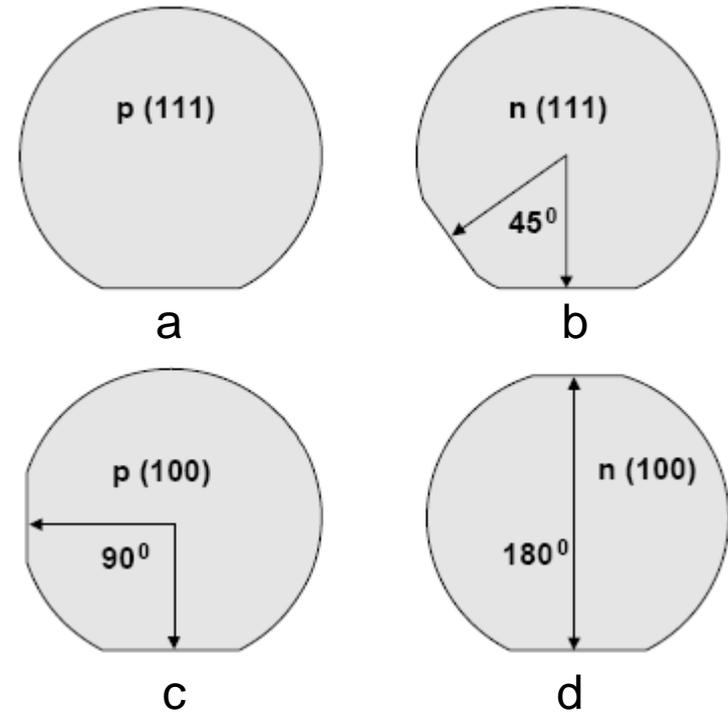
Wafer – Fehler



- a: Parallelitätsabweichung (Keiligkeit, Taper, totale Dickenvariation TTV)
- b: Durchbiegen (Bow)
- c: Verwerfung (Wrap)
- d und e: Beispiele von Kombinationen aus a bis c
- f: Welligkeit (lokale Dickenvariation LTV), bezogen auf ein Teilgebiet der Größe f

Quelle: Wehl / TU-München; Feingerätebau

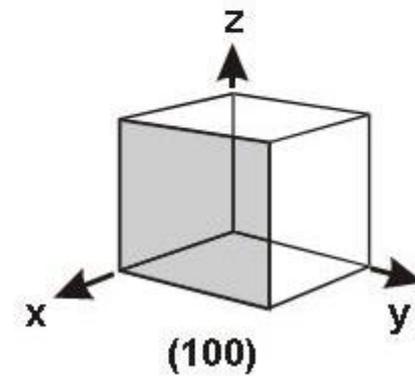
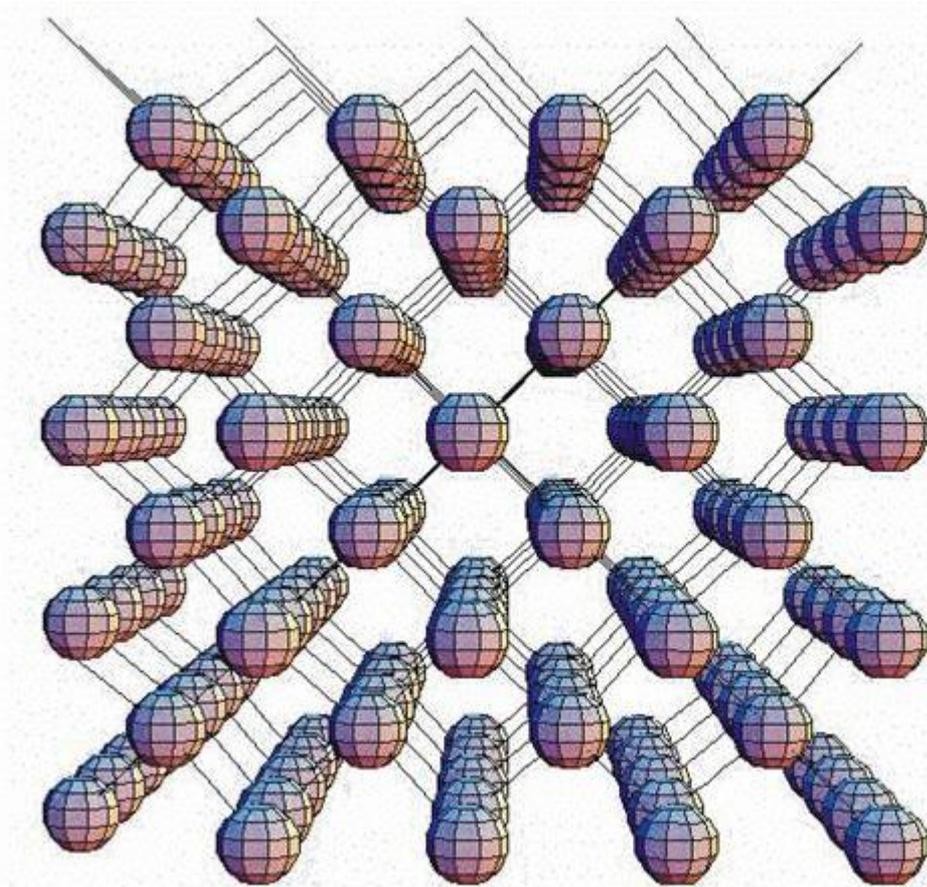
Waferorientierung



- a: (111) Orientierung, *p*-leitend
 b: (111) Orientierung, *n*-leitend
 c: (100) Orientierung, *p*-leitend
 d: (100) Orientierung, *n*-leitend

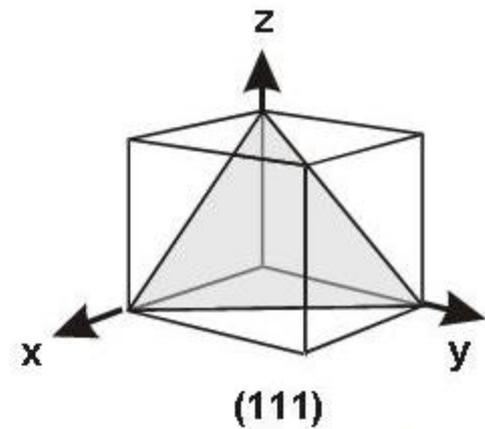
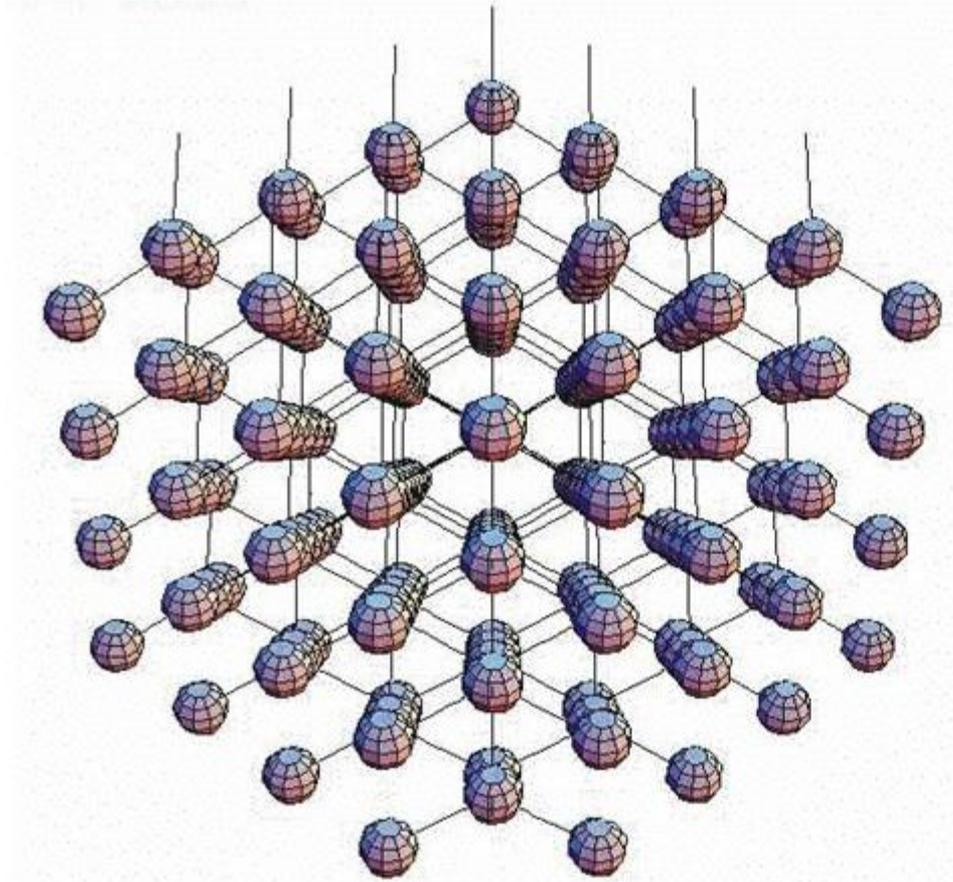
Quelle: SEMI (Semiconductor Equipment and Materials Institute)

Waferorientierung Hintergrund



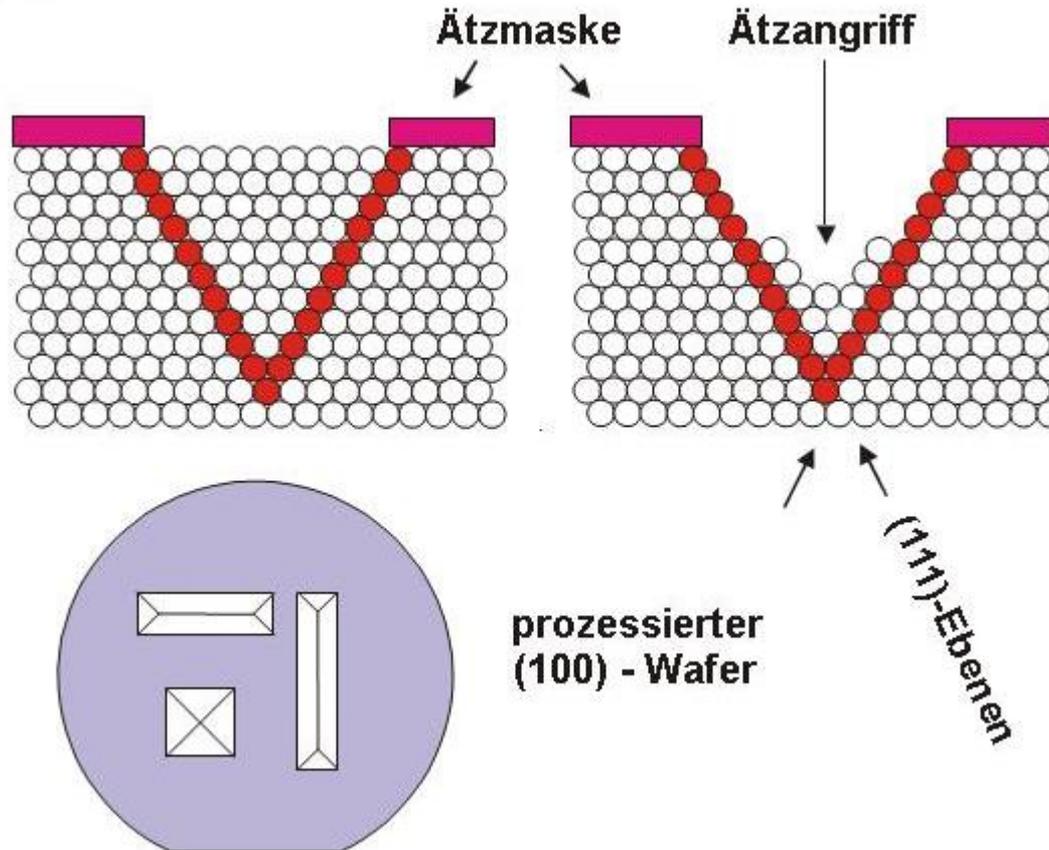
Quelle: IMTEK

Waferorientierung Hintergrund



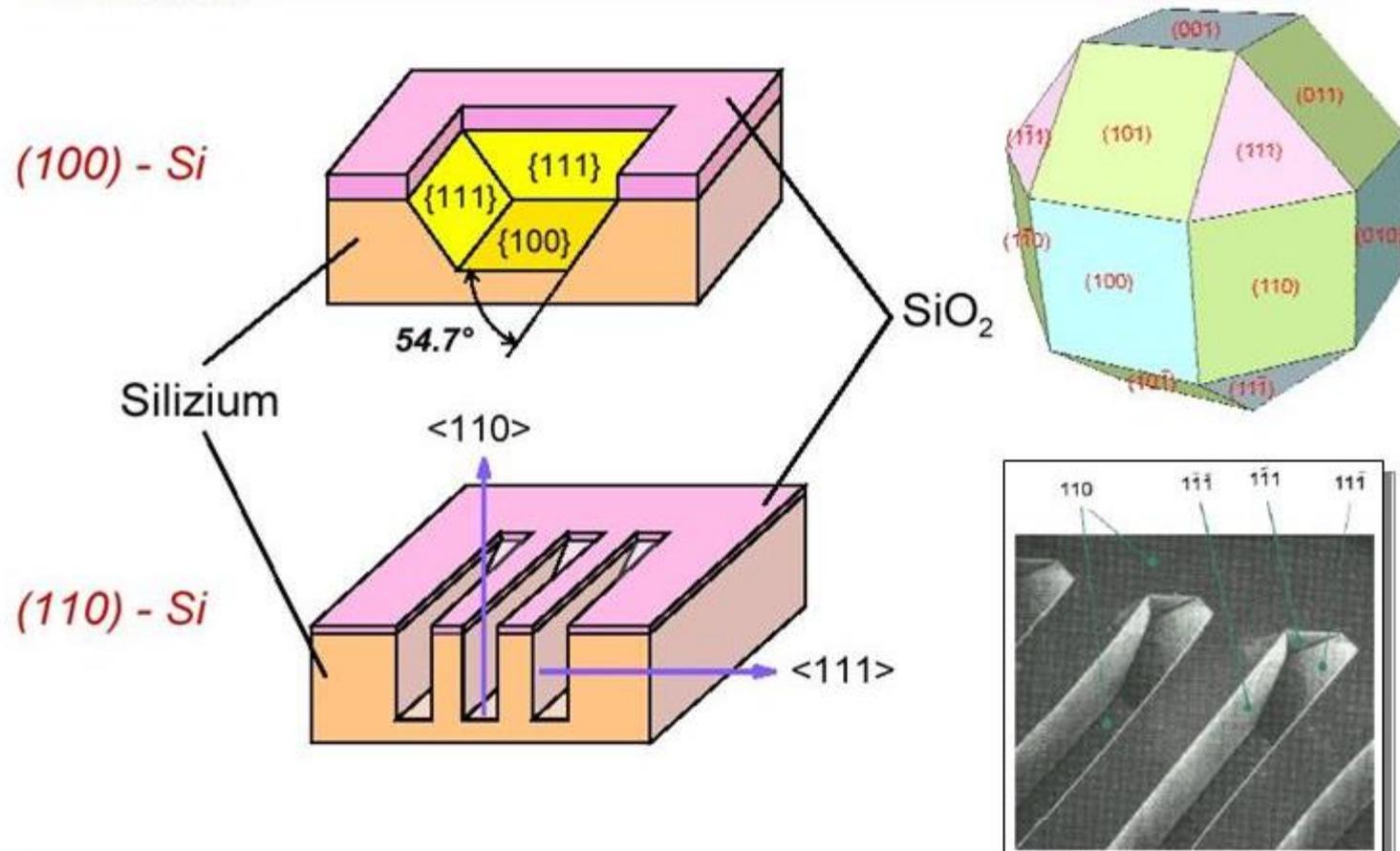
Quelle: IMTEK

Waferorientierung Hintergrund



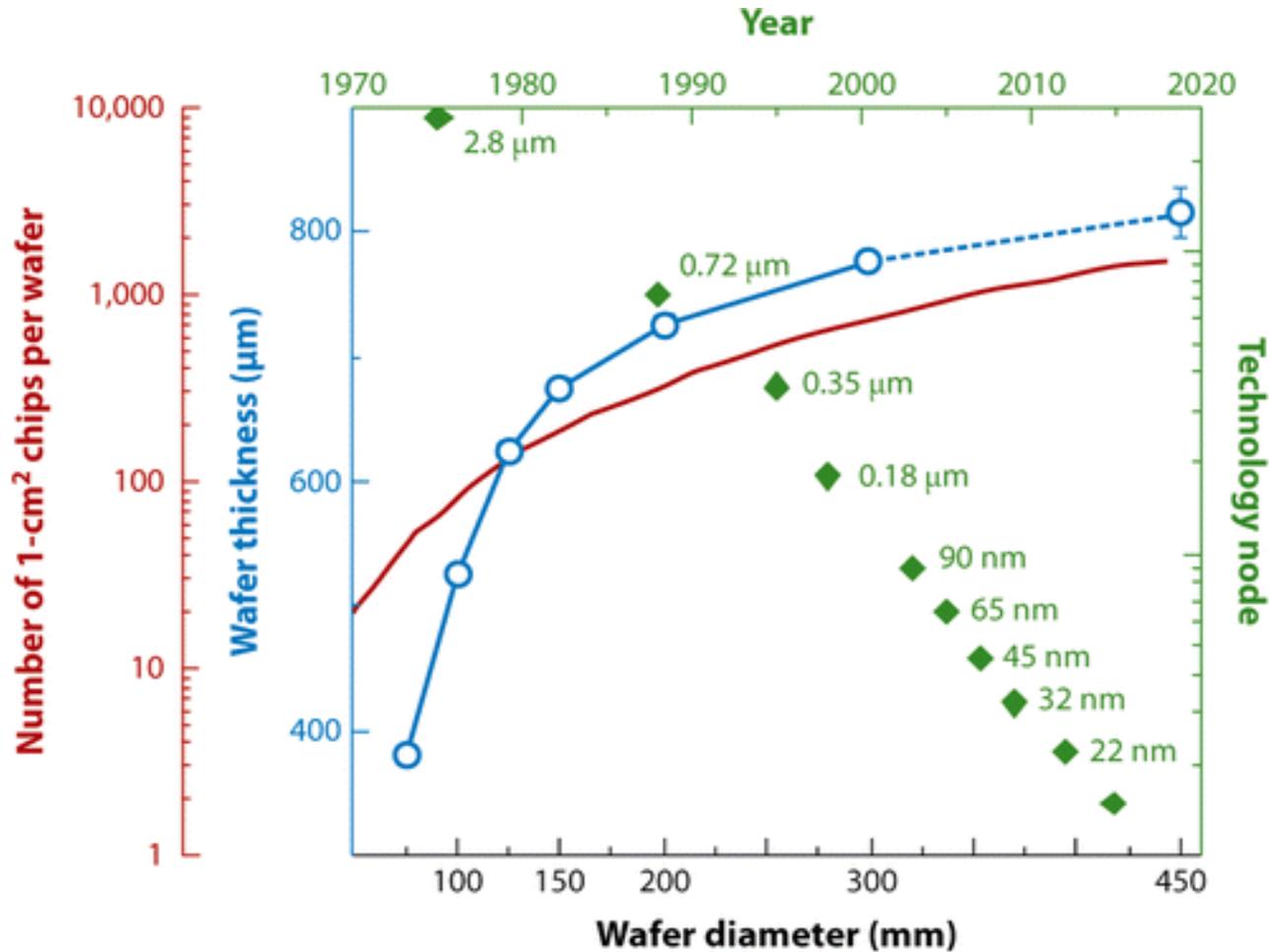
Quelle: IMTEK

Waferorientierung Hintergrund



Quelle: IMTEK

Wafer Größe

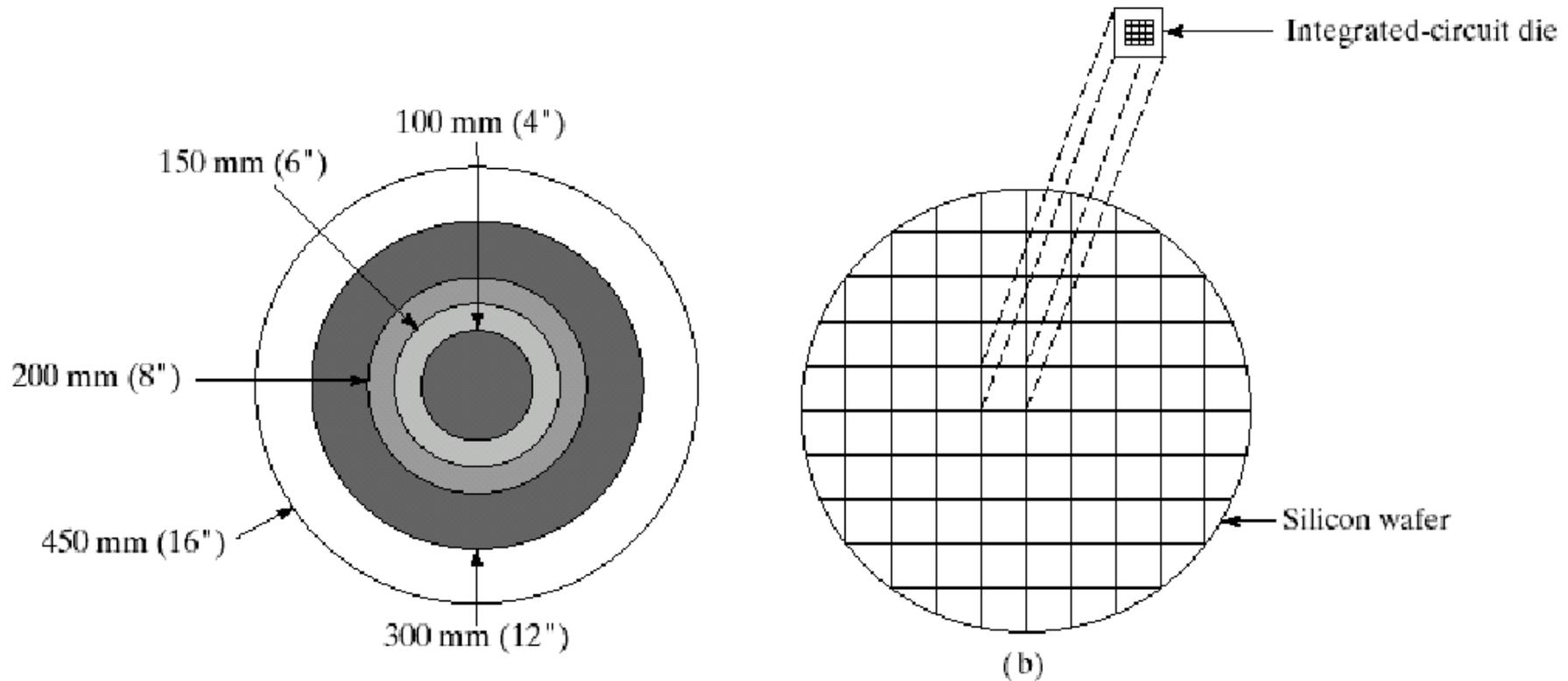


Quelle: www.annualreviews.org

Wafer Größe

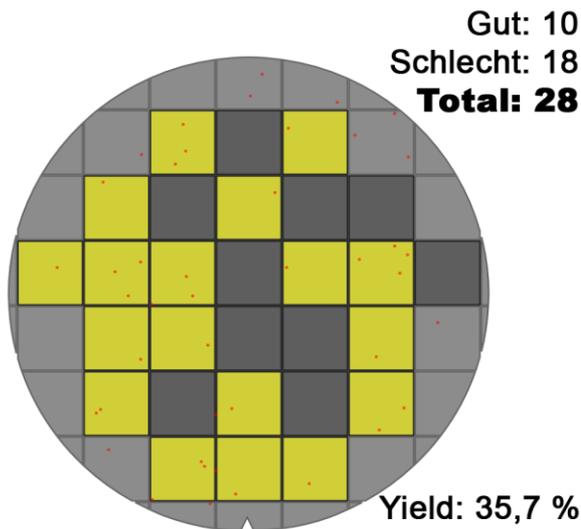
Bezeichnung	Durchmesser [mm]	Dicke [μm]	Markteinführung
1-Zoll-Wafer	–	–	1960
2-Zoll-Wafer	50,8	275	1971
3-Zoll-Wafer	76,2	375	1973
4-Zoll-Wafer	100	525	1976
5-Zoll-Wafer	125 oder 127	625	1982
6-Zoll-Wafer	150	675	1988
8-Zoll-Wafer	200	725	1990
12-Zoll-Wafer	300	775	1997
16-Zoll-Wafer	450	925	2015

Wafer Größe

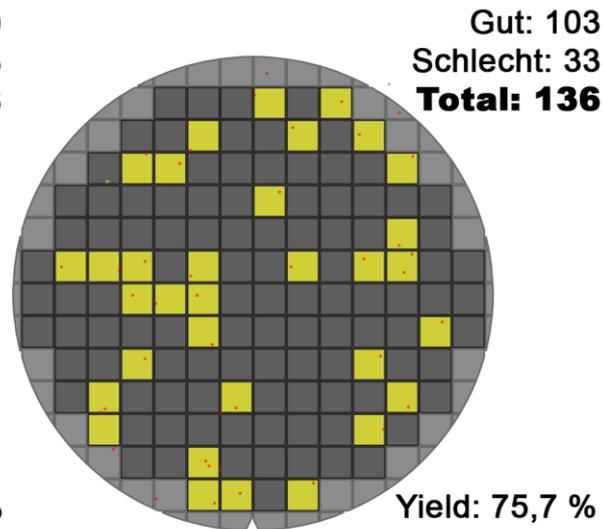


- Größere Wafer bringen größere Ausbeute wegen geringerem Verschnitt

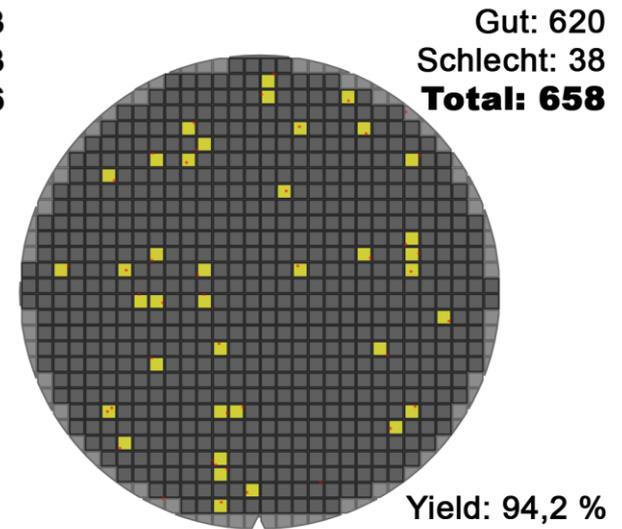
Wafer Ausbeute



Die-Größe: 40 mm x 40 mm



Die-Größe: 20 mm x 20 mm

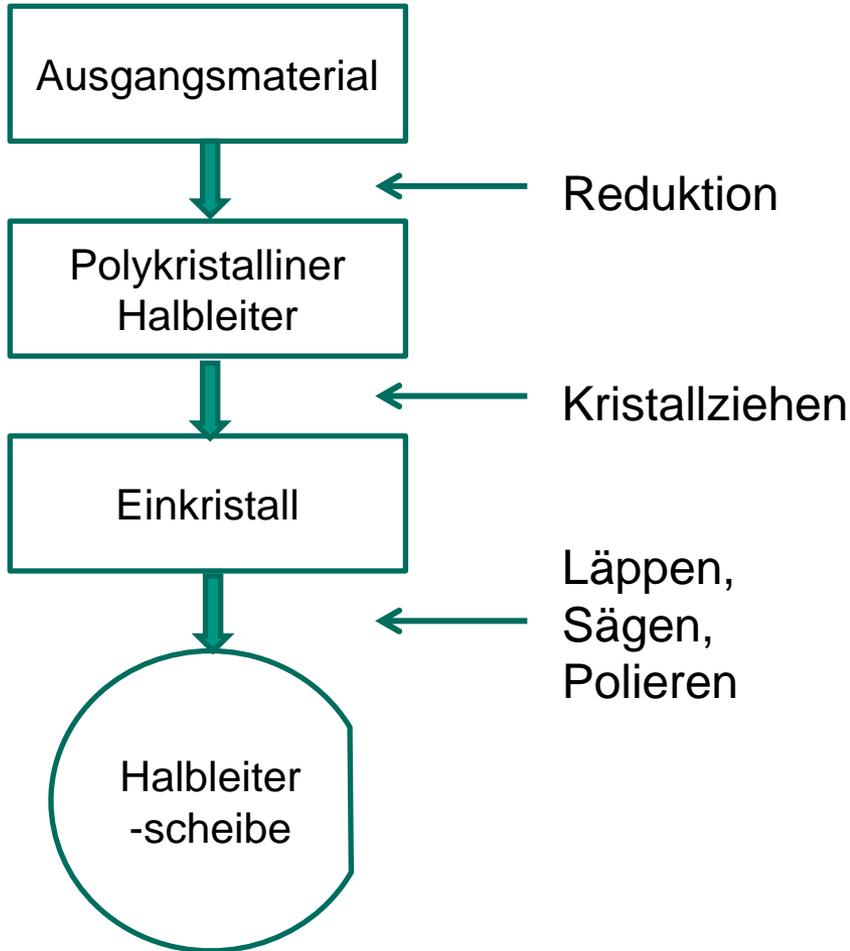


Die-Größe: 10 mm x 10 mm

■ Herstellkosten 200 mm Wafer ca. 850 € (2008)

Quelle: Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Limited (TSMC)

Prozessfolge zur Waferherstellung



Fragensammlung

- Wie sind die Prozessschritte vom Sand zum Wafer?
- Welche Vorteile bringt die Vergrößerung der Wafer für die Hersteller?
- Erklären sie die Begriffe amorph, polykristallin und einkristallin.
- Wie funktioniert das Czochralski- Verfahren?
- Wie funktioniert das Zonenziehverfahren?
- Welche Vor- und Nachteile bieten die beiden Verfahren im Vergleich?