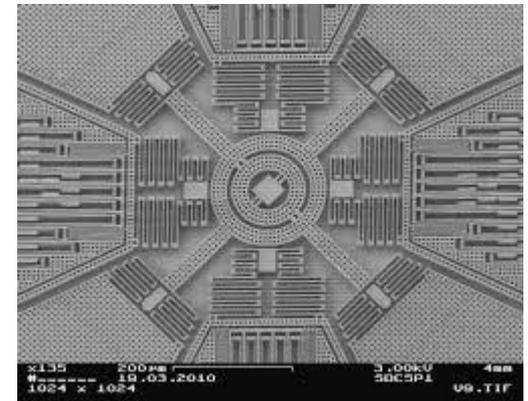


# Vorlesung Mikrosystemtechnik Grundlagen

W. Stork Institut für Technik der Informationsverarbeitung



# Seminar: Sensorsysteme für Fitness- und Sportanwendungen

- Vorbesprechung: Dienstag 26.10. 11:30 im Seminarraum 3.39 ITIV, Geb. 30.10 3. OG
  
- Durchführung: W. Stork
- Ziel:
  - Selbständiges wissenschaftliches Arbeiten
  - Wissenschaftliche Ausarbeitung
  - Vortragsvorbereitung
  - Spezifische Fragestellungen des interdisziplinären Arbeitens:
    - Einarbeitung in fachfremde Anwendungsgebiete
    - Aufarbeitung von Ergebnissen für fachfremde Zielgruppen
    - Evtl. arbeiten in interdisziplinären Teams
- Aktuelle Themen aus den gemeinsamen Forschungsarbeiten mit dem Institut für Sport- und Sportwissenschaft des KIT

# DEFINITION UND BEGRIFFSBESTIMMUNG

# Definition der Mikrosystemtechnik

## ■ Nach Wikipedia:

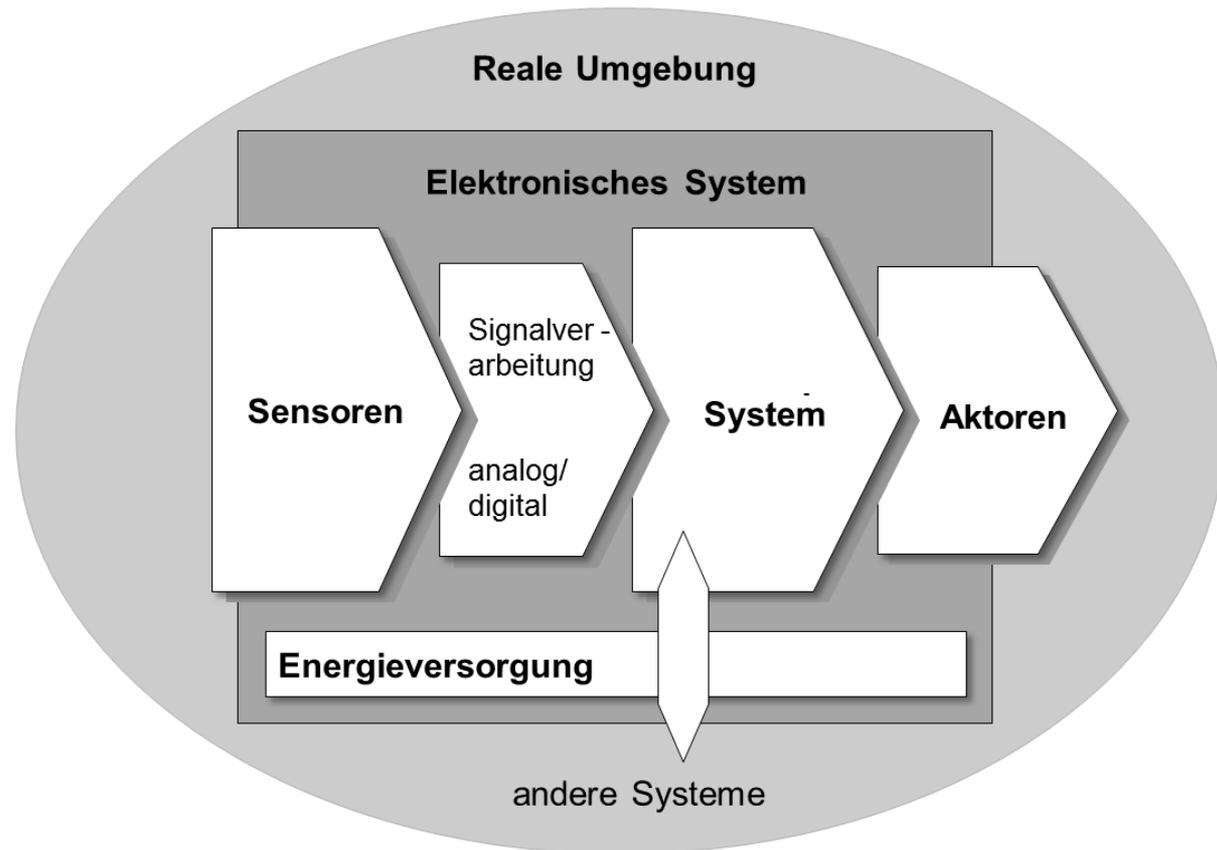
Die Mikrosystemtechnik (...) beschäftigt sich mit der Entwicklung und Herstellung von Mikrosystemen. Dabei werden beispielweise mikromechanische oder mikrooptische Bauelemente mit mikroelektronischen Schaltung in einem komplexen System kombiniert und integriert

## ■ Meine Definition eines Mikrosystems

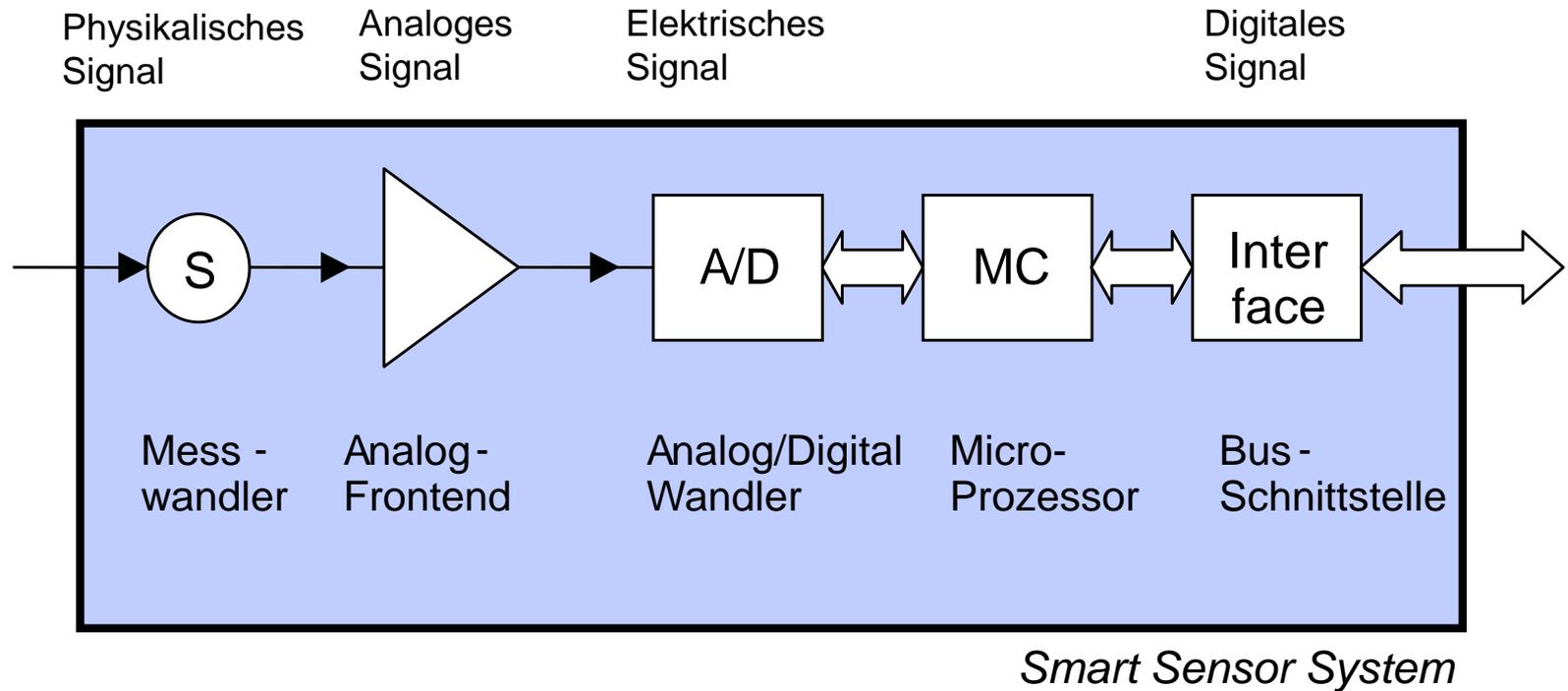
Ein Mikrosystem ist ein System, zu dessen Herstellung wenigstens **zwei verschiedene Mikrotechniken** eingesetzt werden und das Funktionselemente mit **Strukturgrößen im Mikrometerbereich** besitzt.

# Begriffe der Mikrosystemtechnik

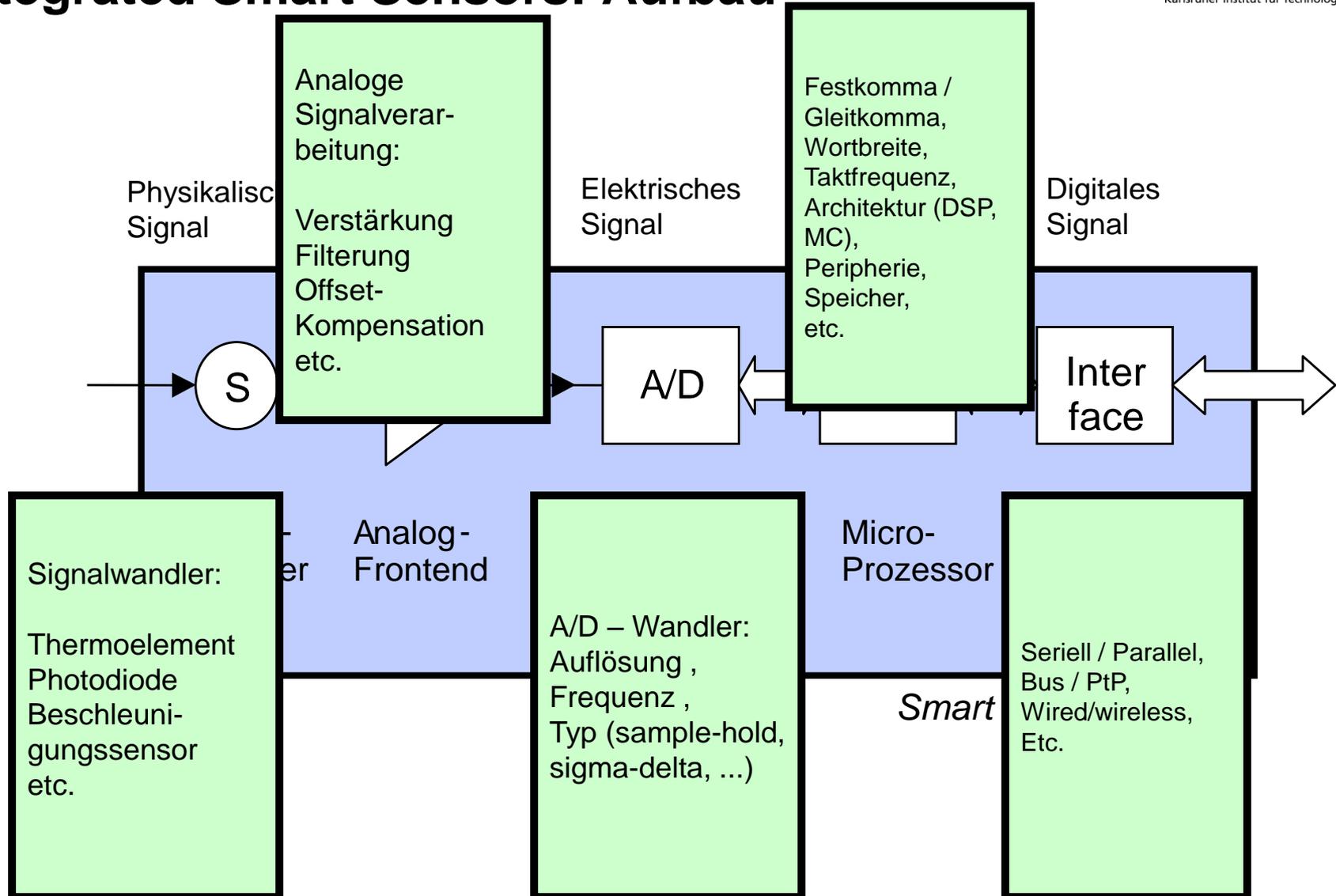
- Genereller Aufbau eines Mikrosystems
- In Mikrosystemen wirken Sensoren, Aktoren und Datenverarbeitung zusammen.



# Integrated Smart Sensors: Aufbau



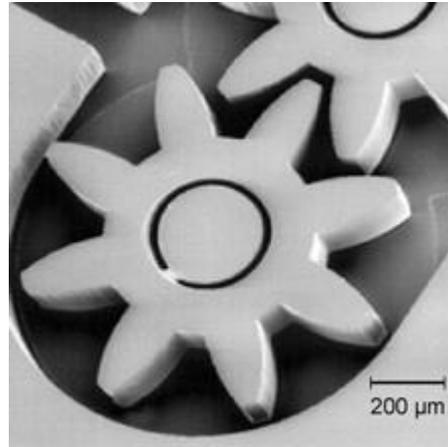
# Integrated Smart Sensors: Aufbau



# Begriffe der Mikrosystemtechnik

- Mikrotechniken:

- Mikromechanik

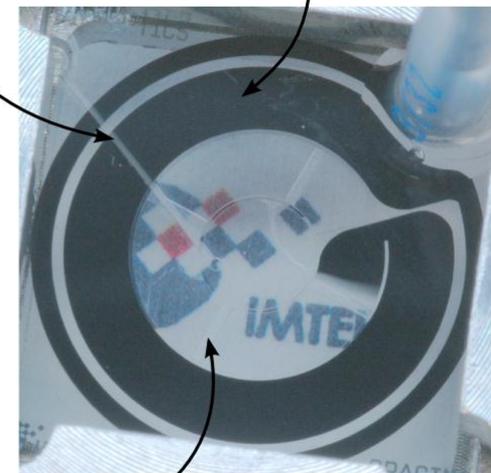
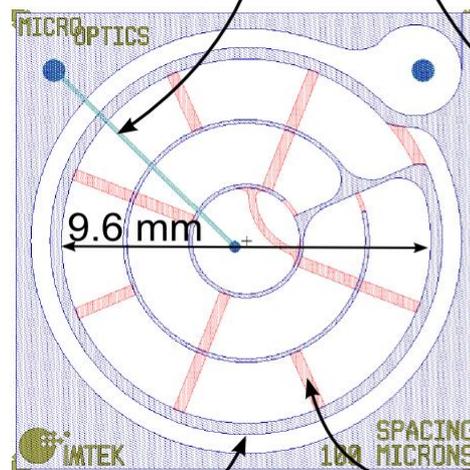


- Mikrofluidik

Buried microfluidic channel

Pigment dispersion

- Mikrooptik



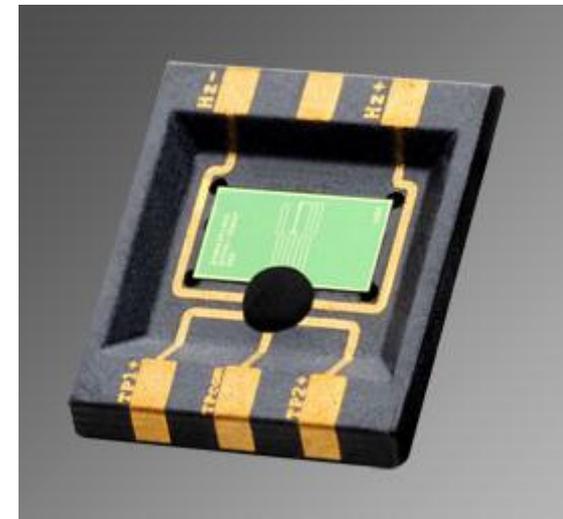
- Mikroelektronik

Walls

Pinning barriers for flow control

# Begriffe der Mikrosystemtechnik

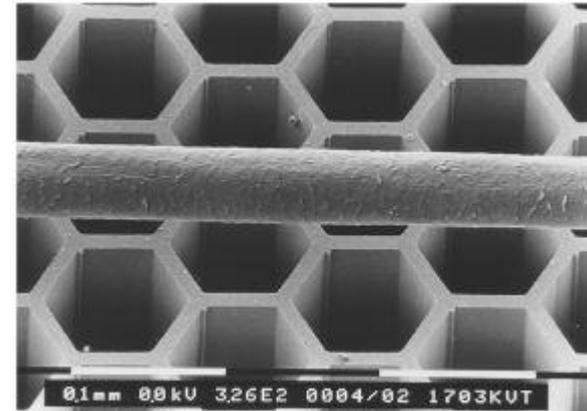
- Integration von Mikrosystemen:
  - monolithisch
  - Hybrid  
(Strömungssensor zur  
Luftmengenregelung)
  - fluidische, mechanische und  
elektrische Funktionsintegration



Quelle: 2e-mechatronic)

# Begriffe der Mikrosystemtechnik

- Fertigungstechniken:
  - Dünnschichttechnik
  - Ätztechnik
  - Abformtechnik (LIGA)
  
- Werkstoffe:
  - Halbleiter
  - Metalle
  - Keramik
  - Kunststoffe
  - und viele mehr



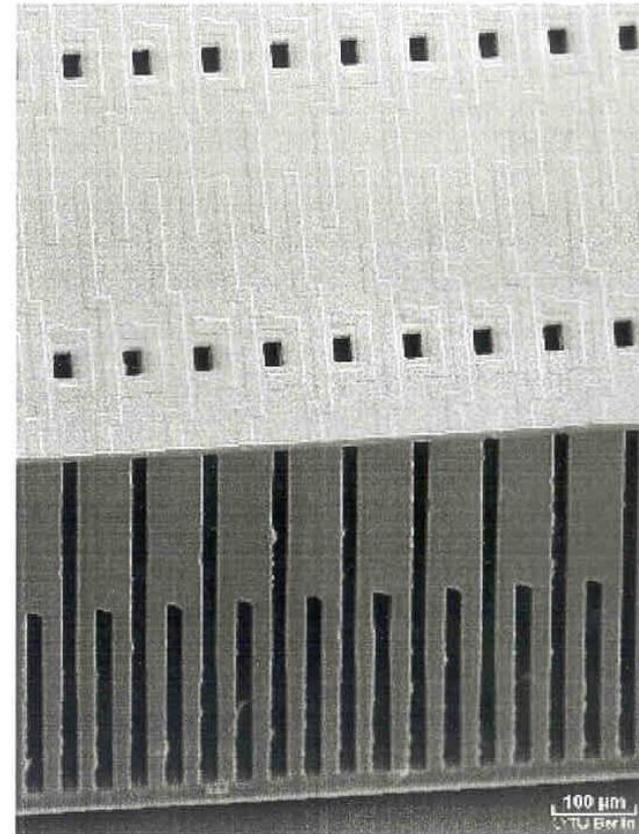
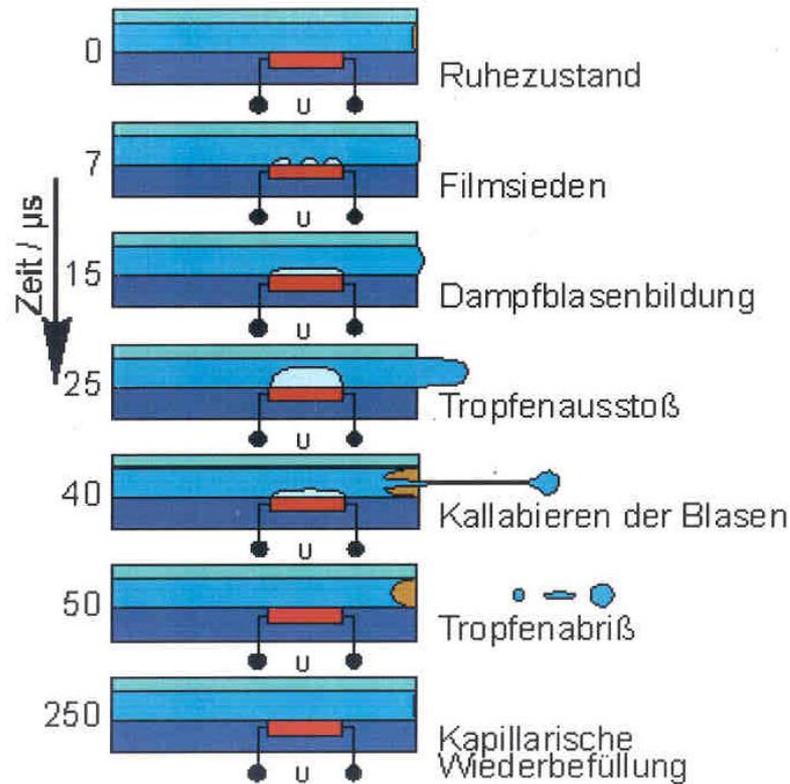
Mikrofilter in LIGA-Verfahren

# Begriffe der Mikrosystemtechnik

- Anwendungen von Mikrosystemen
- Wer kennt Beispiele aus dem Alltag?



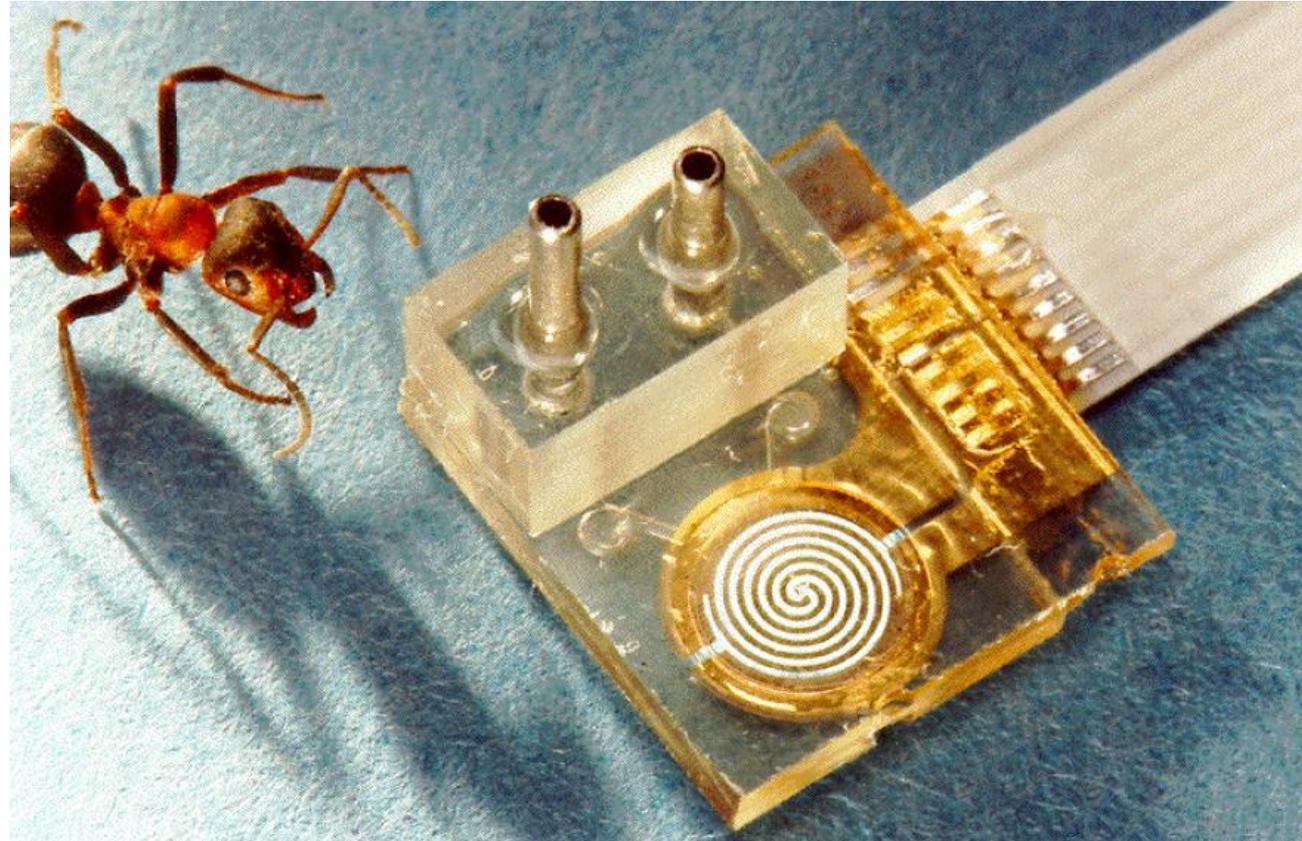
# Tintenstrahldrucker



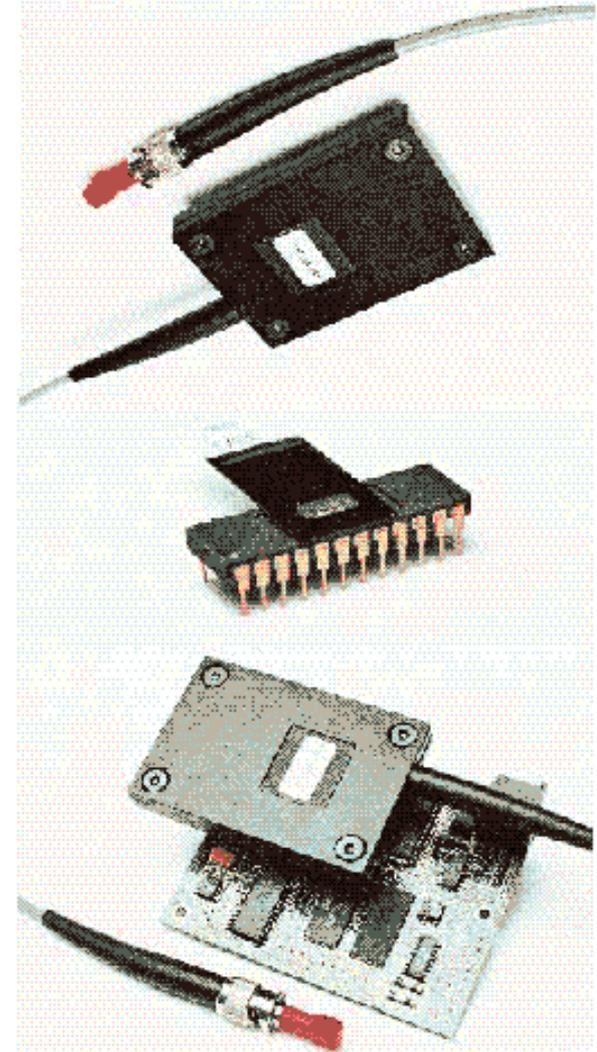
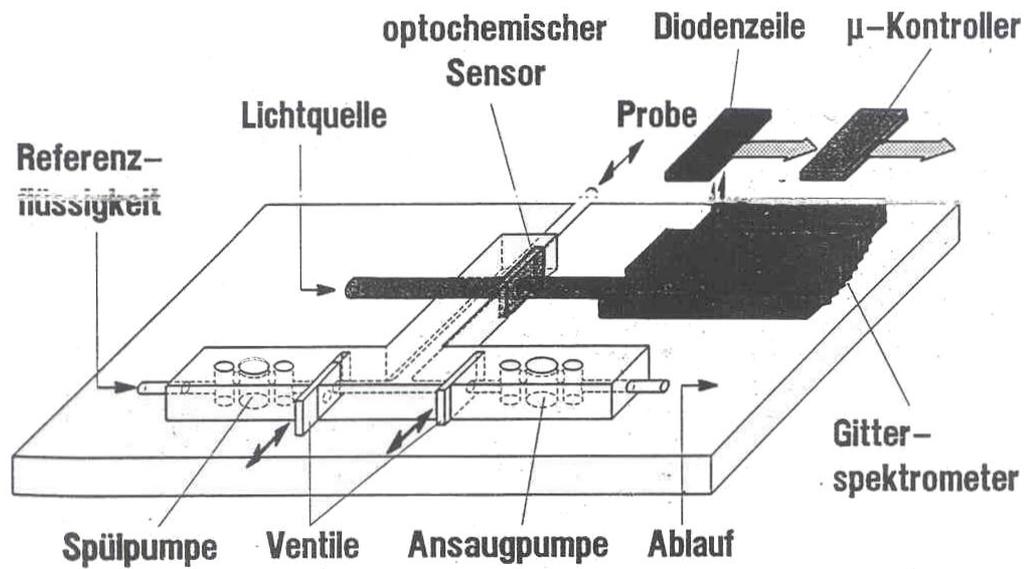


# Mikromembranpumpe

Mikromembranpumpe, zentrale Komponente eines Mikrofluidsystems. Ihre Herstellung erfordert die Beherrschung mehrerer Mikrotechniken.  
Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK)



# Optischer Schadstoffanalysator





Phonak: Hörgerät

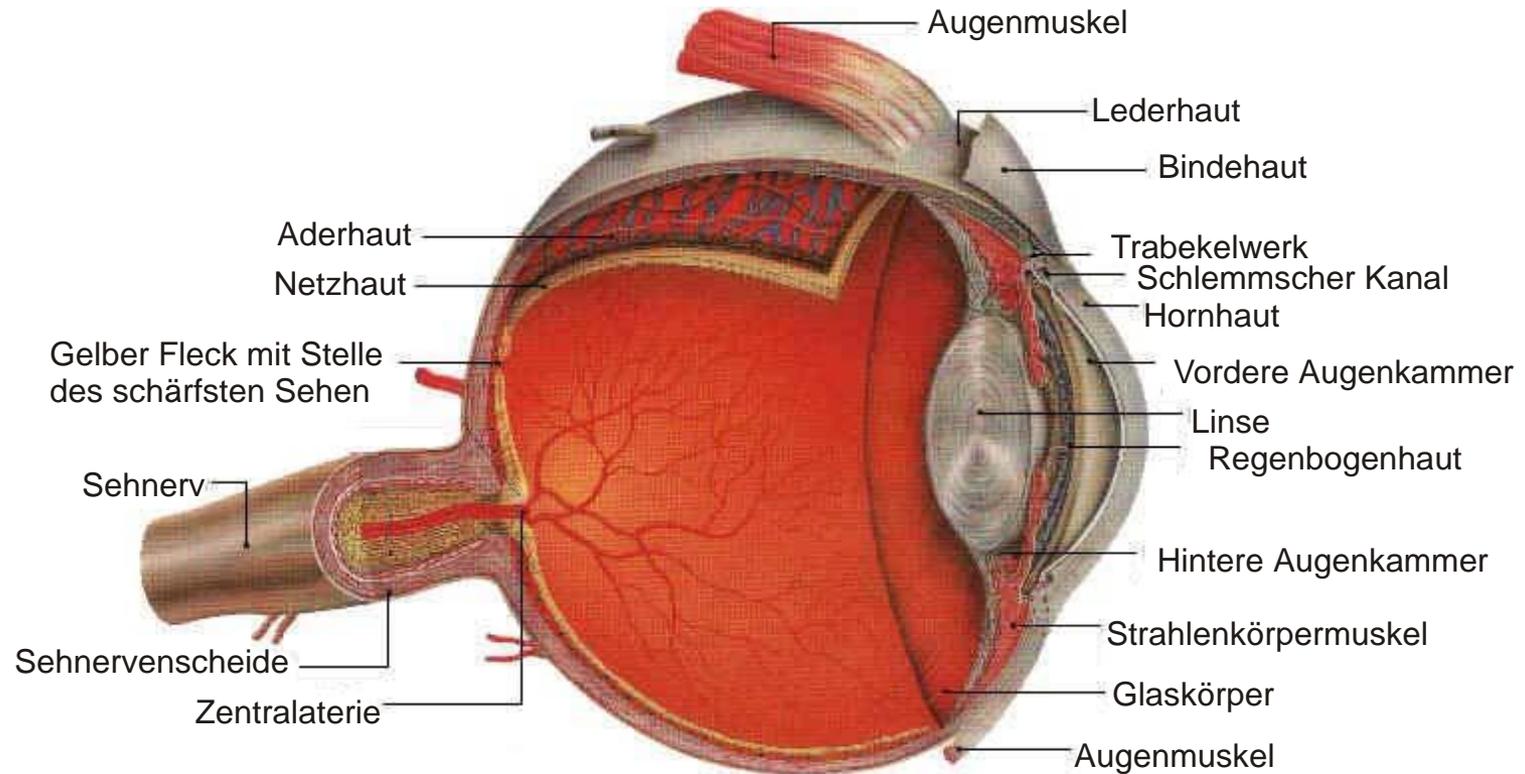


Biotronik: Herzschrittmacher



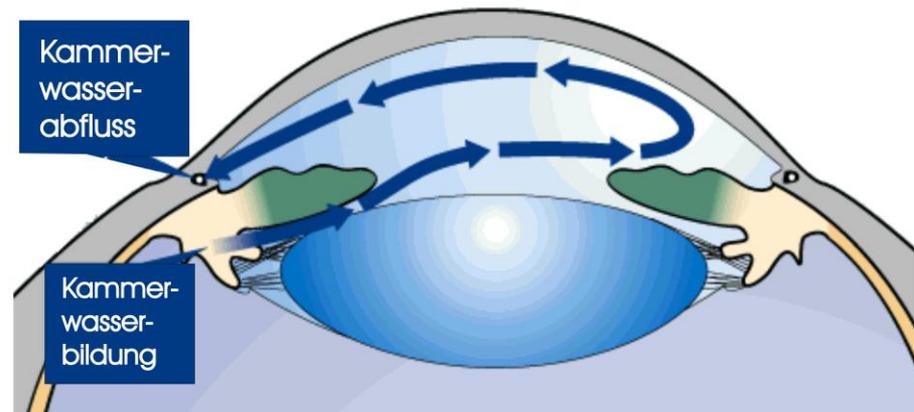
IR-Ohrthermometer

# Mikrosystemtechnik in der Ophthalmologie



# Mikro-optisches Tonometer

- Warum Augeninnendruckmessung ?
  - Hauptursache für Glaukomerkrankung

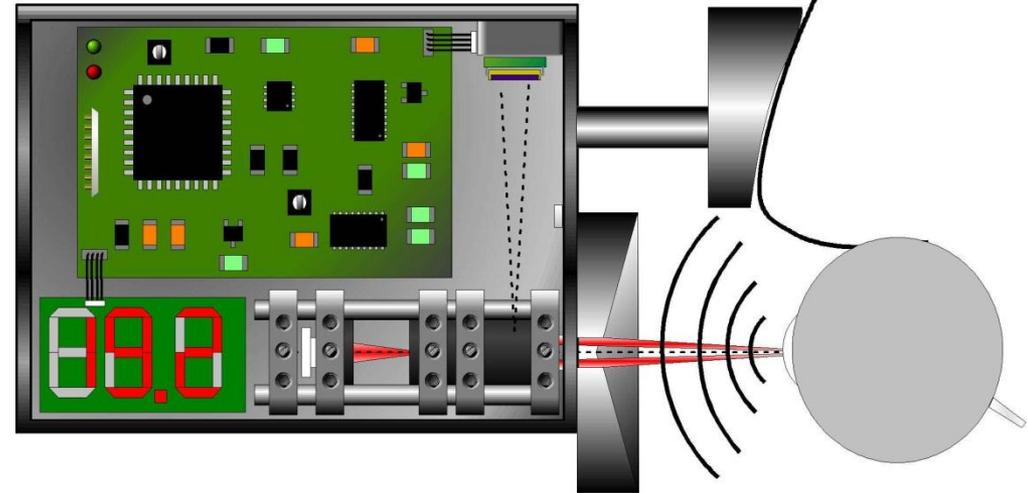


- Glaukom: Schädigung des Sehnervs und der Sehzellen
- 50 % Normaldruckglaukom
- 50 % gesunde mit hohem IOP

# Messprinzip

## ■ Idee

- Resonanzfrequenzen des Auges steigen mit wachsendem IOP



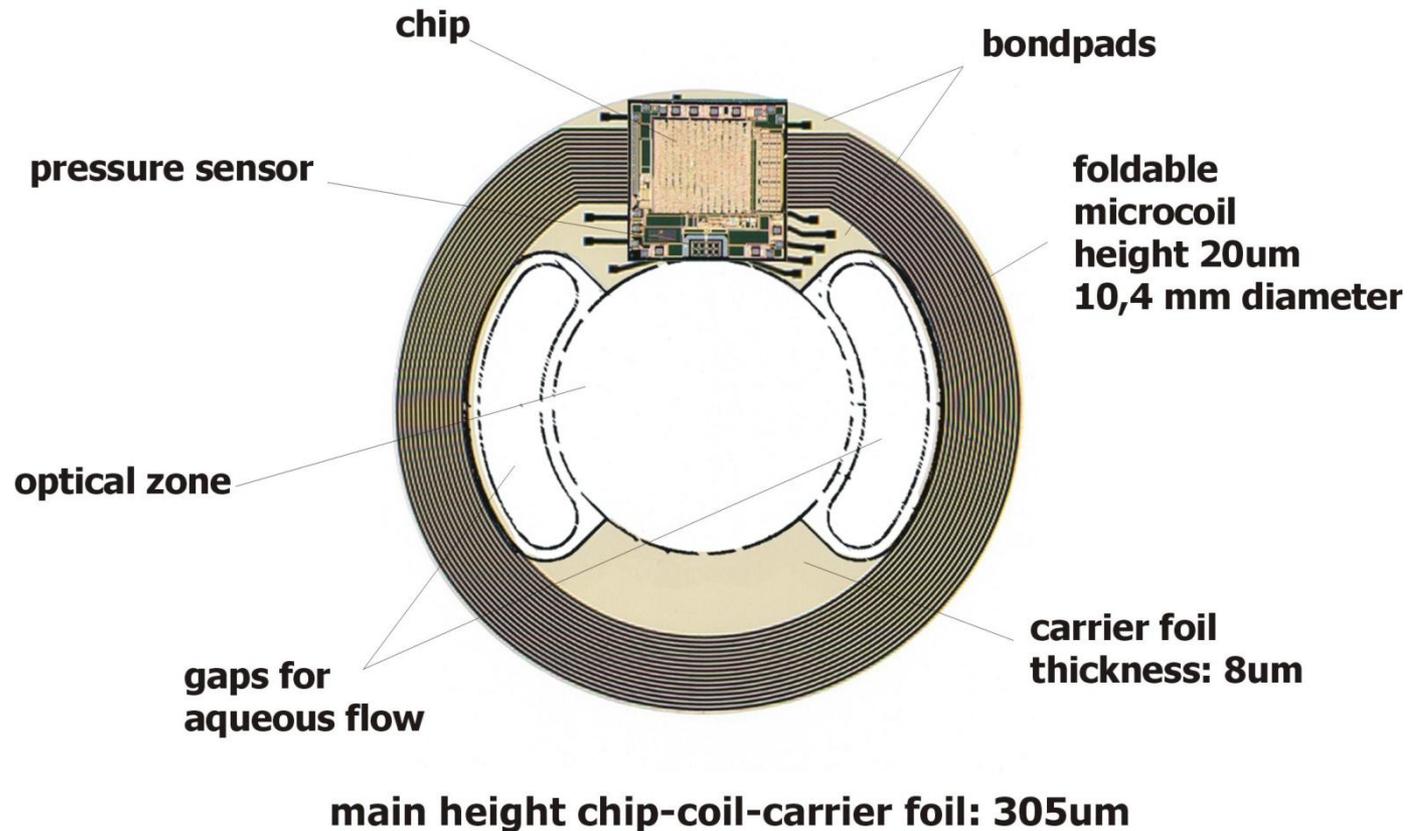
## ■ Neues Messprinzip

- Kontaktlose, akustische Schwingungsanregung des Auges
- Berührungslose, optische Messung der Schwingungen
- Sweep der Anregungsfrequenz  $\leftrightarrow$  Resonanzfrequenzen des Auges
- Berechnung des IOP aus den Resonanzfrequenzen

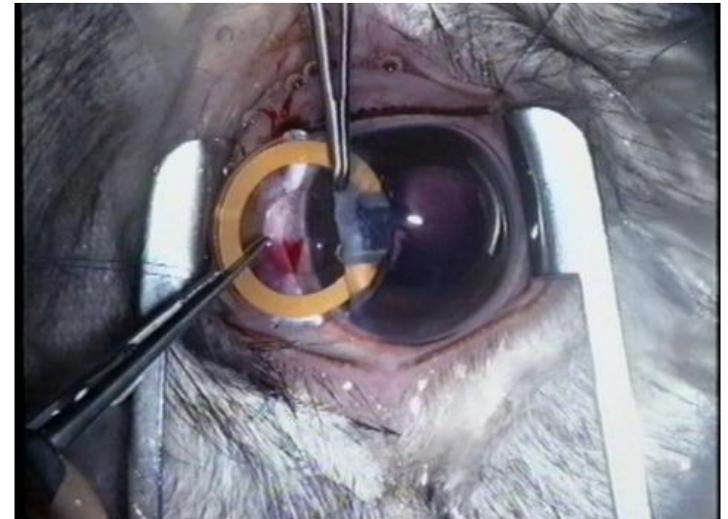
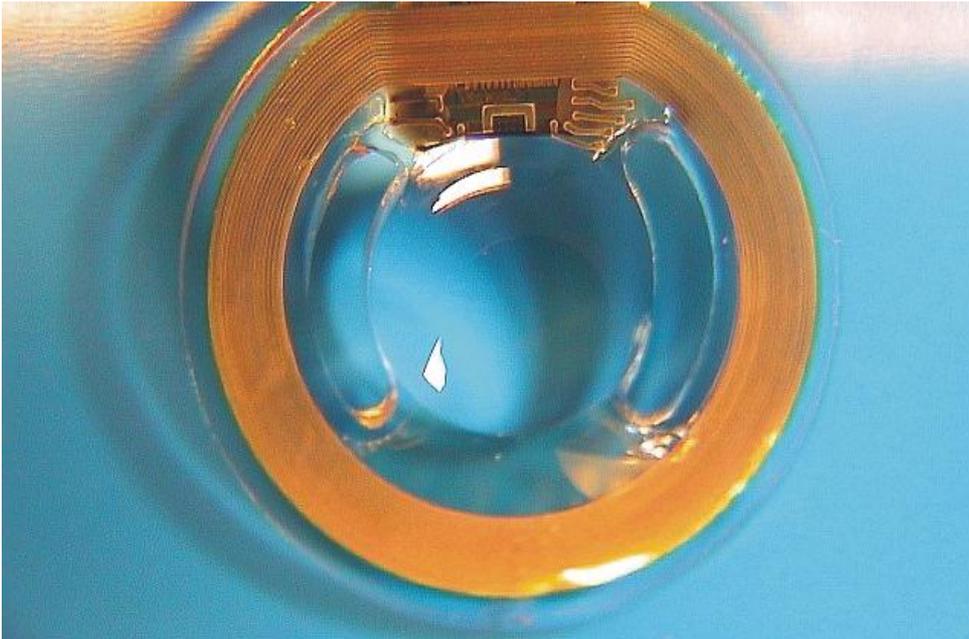
## ■ Vorteile

- Berührungslos
- Sehr geringe Krafteinwirkung
- Schmerzfrei
- Ermöglicht Selbsttonometrie

# Implantierbarer Augeninnendrucksensor mit Intraokularlinse



# Implantation in ein Kaninchenauge

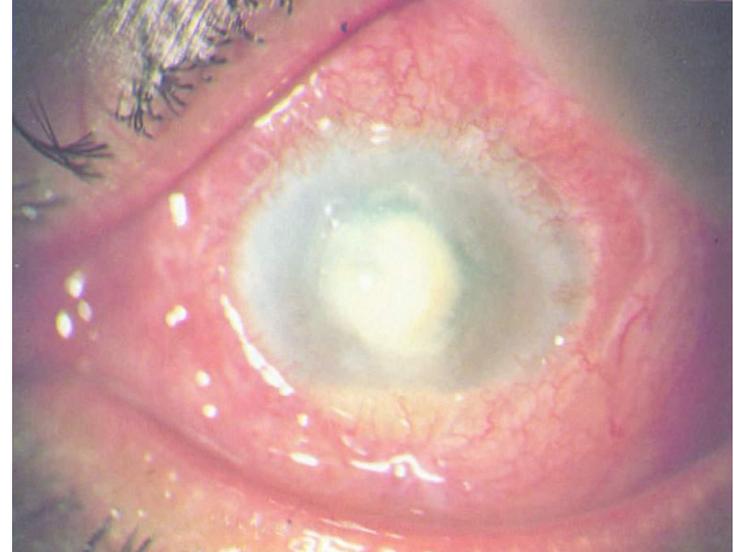


## BMBF-Projekt mit Projektpartnern:

**Acritec GmbH, Glienicke, Bytec GmbH, Stolberg, Mesotec GmbH, Hannover, Universitätsaugenklinik Köln, FhG-IMS, Duisburg, Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik I, RWTH Aachen, Institut für Pathologie, RWTH Aachen**

# Erkrankungen der Cornea (Hornhaut)

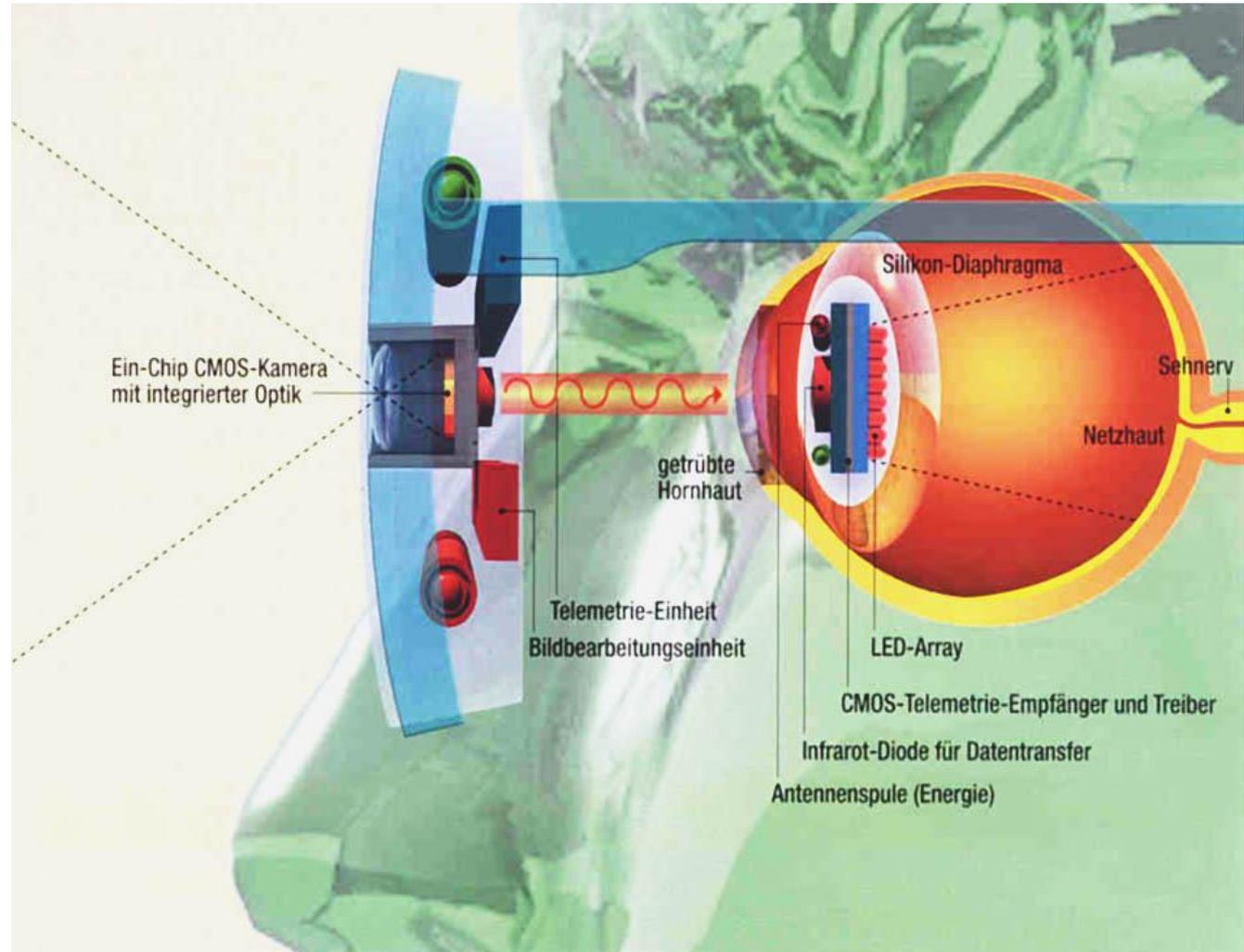
- ca. 3 Mio. Arztbesuche wegen Erkrankungen der Cornea in Deutschland
- ca. 13.000 Corneatransplantationen werden pro Jahr durchgeführt.
- ca. 4.000 Menschen sind wegen irreversibler Schädigung der Cornea erblindet.
- ca. 3.000 von diesen besitzen eine intakte Retina.
- Weltweit sind mehrere Mio. Menschen am Trachom (Ägyptische Krankheit) erkrankt, die Blindheit durch irreversible Schäden der Hornhaut erzeugt.



# Implantierbare Miniferseher

Idee von  
Prof. Heimann<sup>+</sup>,  
Uni Köln

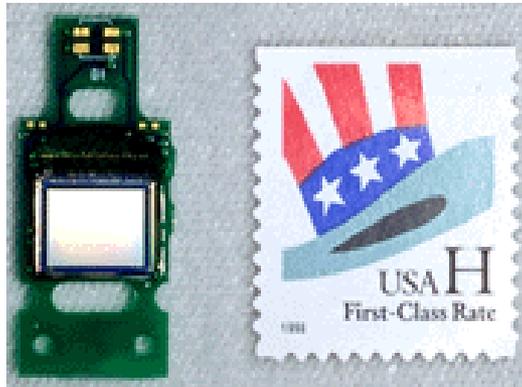
DFG-Projekt:  
Uni Köln  
Uni Tübingen  
Uni Duisburg  
ITIV Karlsruhe



GEO 1/2001

# Beispiele für Mikrodisplays

## Microdisplay MD800G4



LCD

No of Pixels: 800 x 600

Pixelsize: 10 x 10  $\mu\text{m}^2$

Size: 1 x 1  $\text{cm}^2$

Frame rate: 180 Hz

## Kopin CyberDisplay 320



LCD

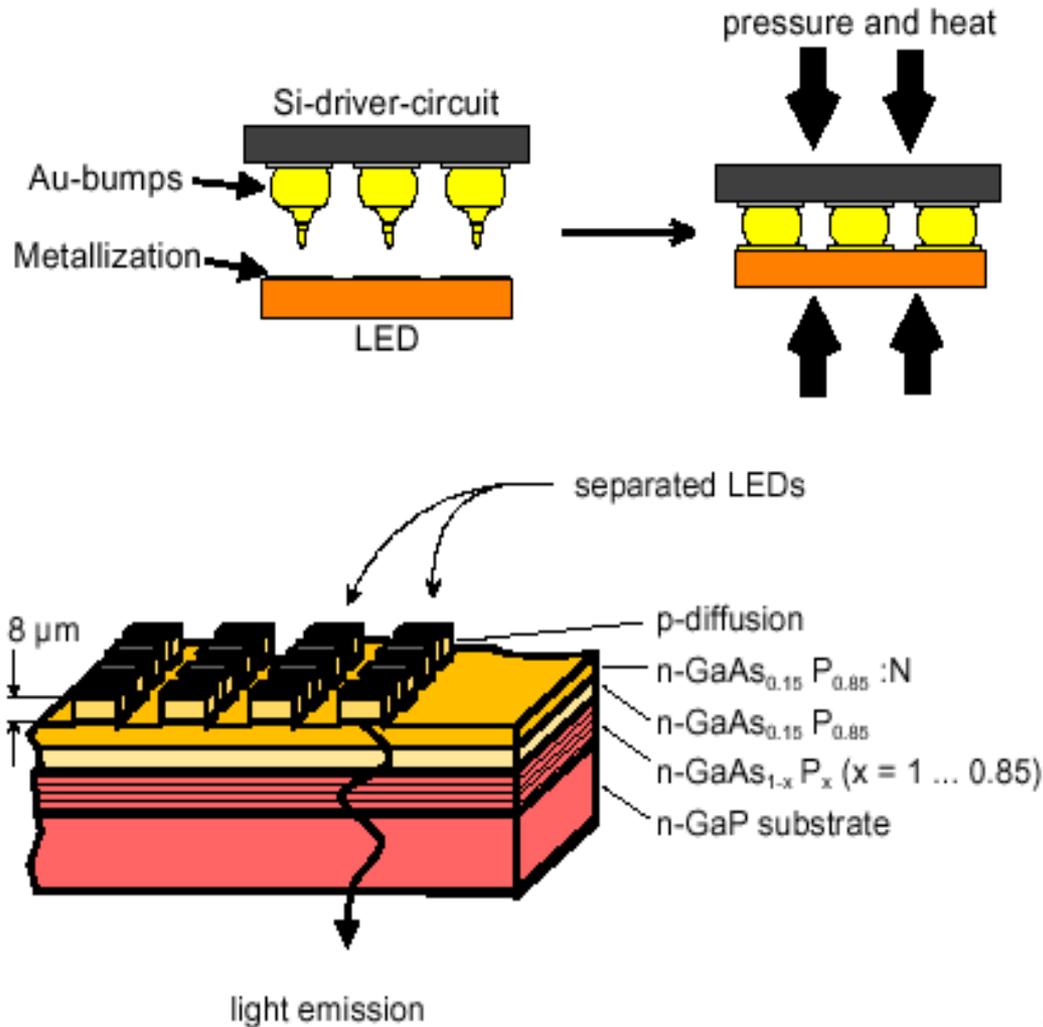
No of Pixels: 320 x 240

Pixelsize: 15 x 15  $\mu\text{m}^2$

Size: 0.7 x 0.7  $\text{cm}^2$

Frame rate: 80 Hz

# GaAs/GaP LED-Array mit Si-Treiberelektronik



(Quelle: OE-Duisburg)

# Testdummy im Kaninchenauge



# Eye tracking

Zusätzlich zur Videokamera für die Bildaufnahme wird noch ein System zur Verfolgung der Augenbewegung benötigt .

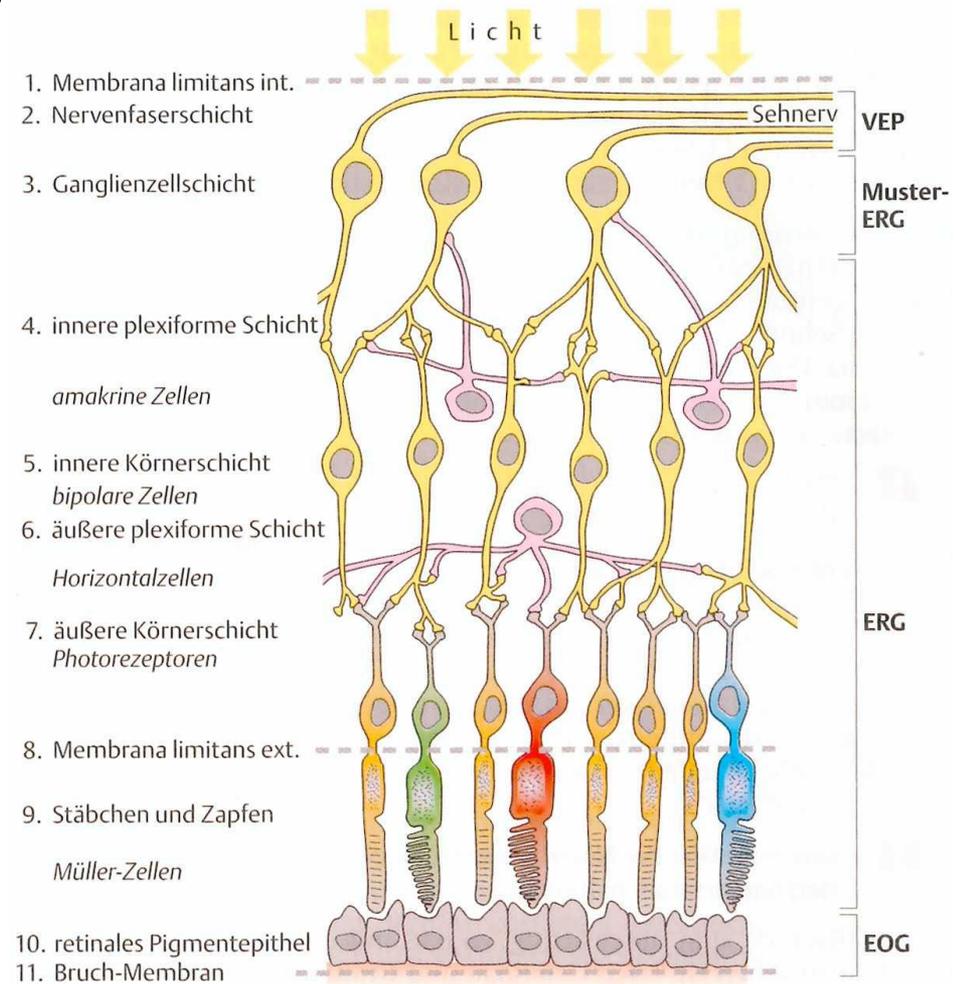
Es wird benötigt, um das Bild synchron mit den Augenbewegungen schieben zu können .



(Quelle: GEO)

# Erkrankungen der Retina (Netzhaut)

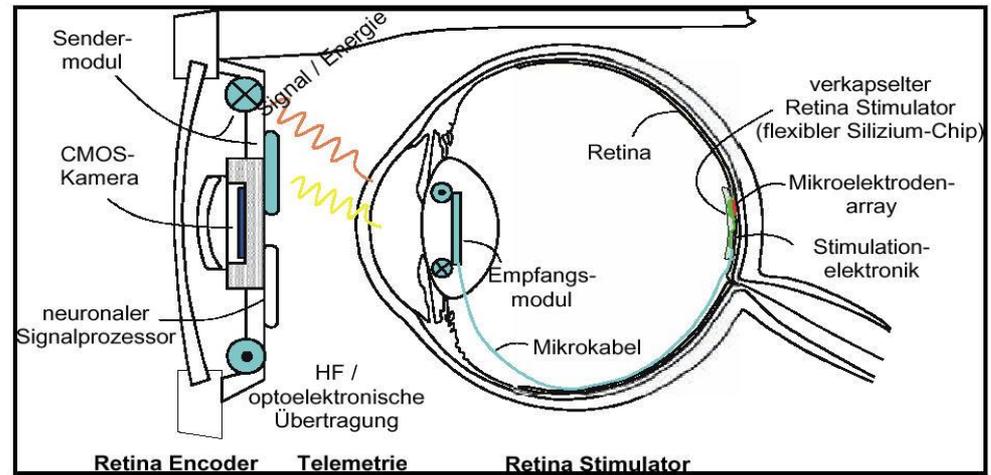
- Die Netzhaut besitzt ca. 130.000 Mio. Lichtrezeptorzellen.
- Diese Zellen erleiden u.a. Schädigungen durch die Krankheiten
  - Retinitis Pigmentosa
  - Altersbedingte Makuladegeneration
 Zusammen sind diese Erkrankungen für ca. 40.000 Blinde verantwortlich



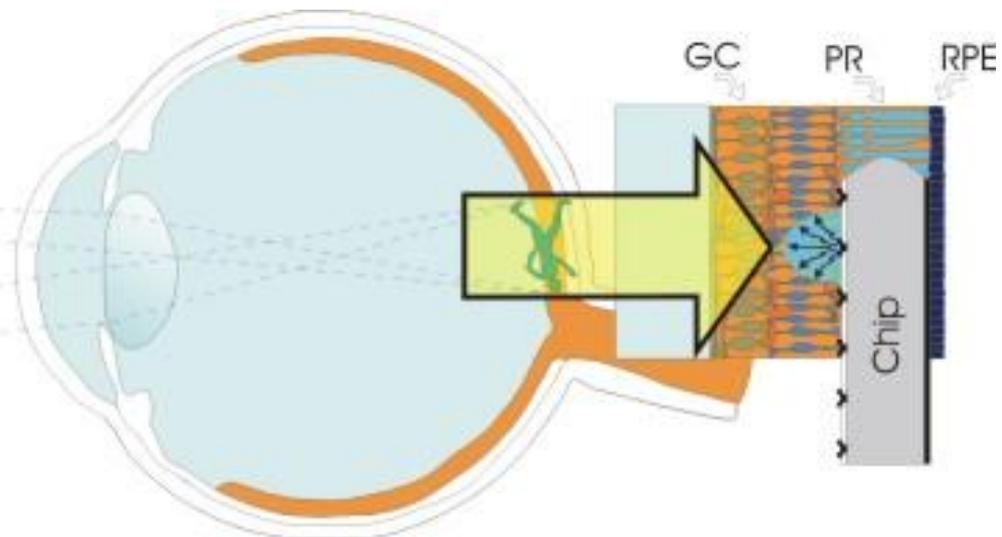
# Retinaersatz

## Epiret

Gruppe um  
Eckmiller, Bonn

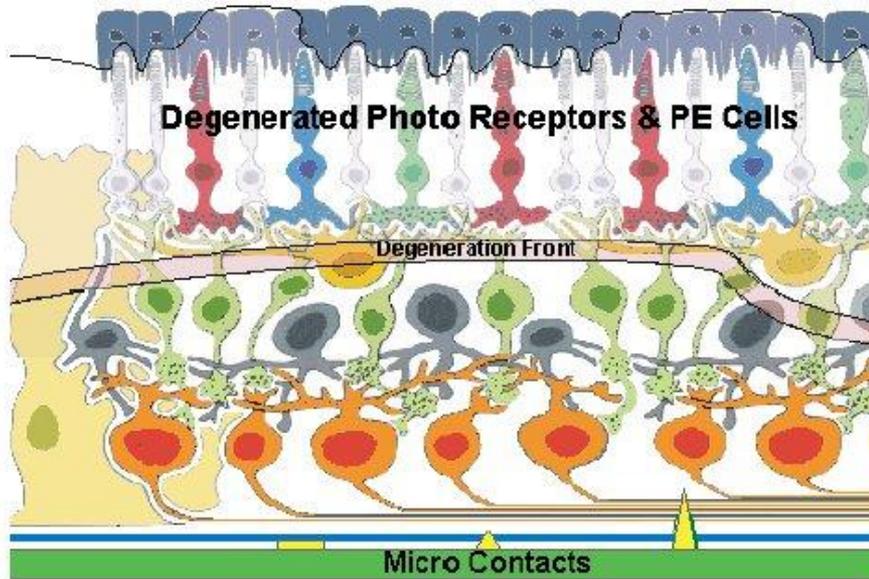


## Subretinalprojekt

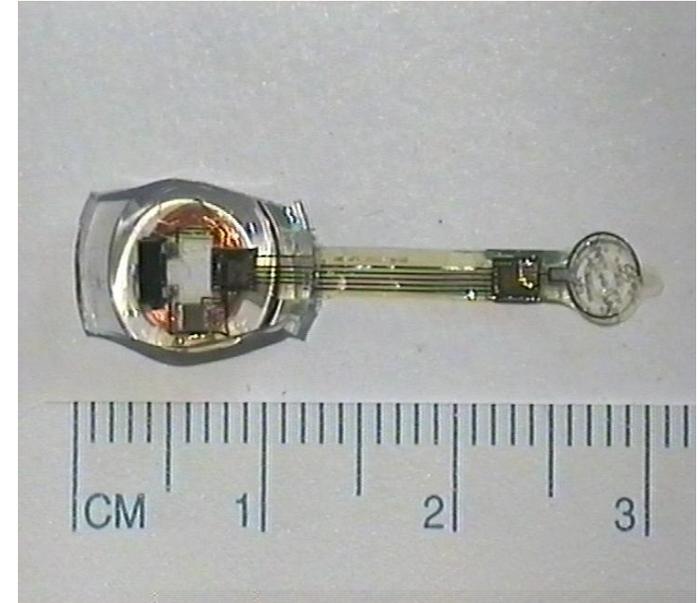


Gruppe um  
Zrenner, Tübingen

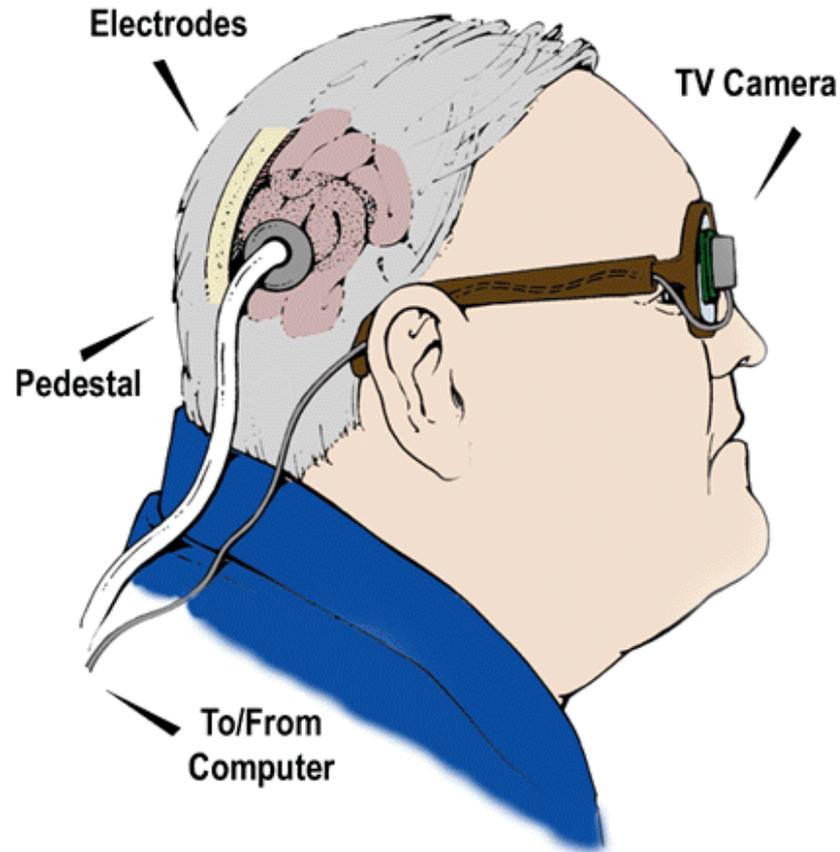
# Epiret-Projekt



Lichteinfall



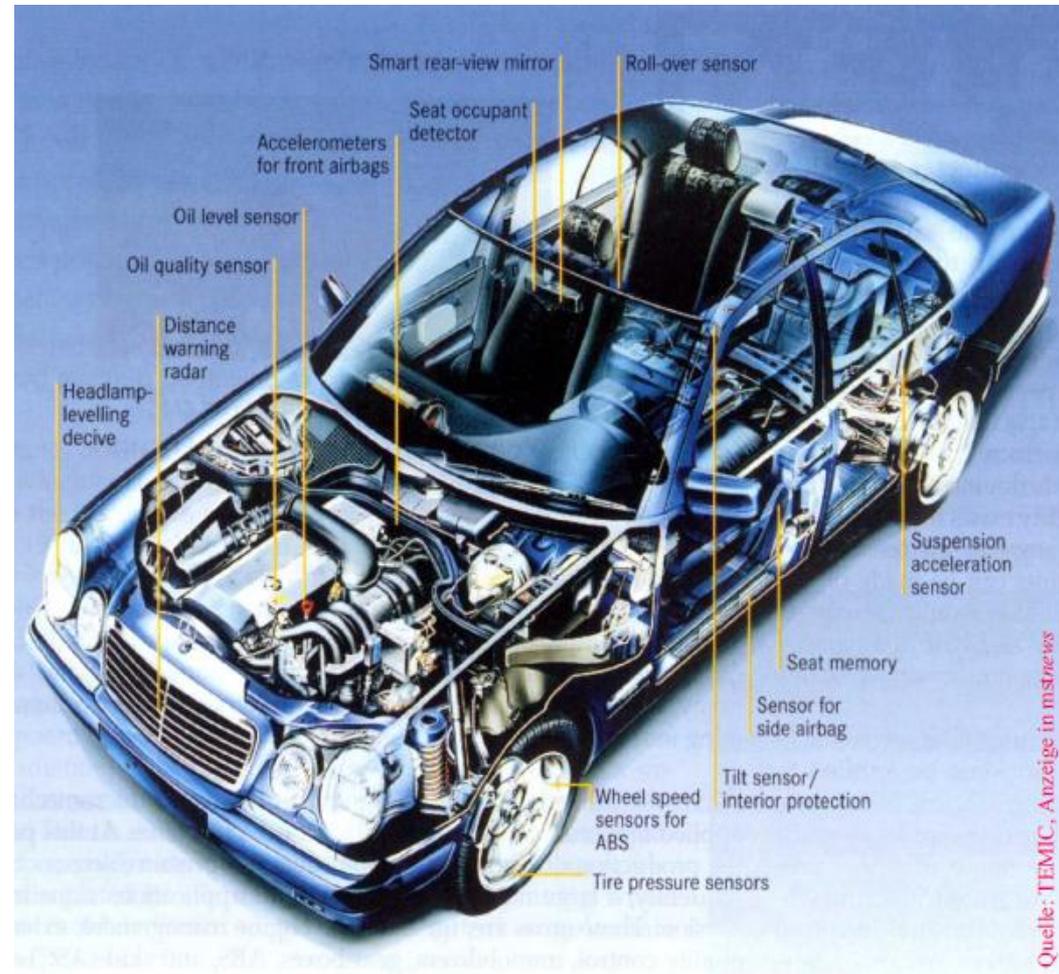
Kontaktieren der Ganglienzellen -> Vorverarbeitung der  
Bildinformation im Retina-Encoder



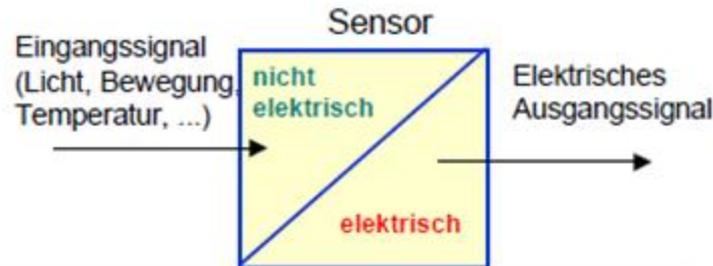
## Direkte Stimulation der Sehrinde im Gehirn

# Mikrosystemtechnik im Automobil

- Heute bereits eine Vielzahl von Funktionen:
    - Diverse Sensoren
    - Aktoren / Motoren
    - Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik
  
  - Bedarf: möglichst kleine und leichte Lösungen
- ⇒ Miniaturisierung



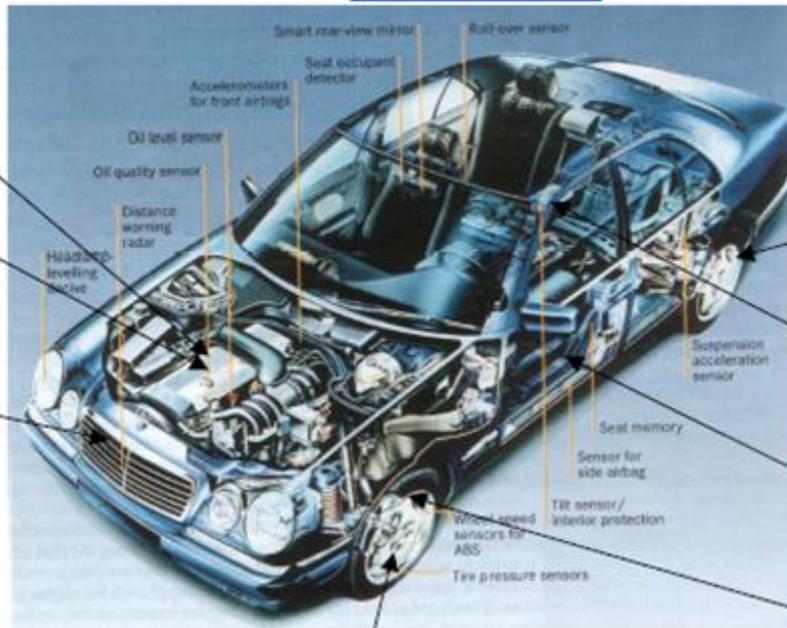
# Ausgewählte Sensortypen



Ölqualitätssensor (optisch)

Ölstandssensor (kapazitiv)

Abstandswarner (optisch)



Beschleunigungssensor (piezoelektrisch, piezoresistiv)

Neigungswinkelsensor = Beschleunigungssensor

Airbagsensor = Drucksensor

Reifendrucksensor

Sensor zur Messung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Räder (magnet-resistiv)

Bildquelle: <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7180-49-67176-1-0-0-0-0-0-66-7165-0-0-0-0-0-0-0,00.html>

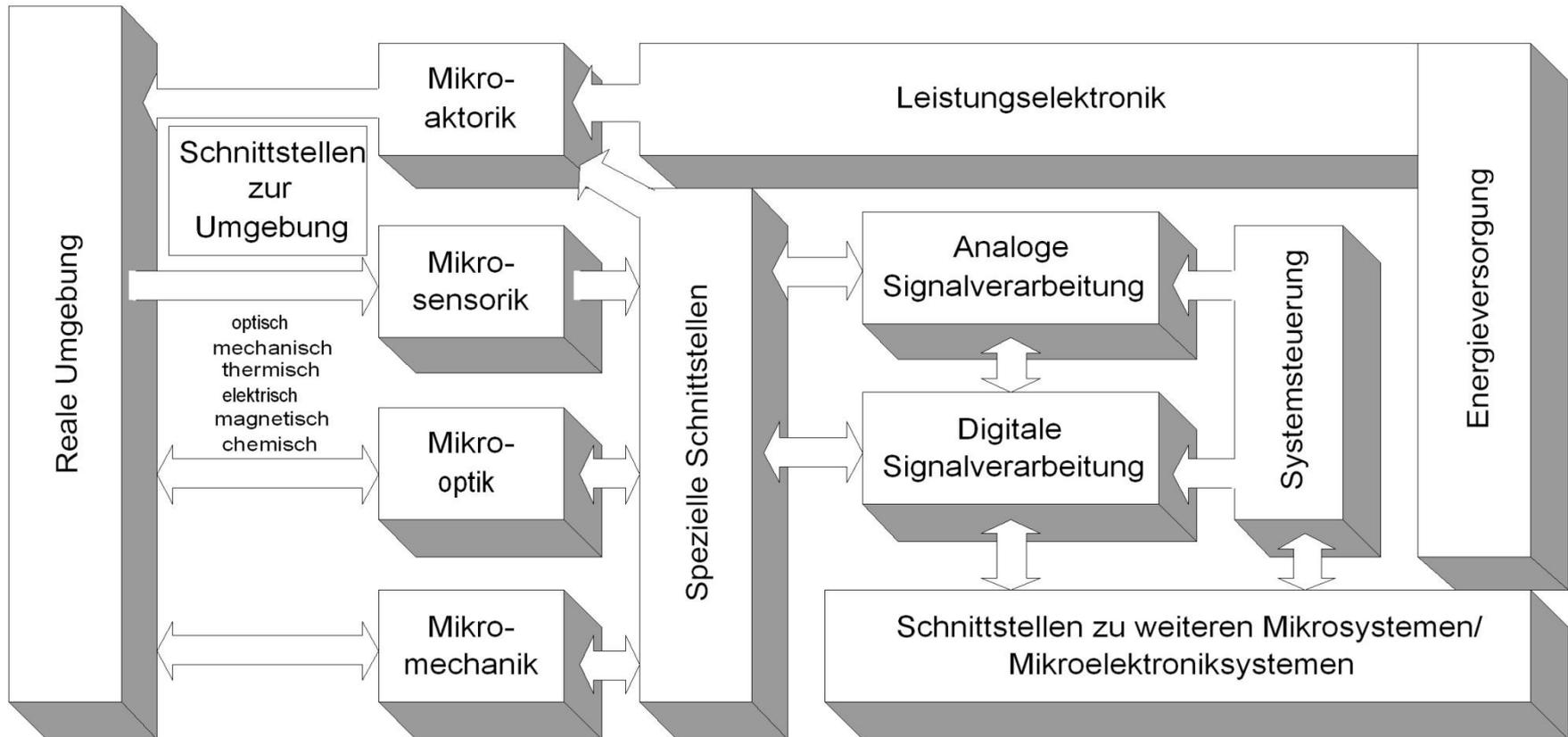
# ÜBERBLICK ÜBER MIKROSYSTEME

# Historie

- Beginn 80er : Nutzung der Mikrostrukturtechnik zur Herstellung von:
  - Mikromechanischen Elementen auf Si
  - Mikrooptischen Elementen auf SiO<sub>2</sub> , 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

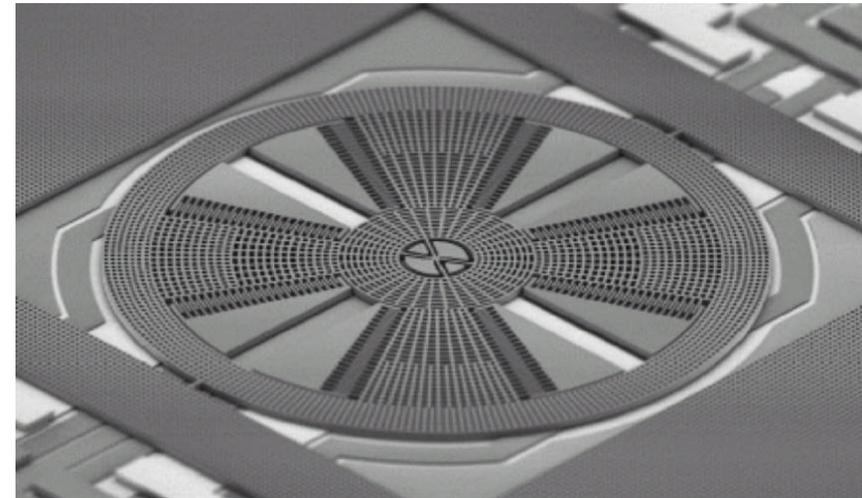
# Allgemeiner Aufbau eines Mikrosystems

## ■ 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

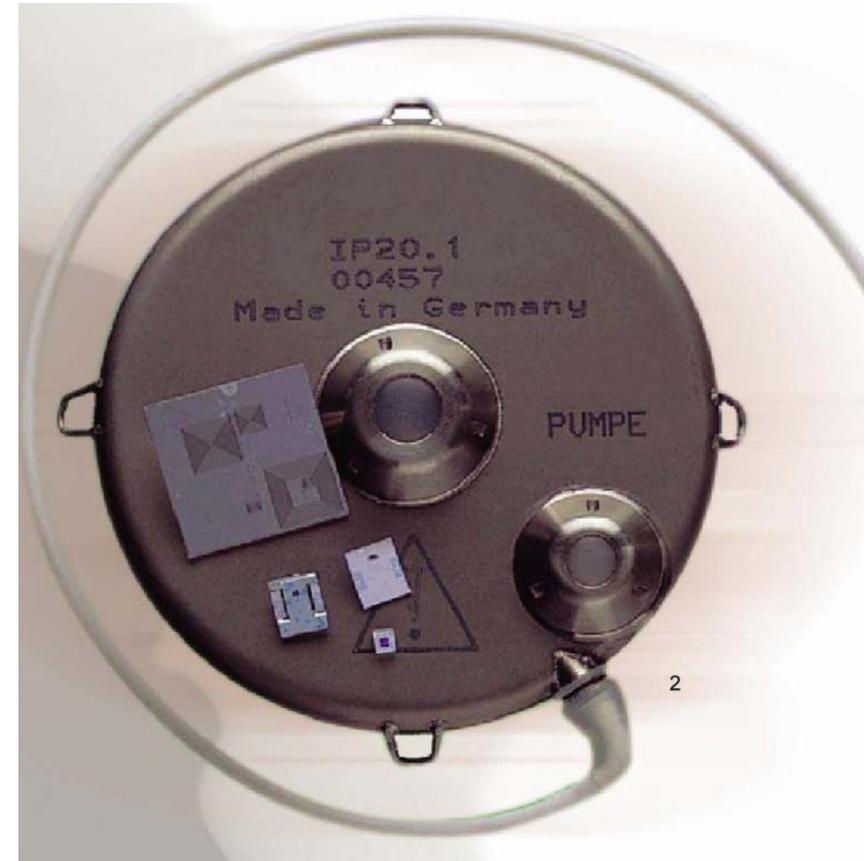
- Umwandlung elektrischer Signale in physikalische Größen (z.B. Kraft, Drehmoment, Längenänderung,...)
- Prinzipien:
  - Elektrostatik
  - Elektromagnetik
  - Piezoelektrik
  - ...



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

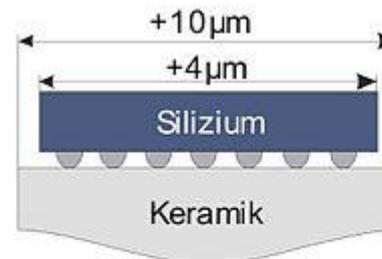
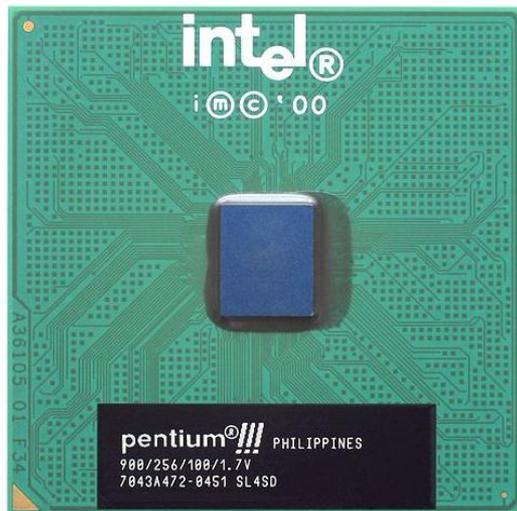
## Aufbau und Verbindungstechnik

### Probleme

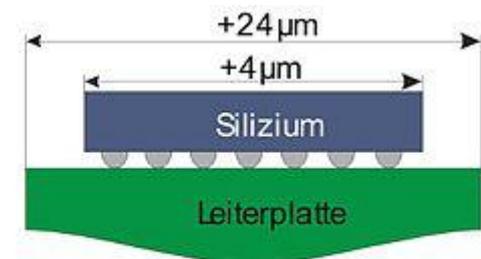
- Verschiedene Eigenschaften der
  - Komponenten
  - Materialien
  - Fügeverfahren

### Lösung

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



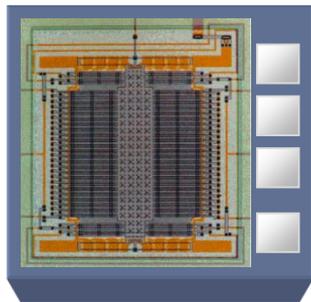
Differenz 6  $\mu\text{m}$



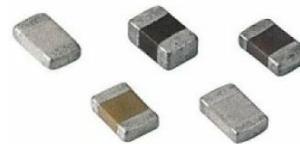
Differenz 20  $\mu\text{m}$

# Technischer Aufbau von Mikrosystemen

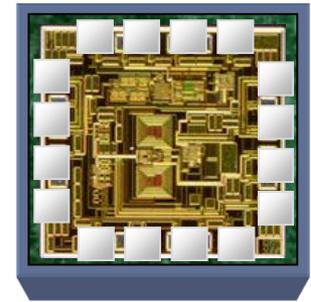
- Sensorchip: Wandlung der zu detektierenden Größe in eine elektrische Größe (C, I, U, R)
- Elektronikchip: Wandlung der elektrischen Größe in ein elektrisches Standardsignal (I, U, digitaler Ausgang)
- Diskrete Bauteile: Dienen zur Kalibrierung oder als genaue Referenzgröße, die nicht On Chip hergestellt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



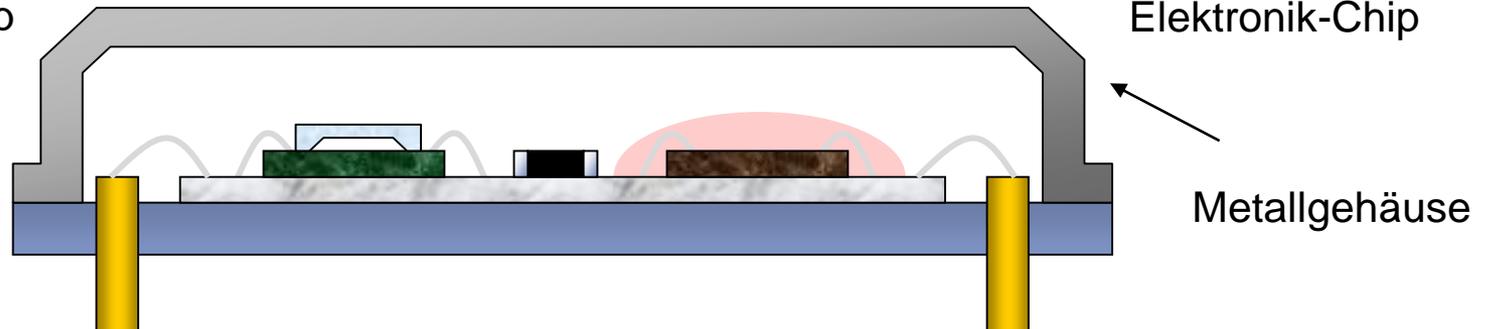
Sensor-Chip



Diskrete Bauteile  
(Widerstände, Kapazitäten)

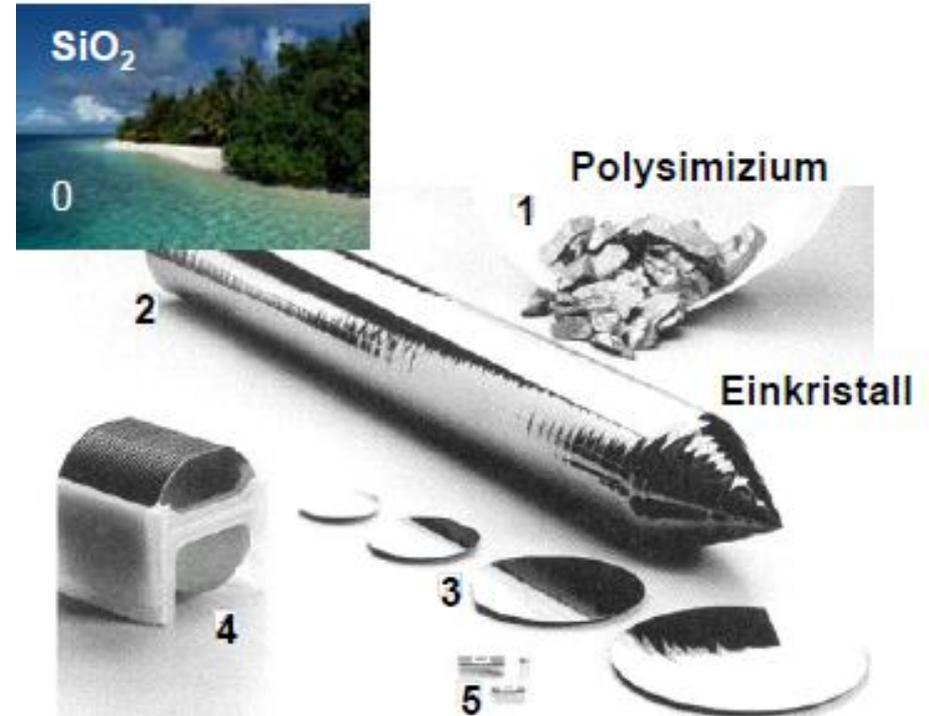
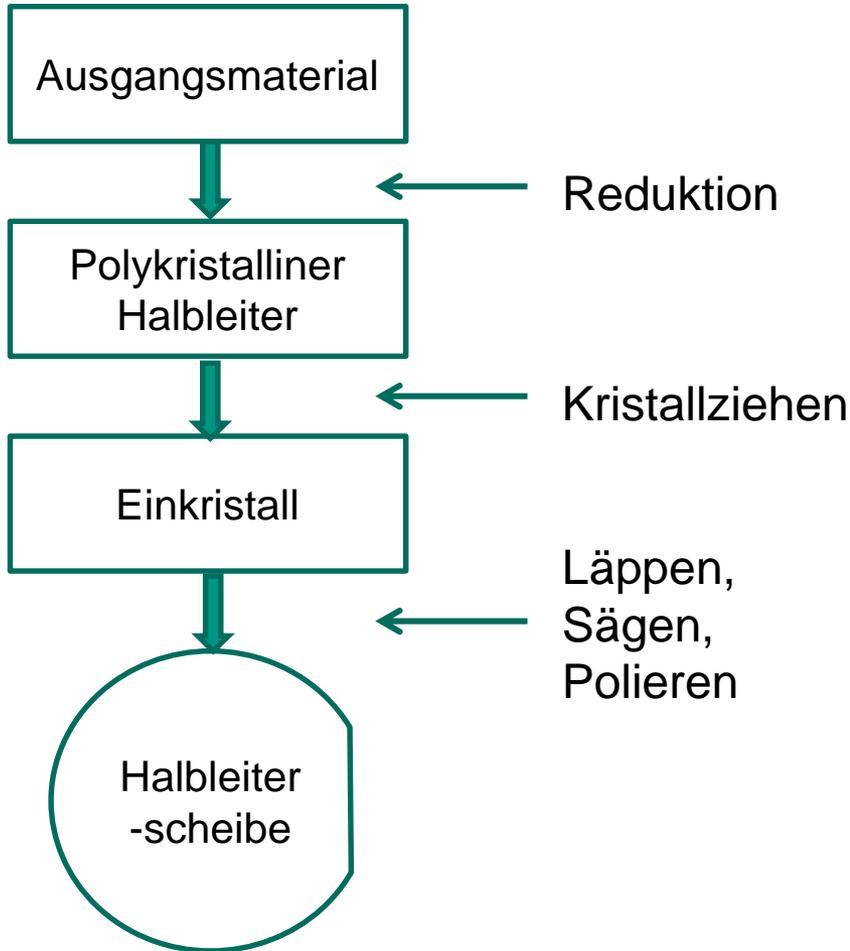


Elektronik-Chip

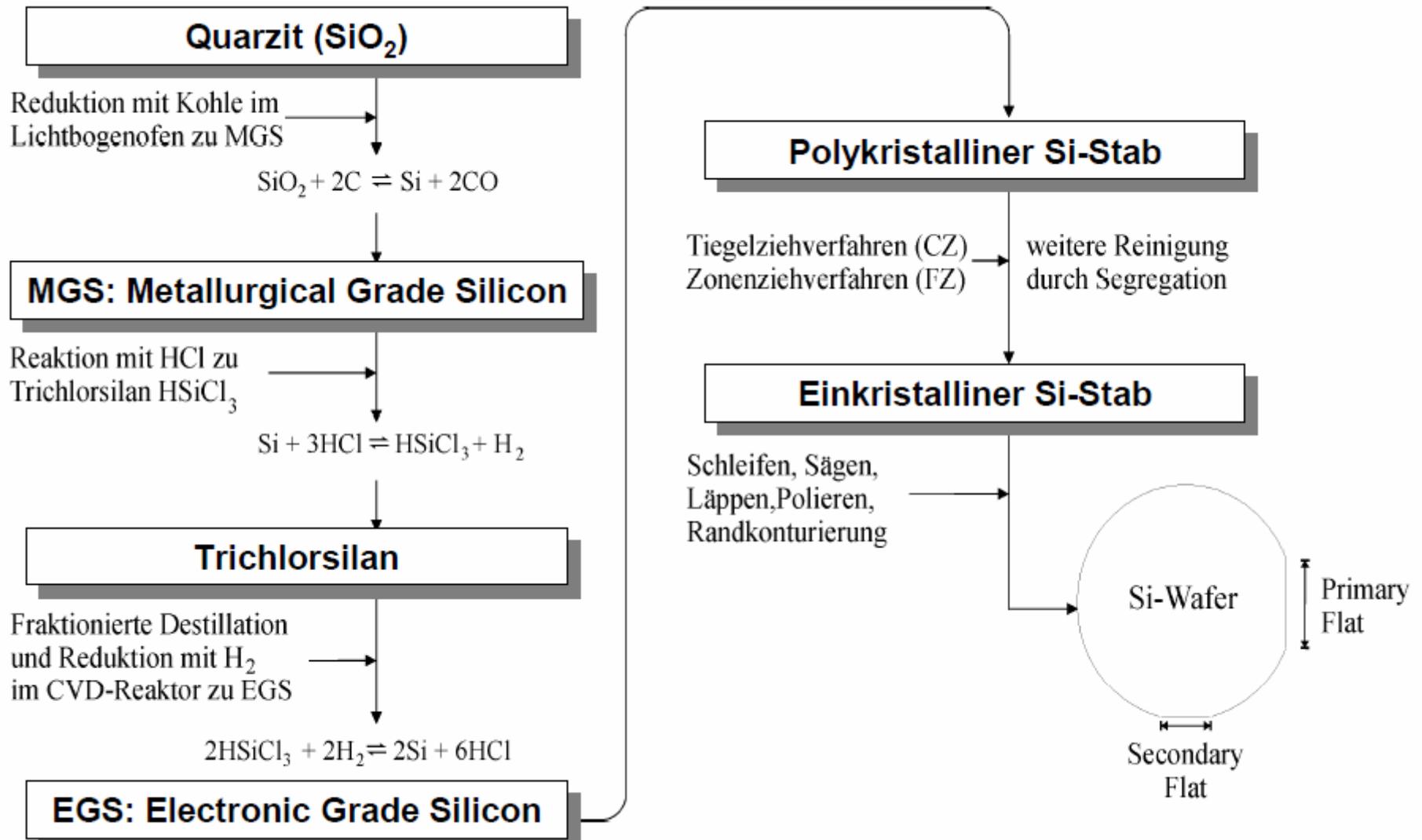


# MATERIALIEN DER MIKROSYSTEMTECHNIK

# 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  $\text{SiO}_2$  (Quarz)
- Quarz ist zu etwa 17% in der Erdkruste vorhanden
- Aus  $\text{SiO}_2$  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



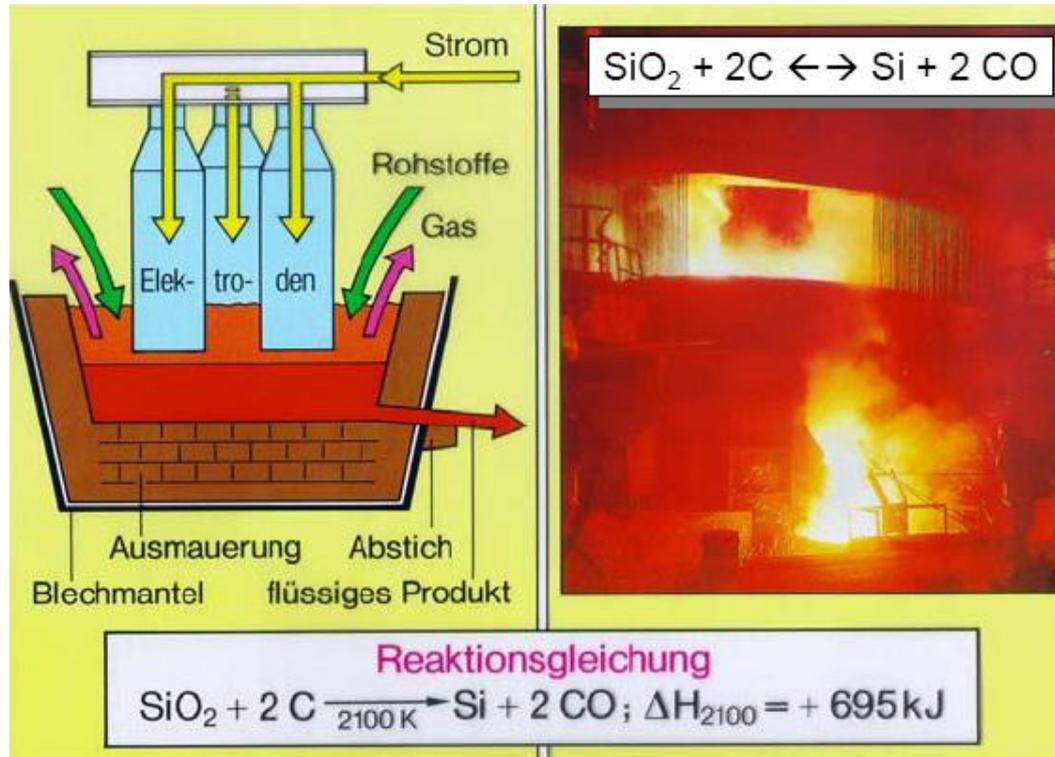
**Reinheit: 98-99%Si**  
(= technisches  
Silizium =  
metallurgical  
grade MGS)

**Bogenentladungsreaktor**



# Silizium-Herstellung

## ■ Reduktion von Quarz (SiO<sub>2</sub>) zu metallurgischem Si



$$\text{SiO}_2 + 2\text{C} \leftrightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$$

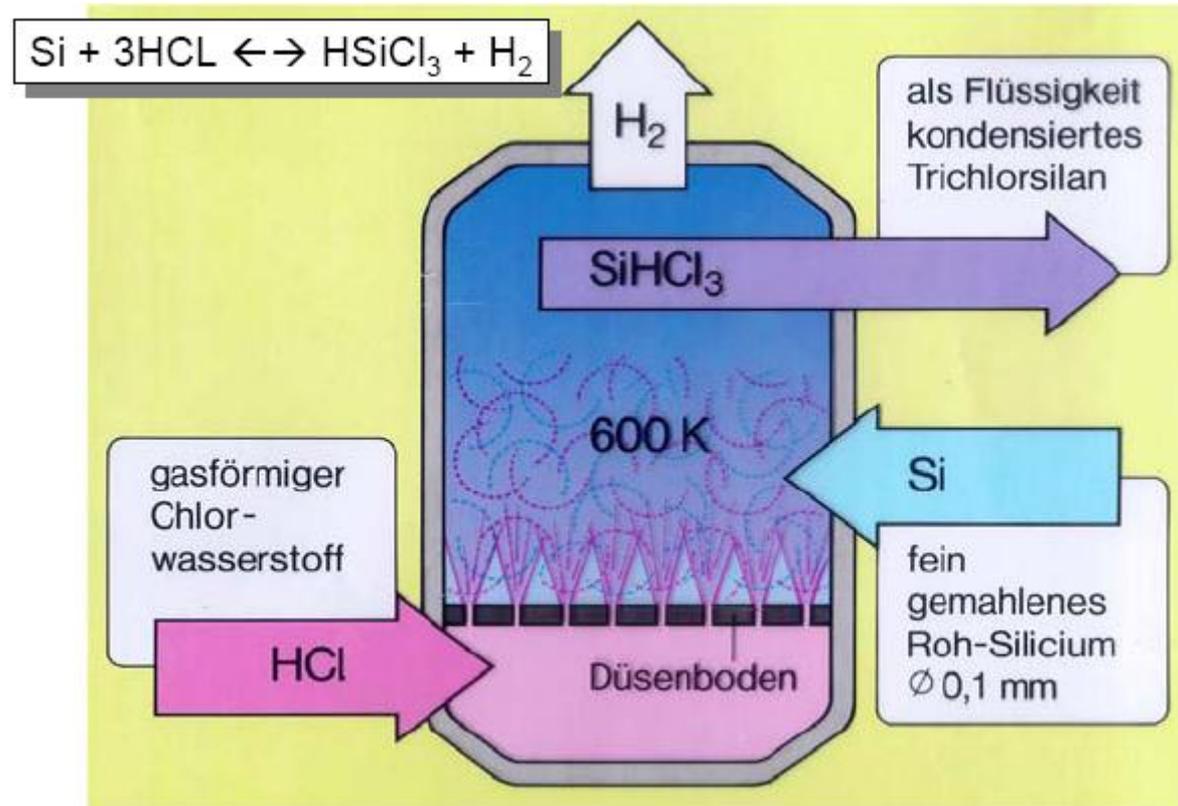
**Reaktionsgleichung**  

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

- 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  $\text{SiHCl}_3$  umgewandelt
- Durch vielfach wiederholte Destillation werden die entstandenen Verunreinigungsgase von  $\text{SiHCl}_3$  getrennt

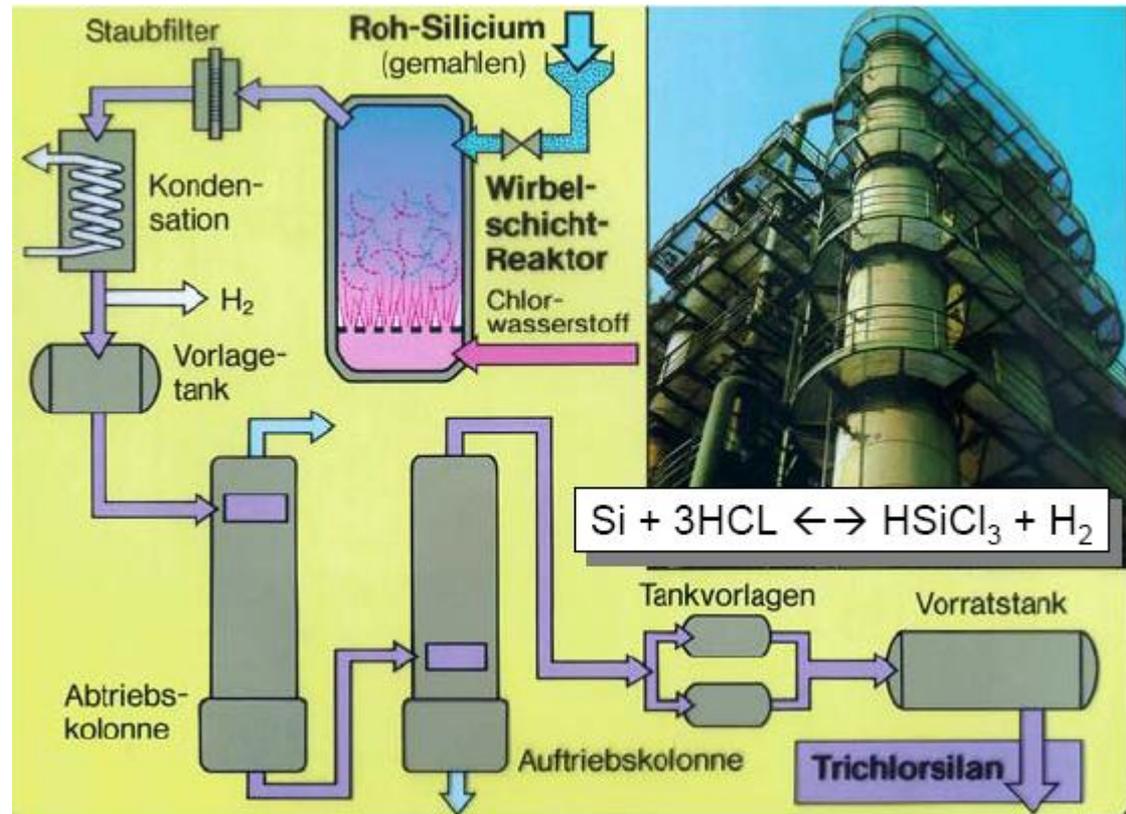
# Prozessfolge zur Waferherstellung

Ausgangsmaterial

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

Trichlorsilan  
 Reinheit: 99,999999999%

## Trichlorsilanherstellung



# Silizium-Herstellung

## ■ Trichlorsilan Destillation

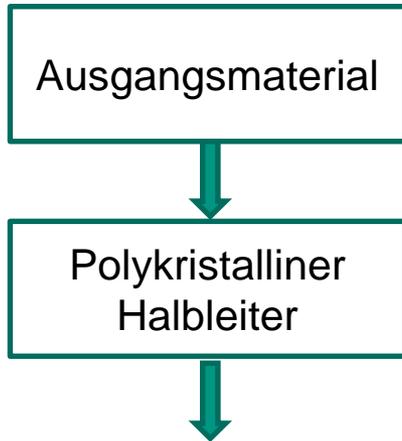


Destillationsanlage für Trichlorsilan  
bei Wacker, Burghausen

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

Quelle: Wacker Chemie

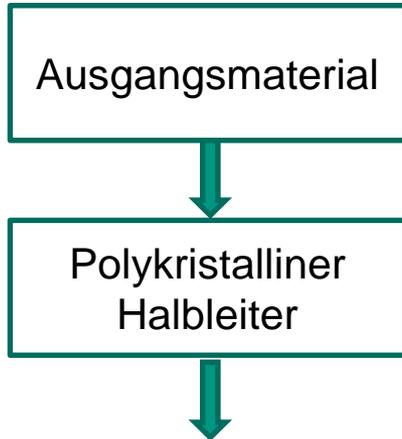
# Prozessfolge zur Waferherstellung



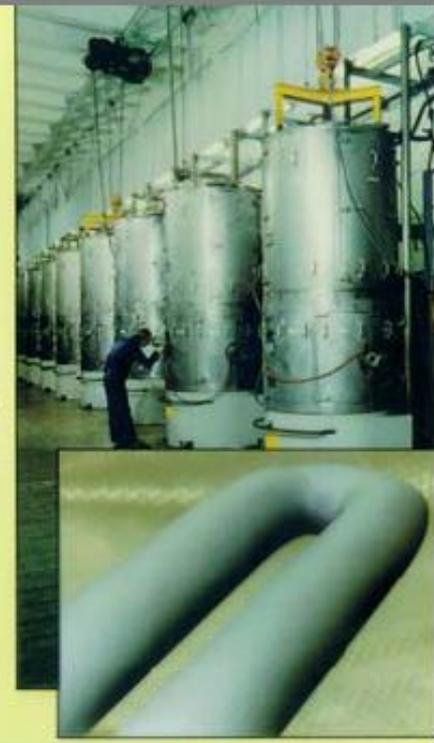
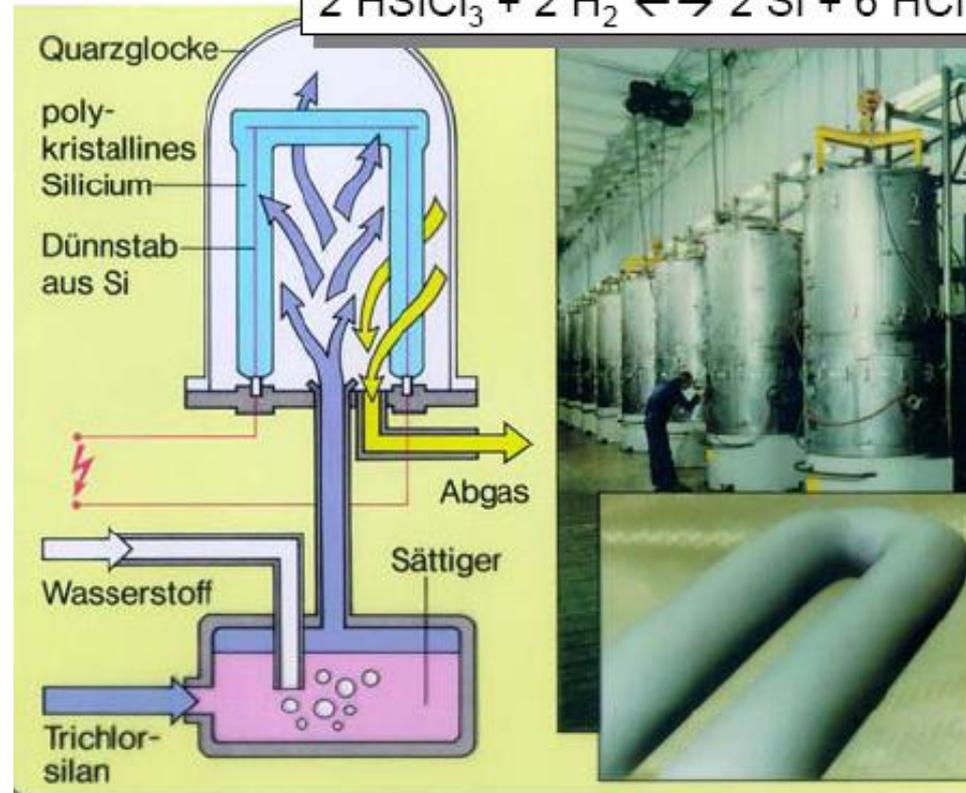
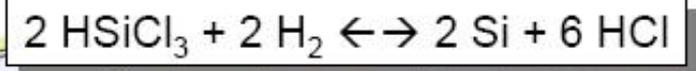
Polykristalliner Wafer für Solarzelle

- 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

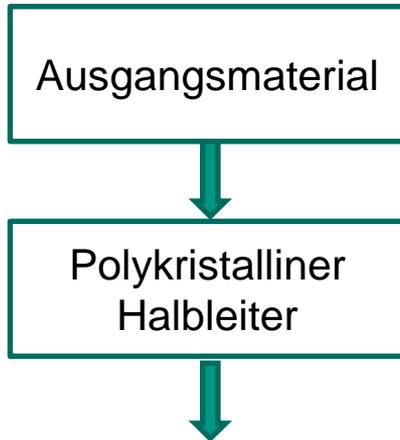
# Prozessfolge zur Waferherstellung



## Polykristallherstellung



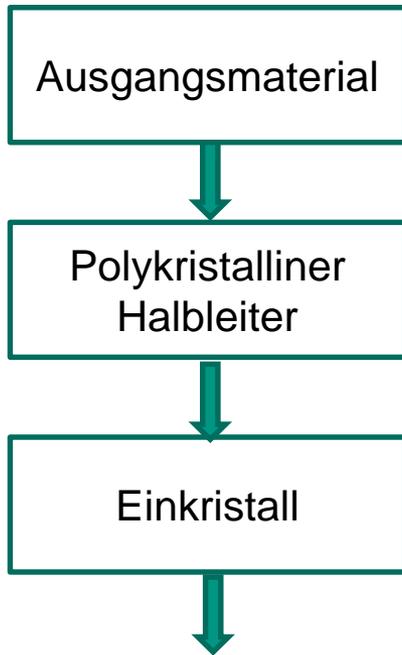
# Prozessfolge zur Waferherstellung



## 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)

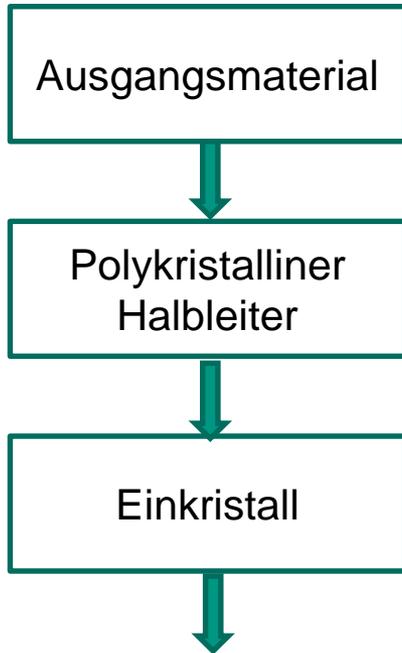
# Prozessfolge zur Waferherstellung



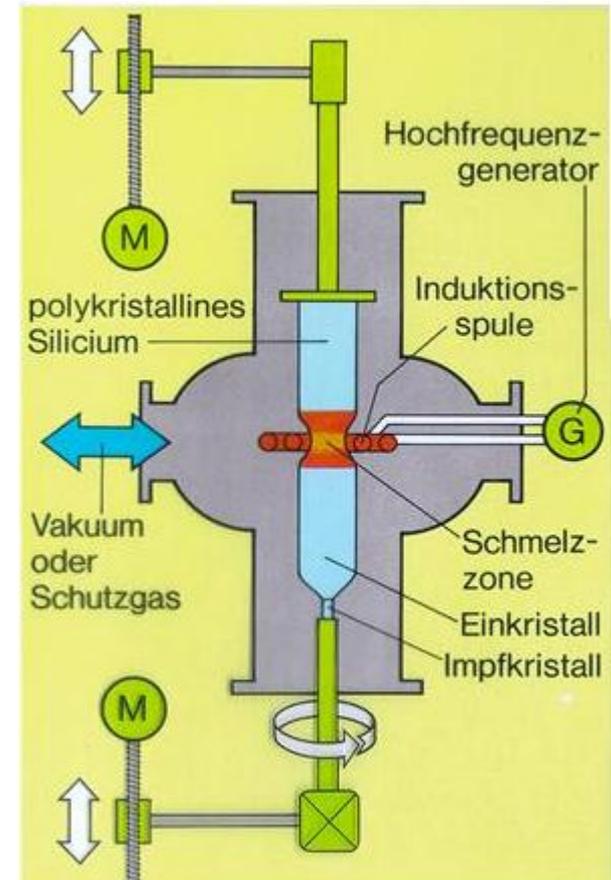
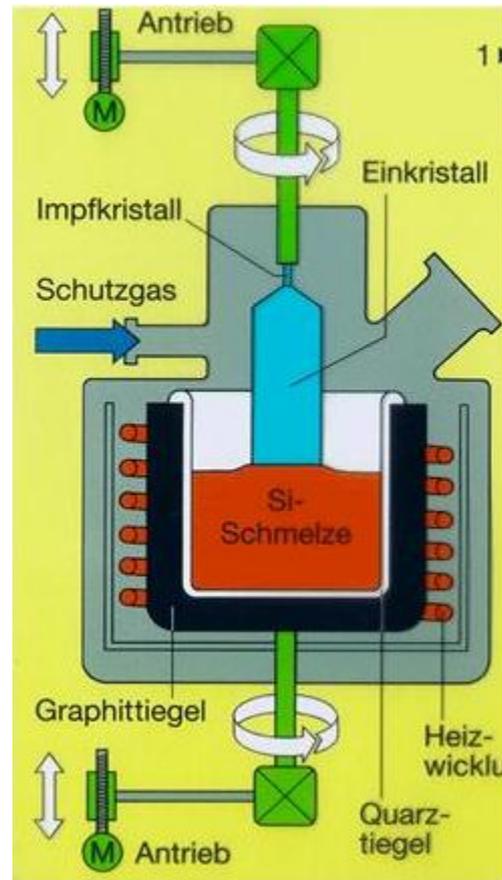
- An Korngrenzen von Polykristallen weichen die Eigenschaften vom Vollmaterial ab
- Reproduzierbare Bauelemente nur in Einkristallen herstellbar
- Herstellung von Einkristallen durch
  - Tiegelziehverfahren
  - Zonenschmelzverfahren
- Tiegelziehverfahren
  - Impfkristall in Kontakt mit der Schmelze
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



# Prozessfolge zur Waferherstellung

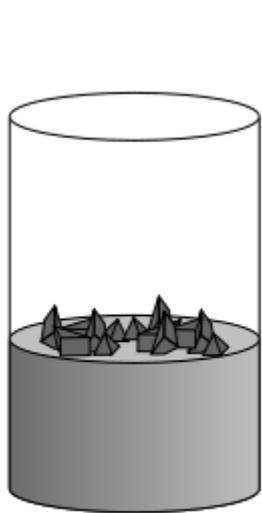


## Einkristallherstellung

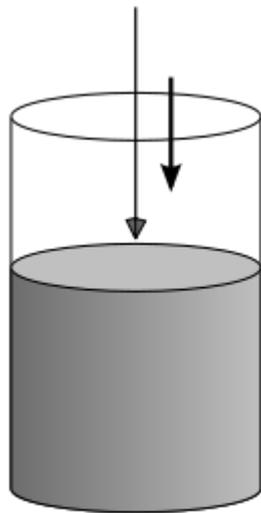


# Kristallziehen

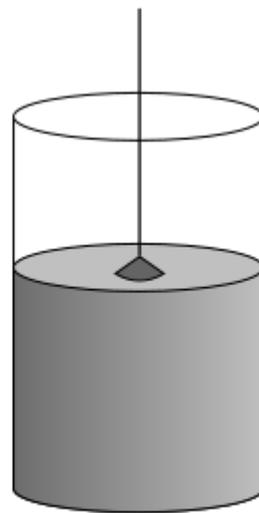
## ■ Prinzip der Zugtechnik



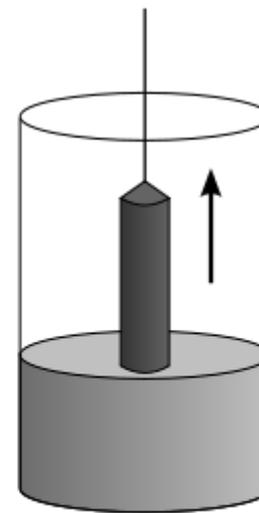
Schmelzen von  
Polysilicium,  
Dotierung



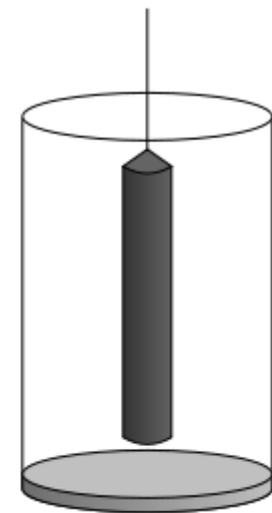
Einbringen  
des  
Keimlings



Beginn des  
Kristall-  
wachstums



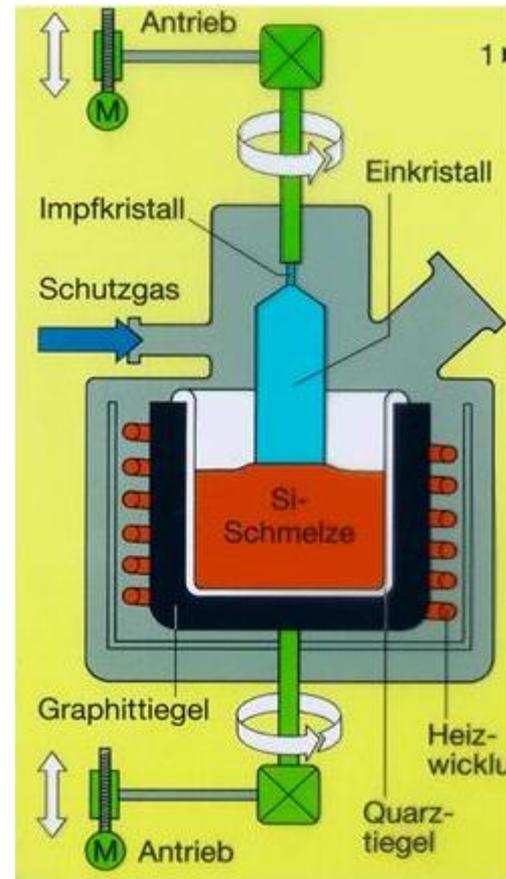
Kristall-  
ziehen



Kristall (Ingot)  
mit  
Restschmelze

# Kristallziehen

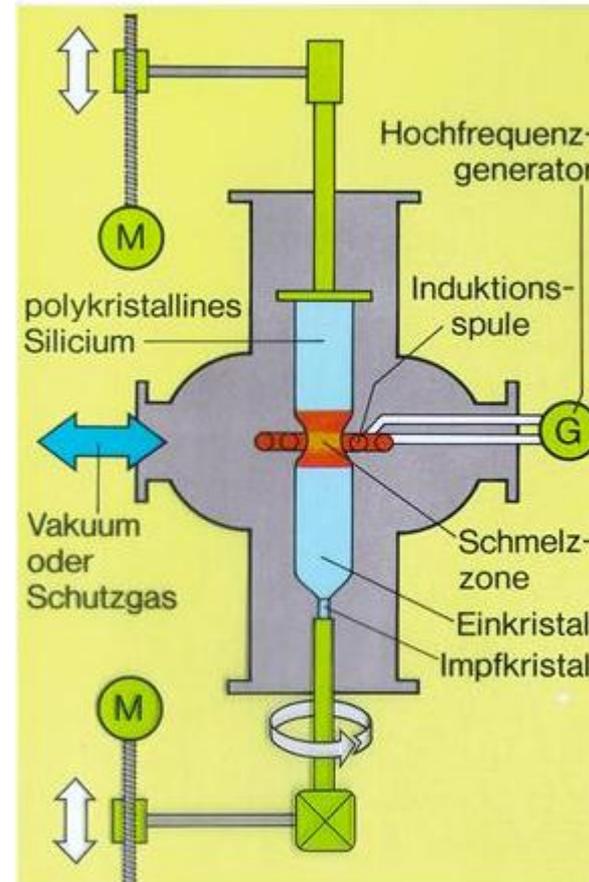
- Tiegelziehverfahren (Czochralski-Verfahren)
- Weitere Verringerung von Verunreinigungen
- Herstellung von hochreinem, einkristallinem Silizium
- Verunreinigungen bleiben in der Schmelze zurück



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

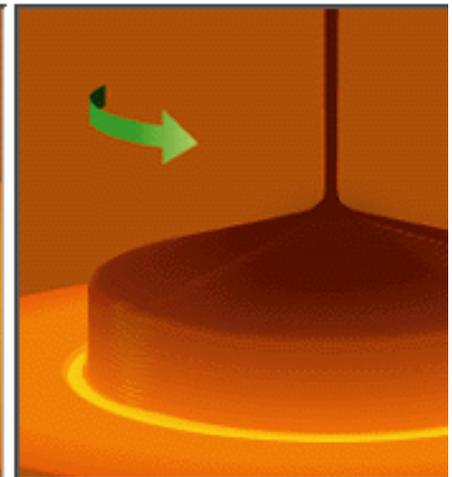
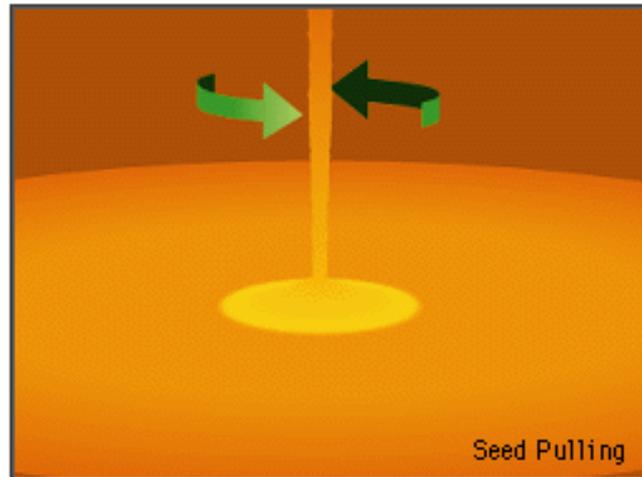
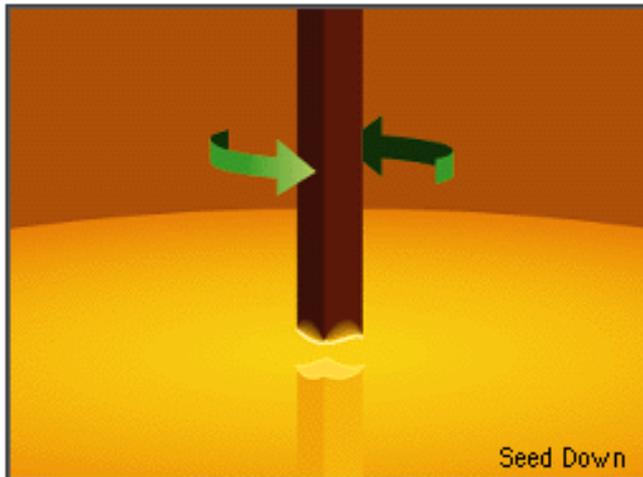
# Kristallziehen

- 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 - Kristallziehanlage



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

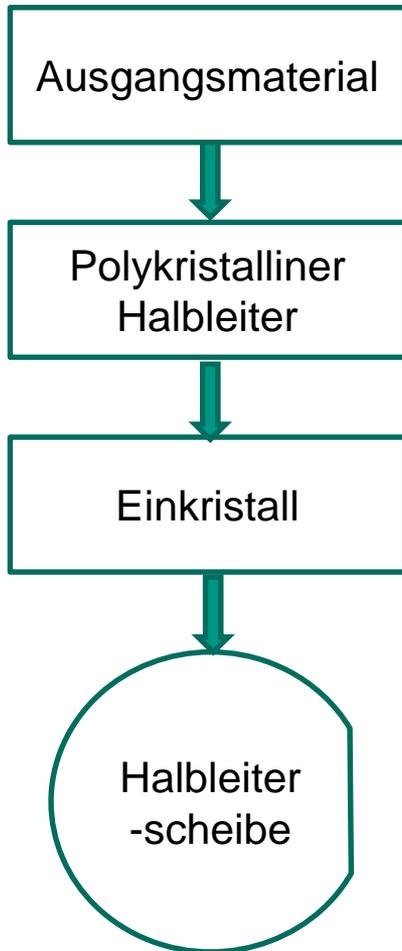
# Segregationskoeffizienten für Si

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



Schutzatmosphäre erforderlich

# Prozessfolge zur Waferherstellung

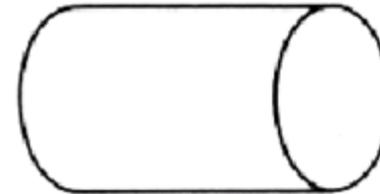


- Sägen der Scheiben
  - Innenlochsäge (sägen von kürzeren Stücken)
  - Rund schleifen, Flats anbringen
  - Scheiben sägen
  - **Innenlochsäge:**
  - Vorteil: geringer Materialverlust, sehr ebene Wafer -> kurze Nachbearbeitungszeiten
  - Nachteil: Einzelscheibenprozess
  - **Drahtsäge:**
  - Vorteil: 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



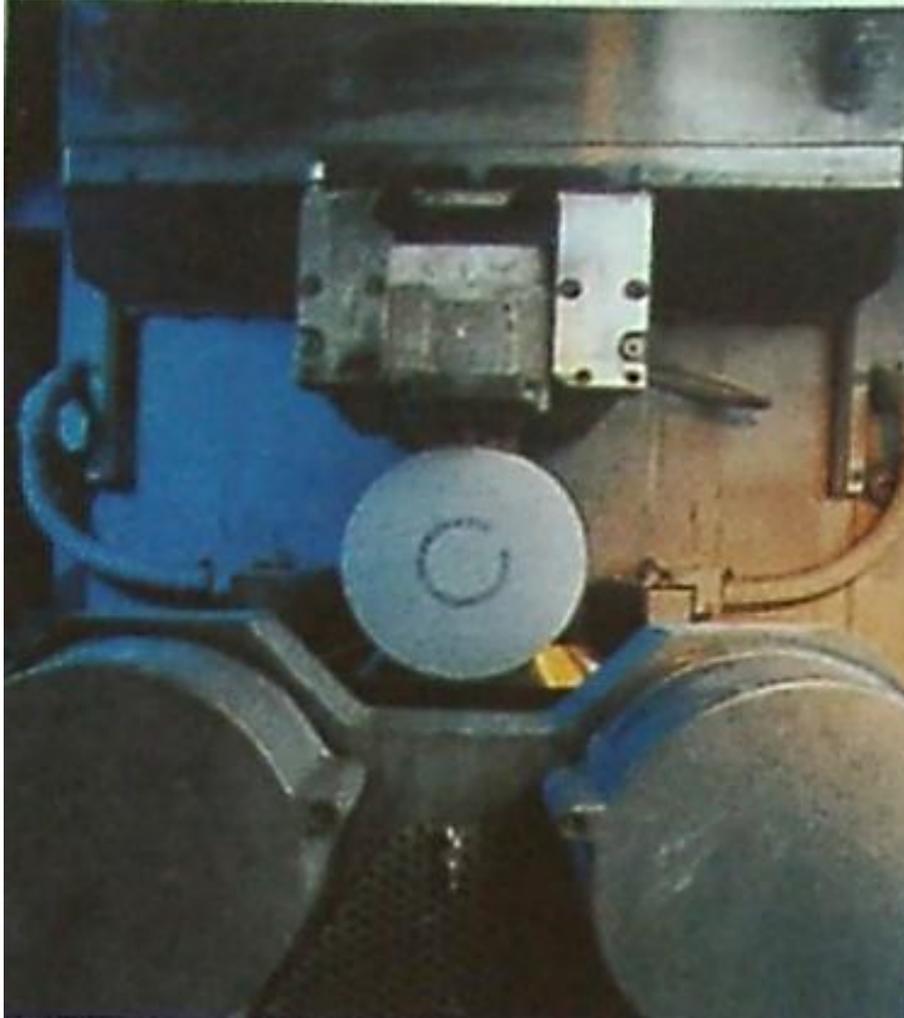
Wafer läppen und polieren

# Rundschleifen eines Kristalls



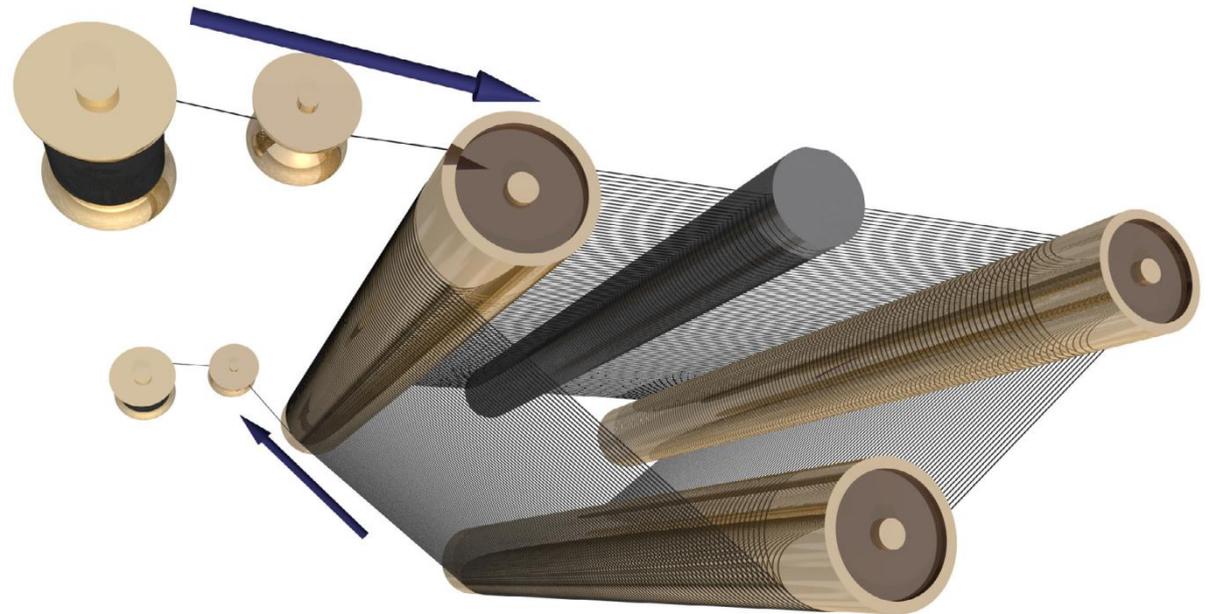
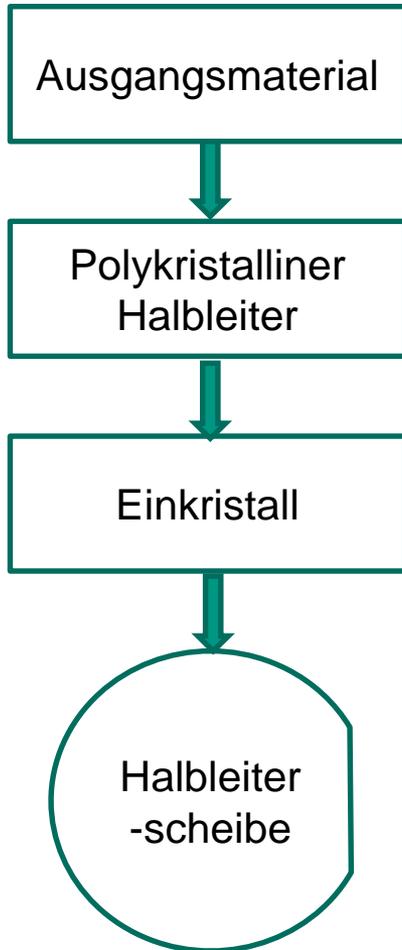
Der extrem spröde Silizium-Einkristall lässt sich nur durch Abschleifen auf den gewünschten Durchmesser bringen

# Sägen in Wafer



Die Drahtsäge scheidet  
den Einkristall in Scheiben

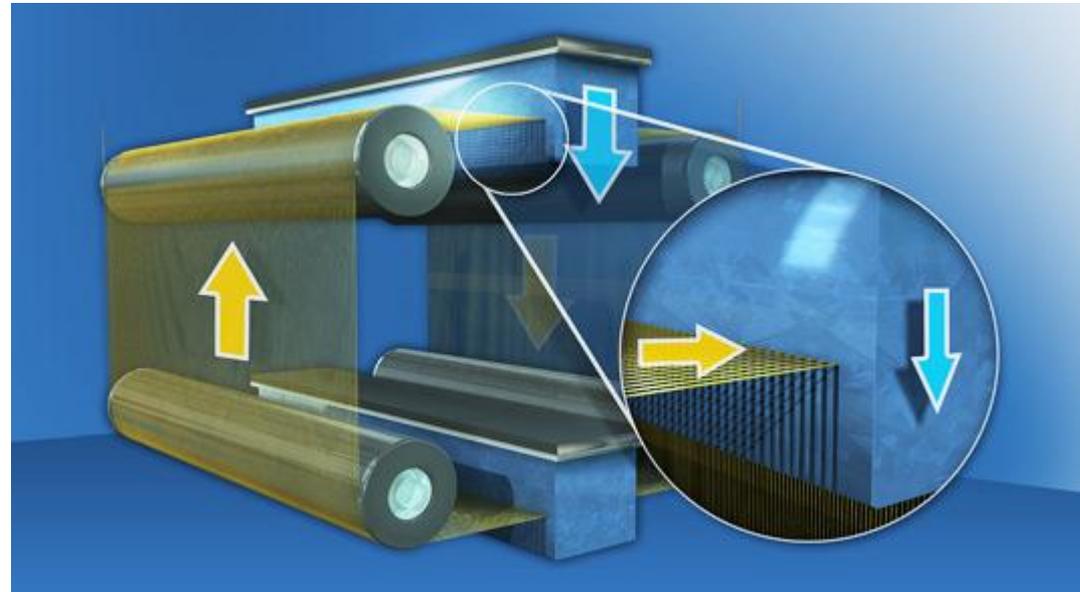
# Prozessfolge zur Waferherstellung



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

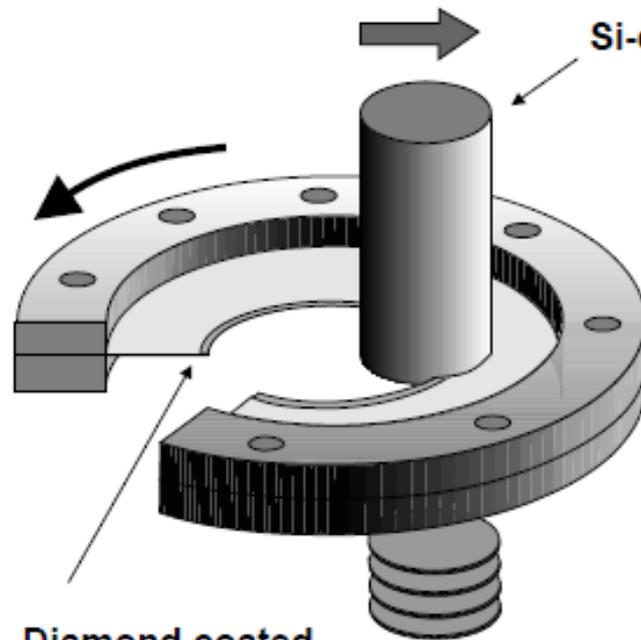
# Sägen in Wafer

- Sägen von Wafern für Solarzellen



Quelle: Solar World

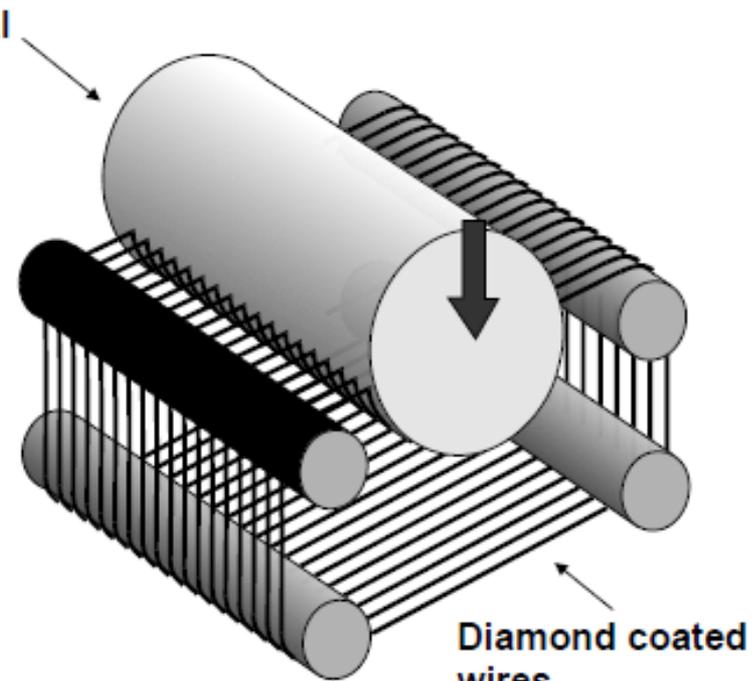
# Sägen in Wafer



Diamond coated cutting edge

a

Innenlochsäge



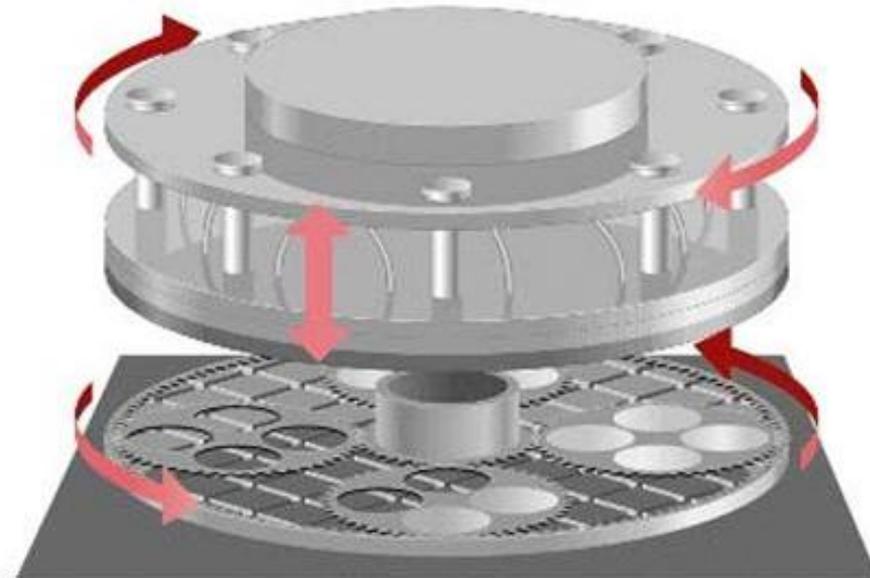
Diamond coated wires

b

Drahtsäge

# Wafer bearbeiten

## ■ Läppen



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

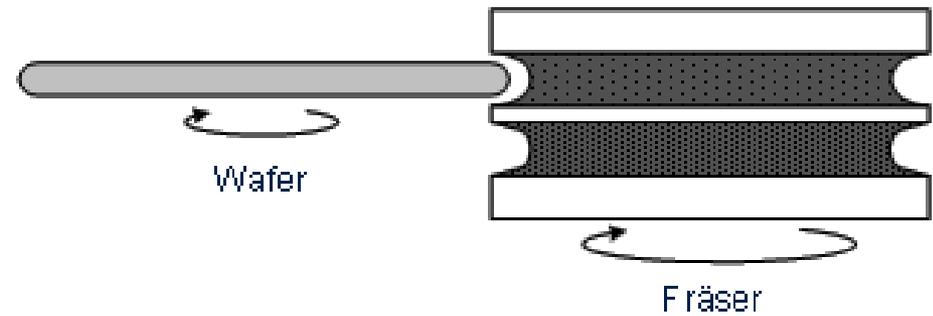
# Wafer bearbeiten

■ 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.

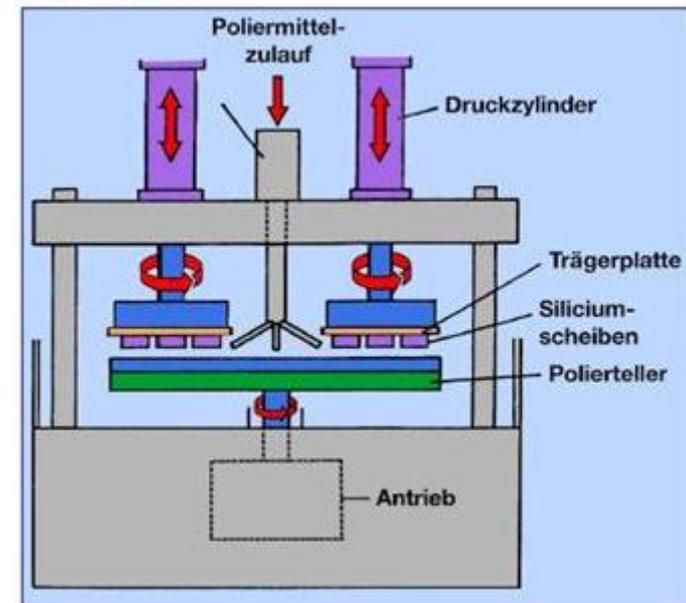
# Wafer bearbeiten

- Läppen

- Scheibenrand abrunden

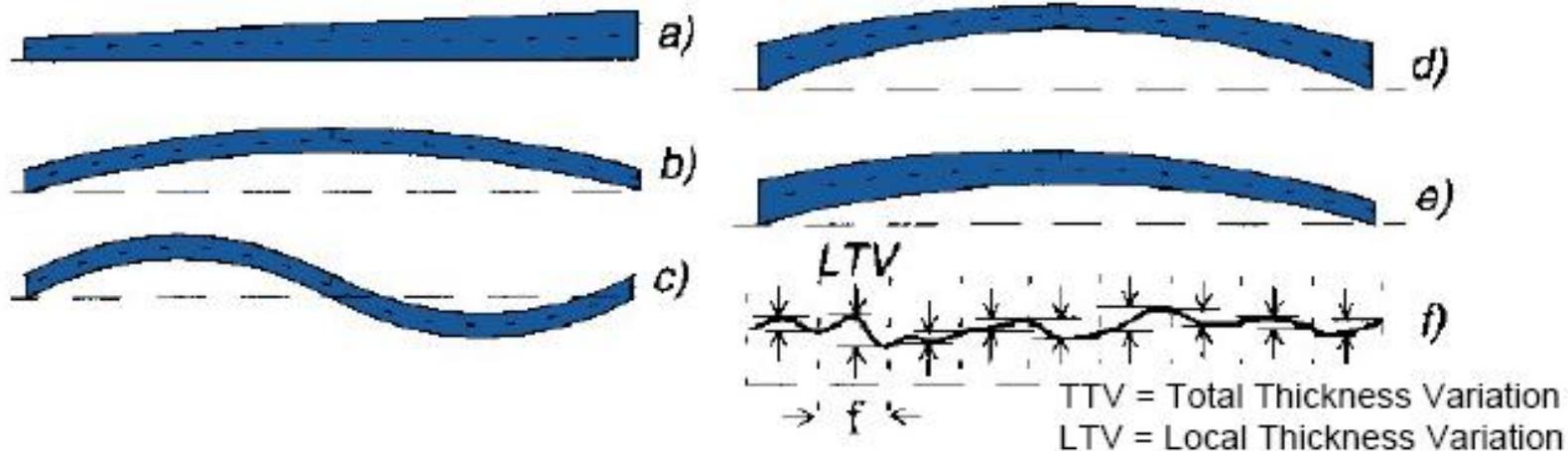
- Ätzen

- Polieren



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

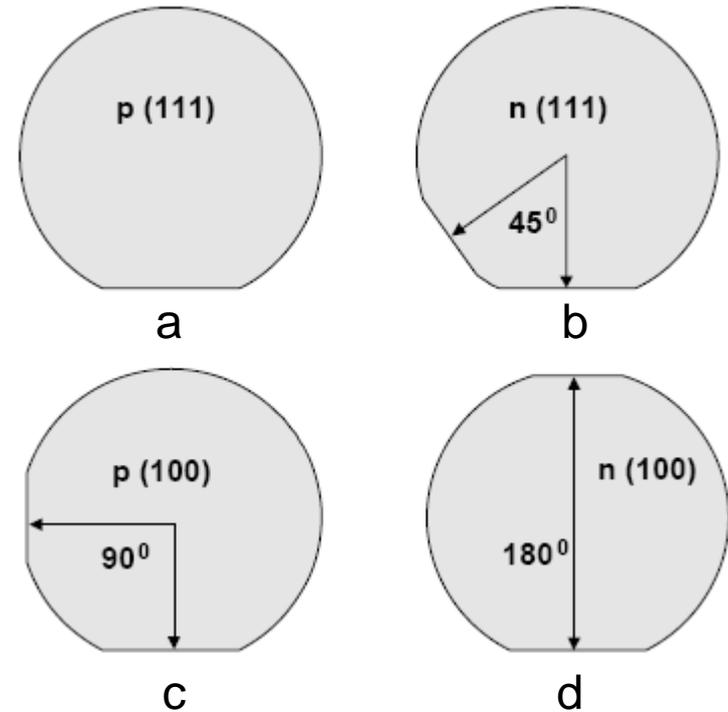
# Wafer – Fehler



- 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

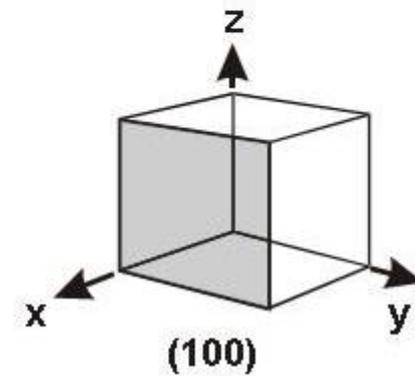
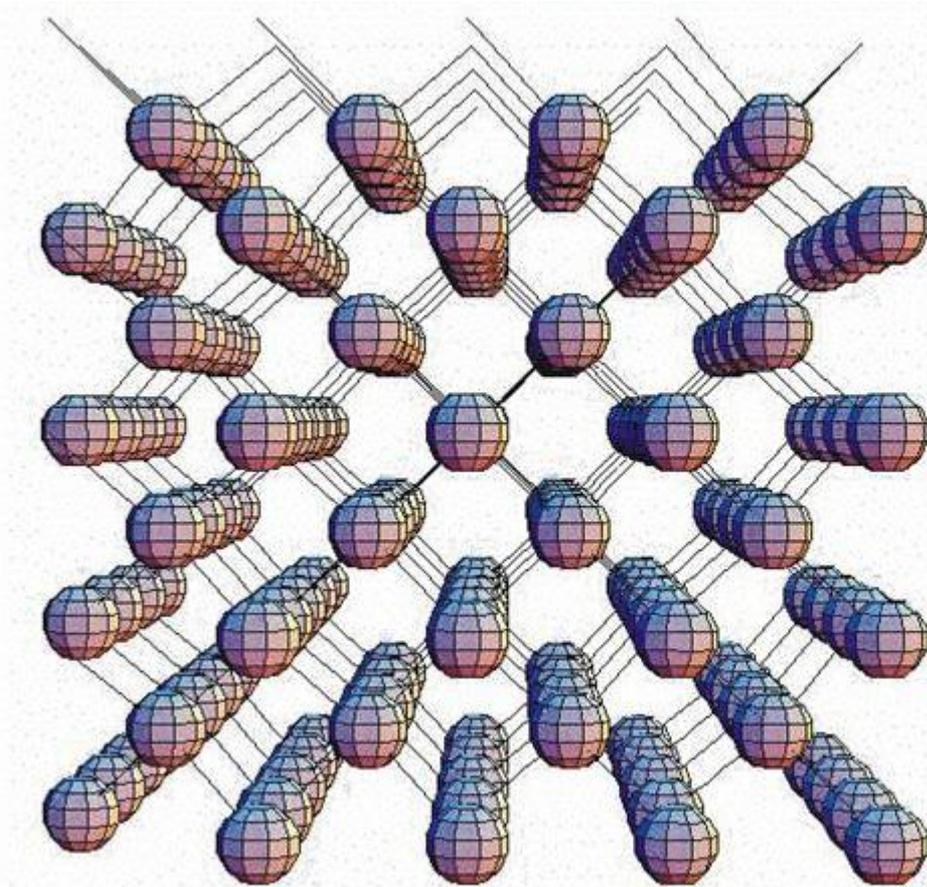
# Waferorientierung



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

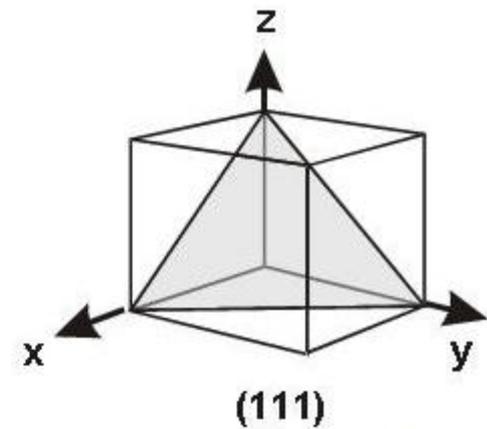
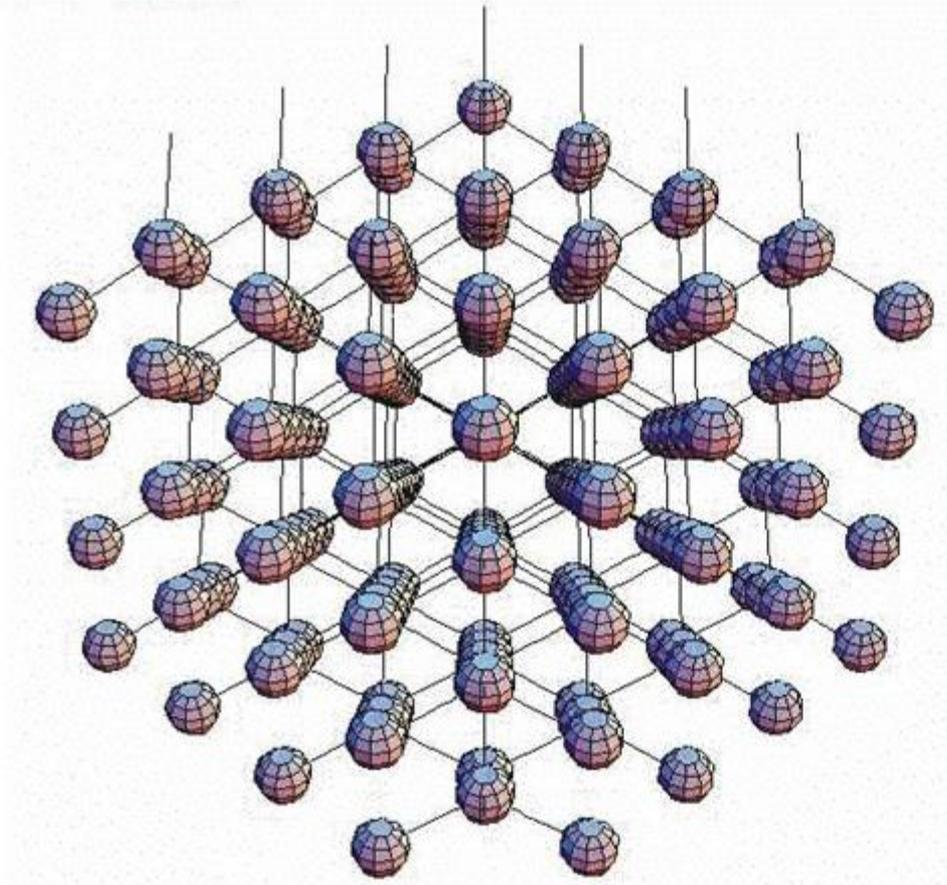
Quelle: SEMI (Semiconductor Equipment and Materials Institute)

# Waferorientierung Hintergrund



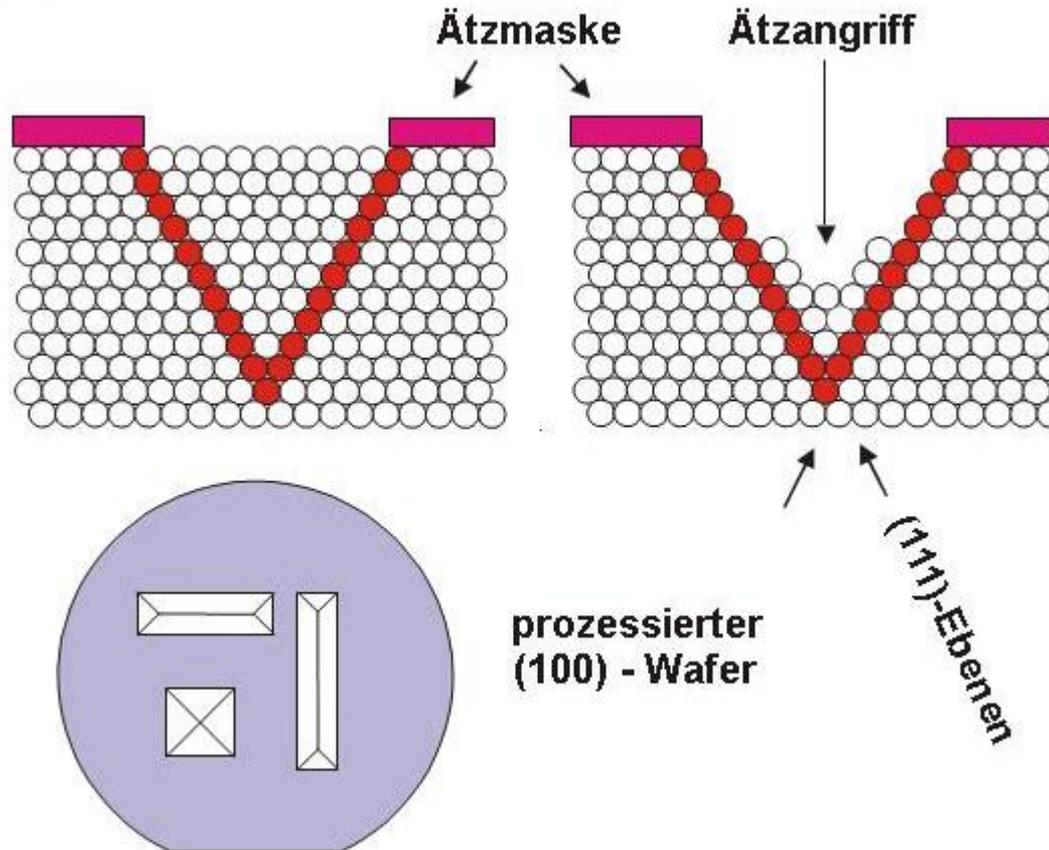
Quelle: IMTEK

# Waferorientierung Hintergrund



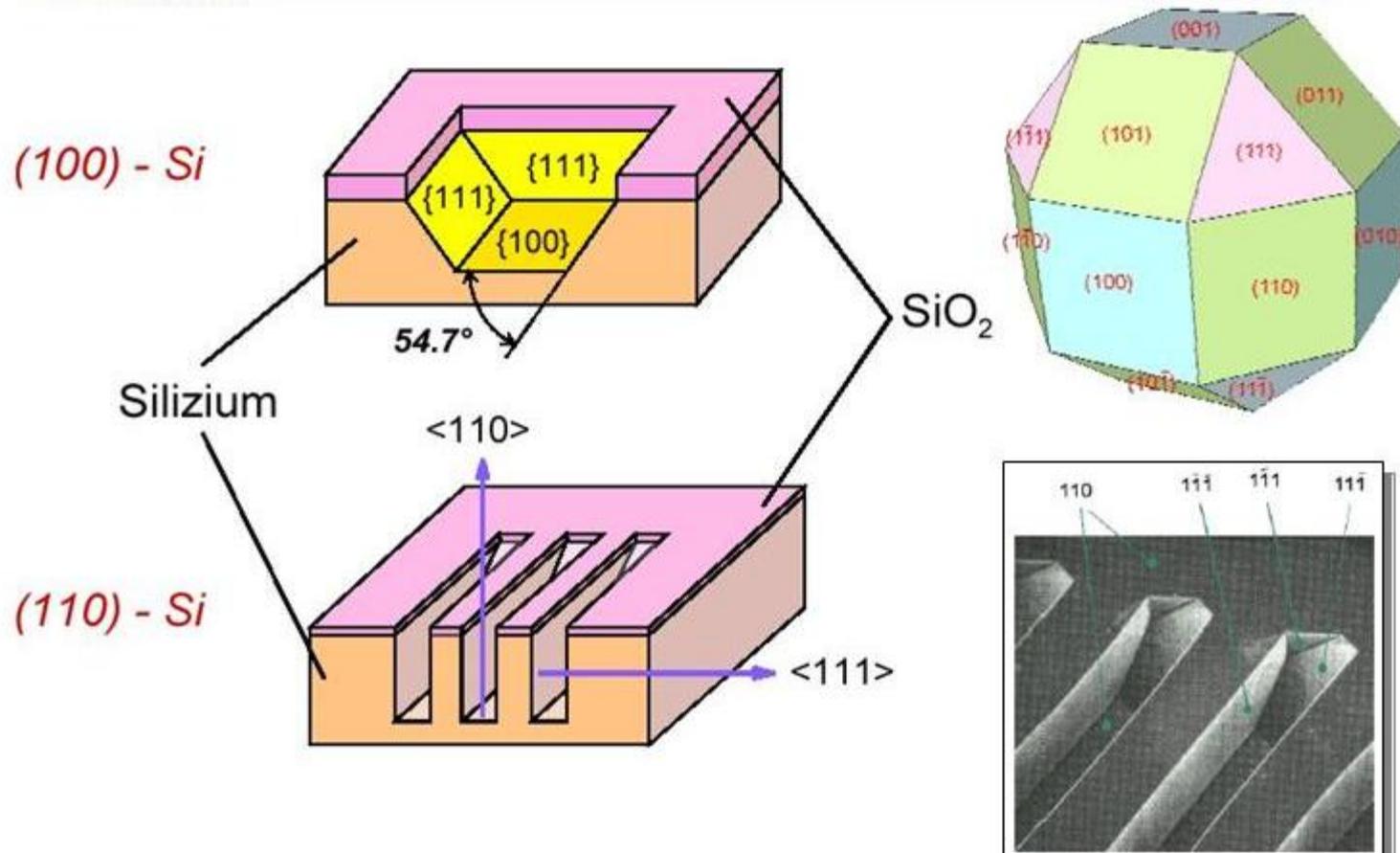
Quelle: IMTEK

# Waferorientierung Hintergrund



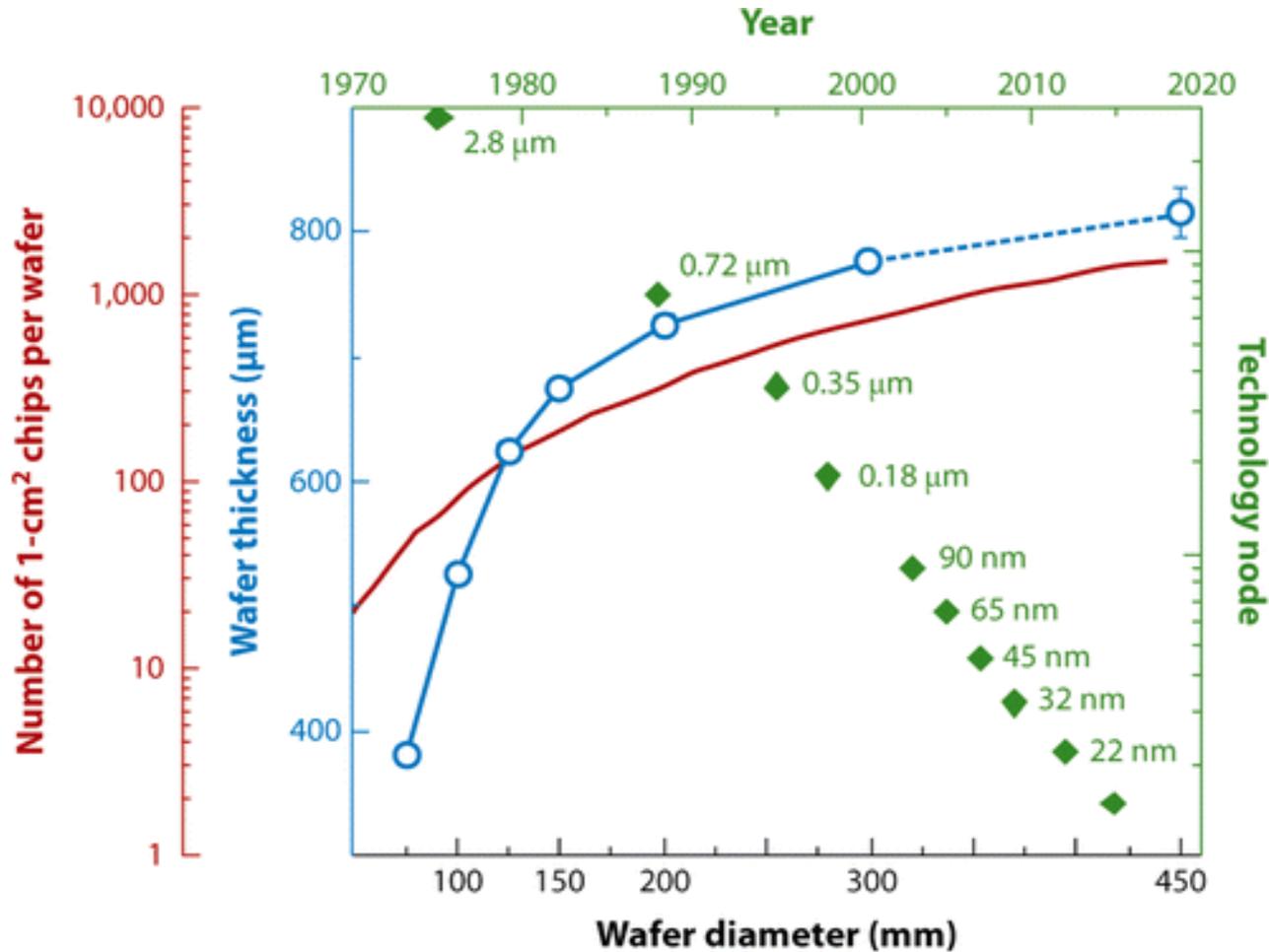
Quelle: IMTEK

# Waferorientierung Hintergrund



Quelle: IMTEK

# Wafer Größe

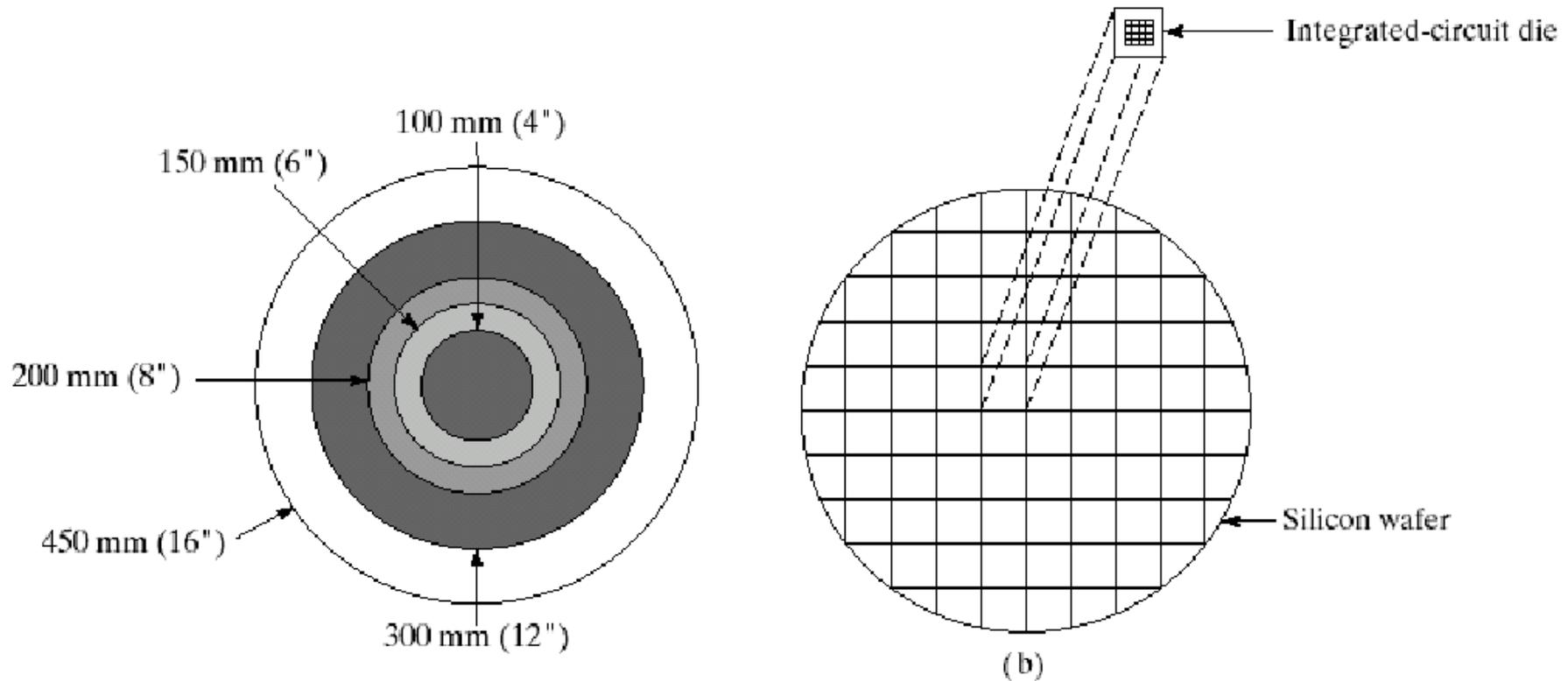


Quelle: [www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)

# Wafer Größe

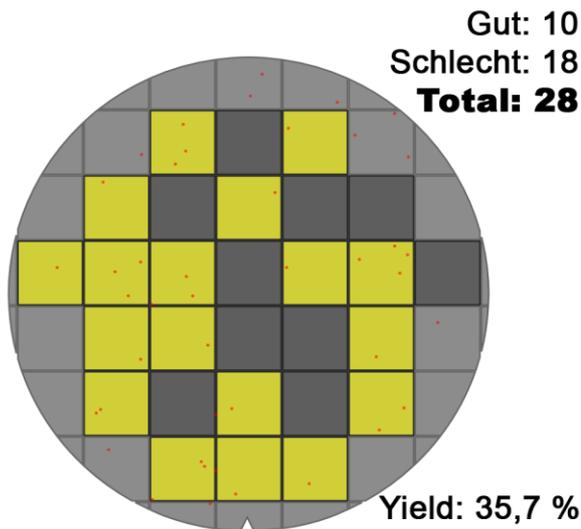
Bezeichnung	Durchmesser [mm]	Dicke [ $\mu\text{m}$ ]	Markteinführung
1-Zoll-Wafer	–	–	1960
2-Zoll-Wafer	50,8	275	1971
3-Zoll-Wafer	76,2	375	1973
4-Zoll-Wafer	100	525	1976
5-Zoll-Wafer	125 oder 127	625	1982
6-Zoll-Wafer	150	675	1988
8-Zoll-Wafer	200	725	1990
12-Zoll-Wafer	300	775	1997
16-Zoll-Wafer	450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

# Wafer Größe

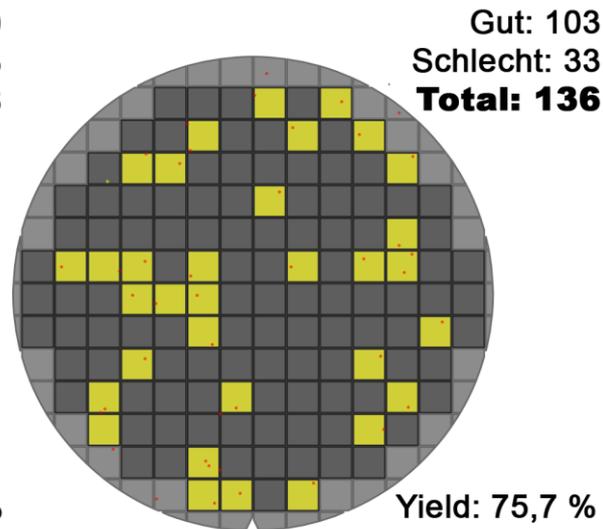


- Größere Wafer bringen größere Ausbeute wegen geringerem Verschnitt

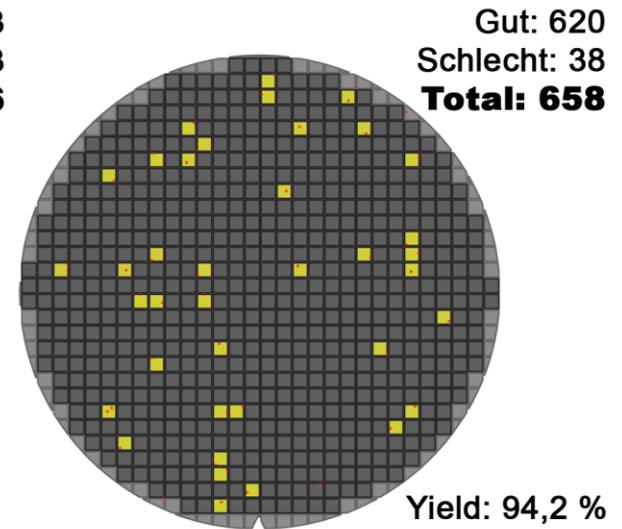
# Wafer Ausbeute



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)