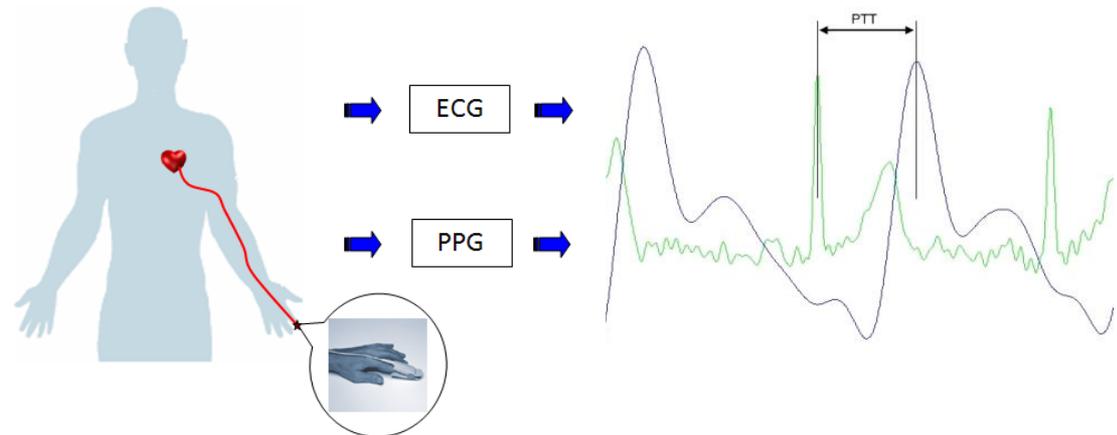


Vorlesung Mikrosystemtechnik

Teil 5: Schichtstrukturierung CVD, Ätzen

Stefan Hey

Institut für Technik der Informationsverarbeitung



Gliederung

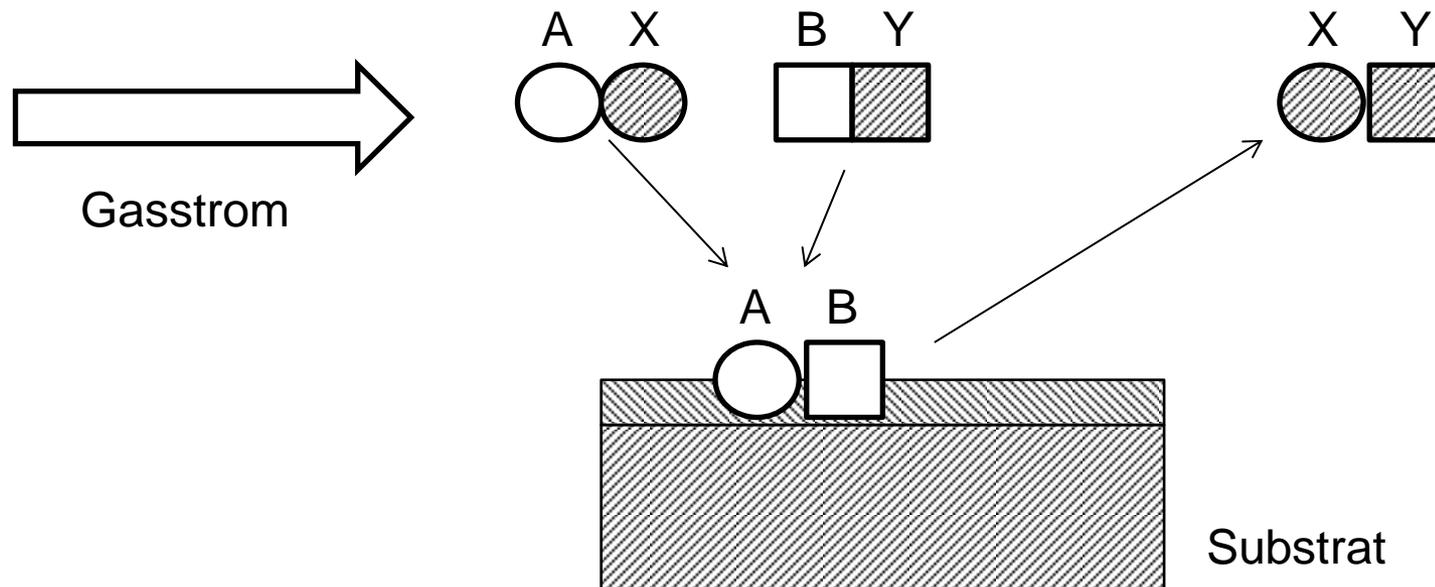
- Mikrostrukturtechnik
 - Vertikalstrukturierung
 - Schichtumwandlung
 - Schichtabscheideverfahren
 - PVD Verfahren
 - Aufdampf
 - Sputtern
 - Pulsed Laser Deposition
 - CVD Verfahren
 - Prinzip und Prozesse
 - Vor- und Nachteile
 - Epitaxie
 - Barrel Reaktoren
 - Gas Reaktoren

Gliederung

- Schichtstrukturierung (Ätzen)
 - Einführung, Begriffe und Anwendungsbeispiele
 - Nassätzen
 - Tauchätzen
 - Sprühätzen
 - Trockenätzen
 - **BE: Barrel Etching** = Barrel- Ätzen
 - **PE: Plasma Etching** = Plasmaätzen
 - **RIE: Reaktive Ion Etching** = Reaktives Ionenätzen
 - **RIBE: Reaktive Ion Beam Etching** = Reaktives Ionenstrahlätzen
 - **IE: Ion Etching** = Sputterätzen
 - **IBE: Ion Beam Etching** = Ionenstrahlätzen
- Ätzstoppverfahren

Chemical Vapor Deposition CVD

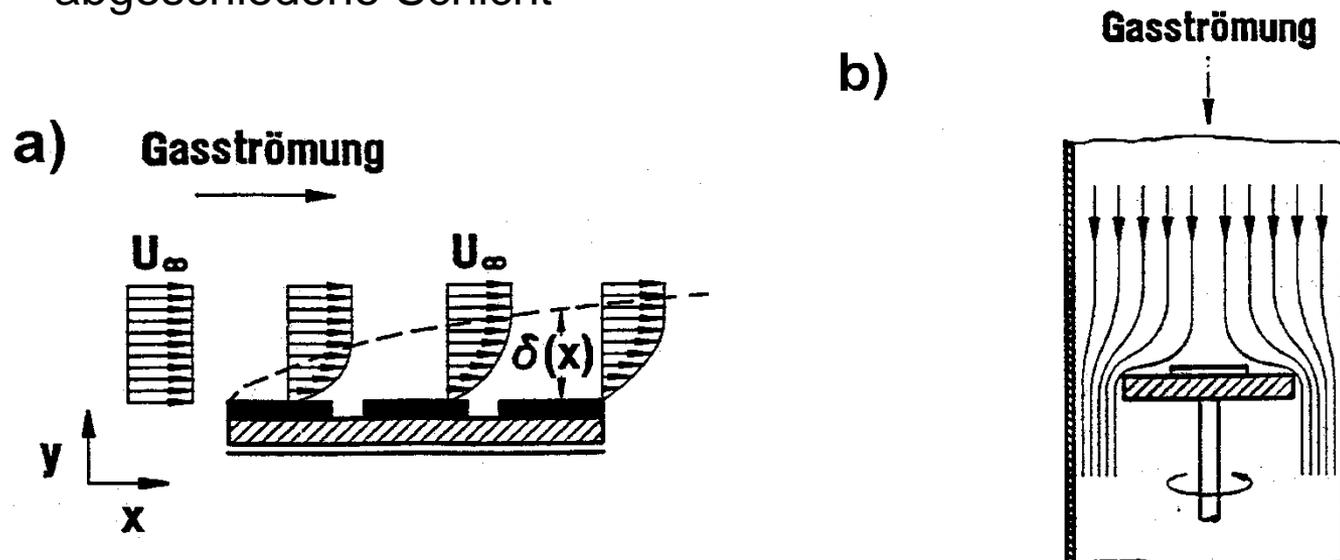
- Gasförmige Ausgangsmaterialien werden an Substratoberfläche chemisch zerlegt
- Das Ergebnis einer chemischen Reaktion dieser Gase ist eine abgeschiedene feste Schicht
- $AX(\text{Gas}) + BY(\text{Gas}) \rightarrow AB(\text{fest}) + XY(\text{Gas})$



Chemical Vapor Deposition CVD

- Gasförmige Ausgangsmaterialien werden an Substratoberfläche chemisch zerlegt

→ Das Ergebnis einer chemischen Reaktion dieser Gase ist die abgeschiedene Schicht

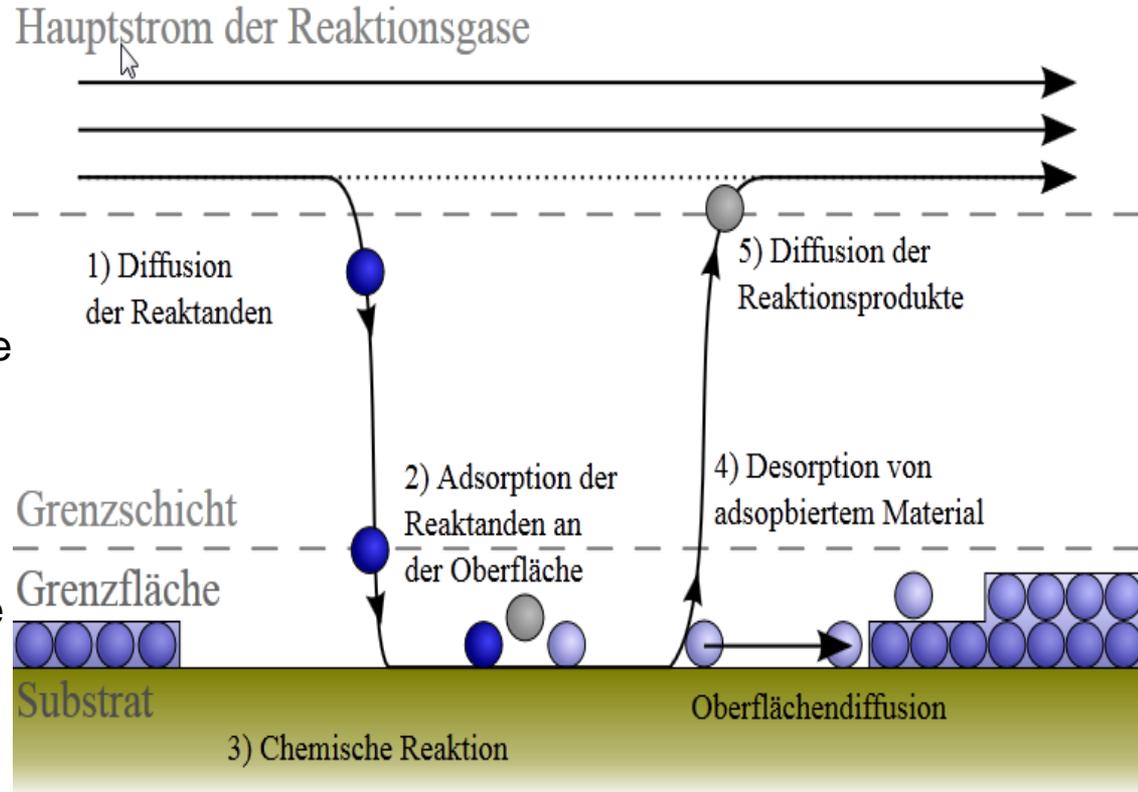


Einfluss der Anströmung des Reaktionsgases auf die Beschichtung mittels CVD

a) Parallele Anströmung, b) Senkrechte Anströmung

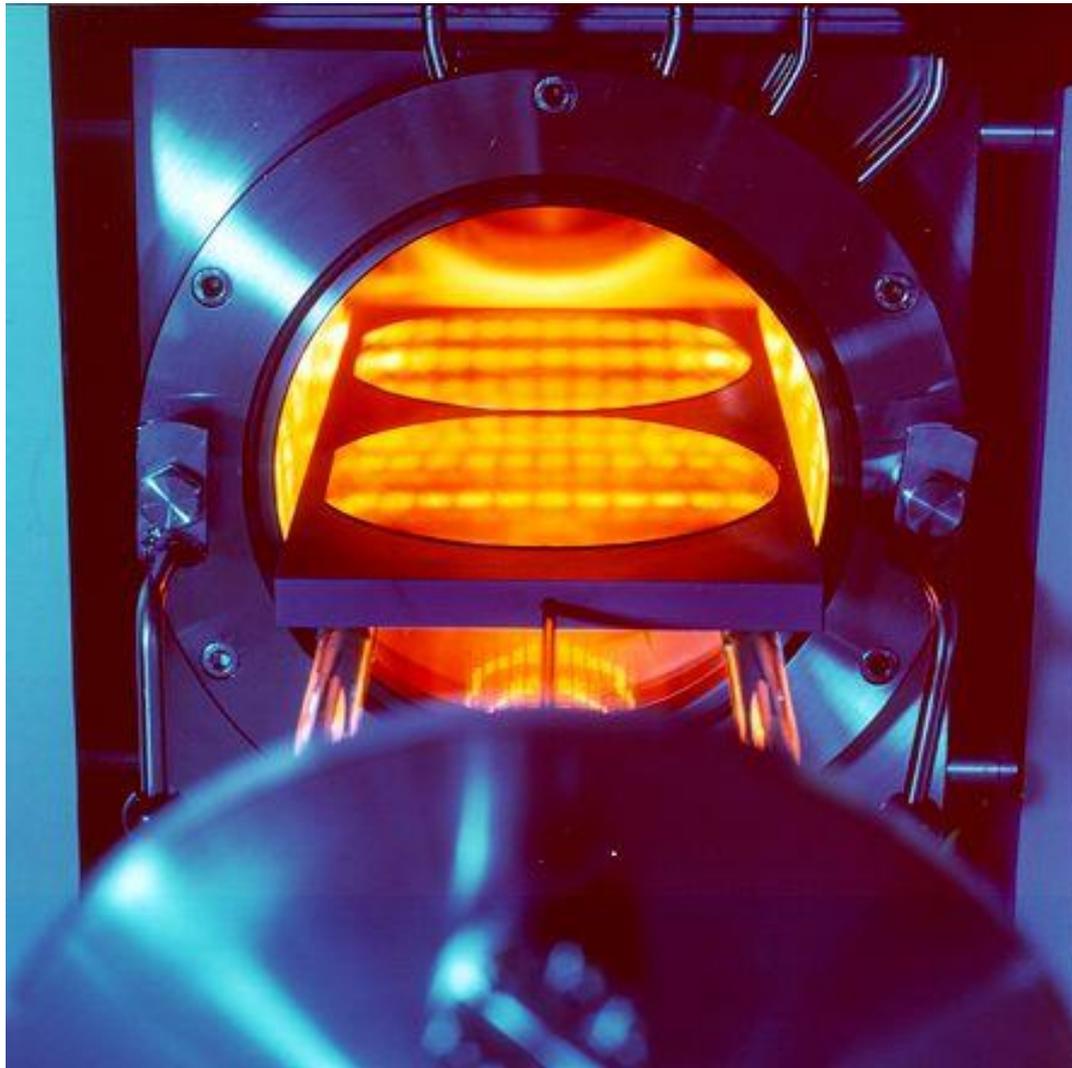
CVD- Teilprozesse

- Transport der Reaktanten in die Abscheide-Region
- Diffusion der Reaktanten durch die Grenzschicht hindurch zur Substratoberfläche
- Adsorption der Reaktanten an der Substratoberfläche
- Oberflächenreaktion (chemische Reaktion, Oberflächendiffusion des festen Reaktionsprodukts, Desorption der Reaktionsprodukte)
- Diffusion der Reaktionsprodukte durch Grenzschicht
- Abtransport der Reaktionsprodukte



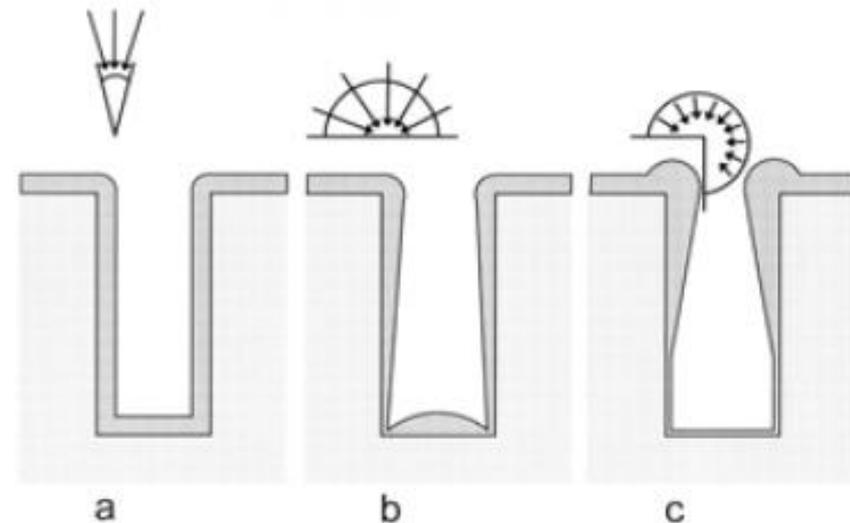
Grundprinzip von CVD-Prozessen

Anlage zur metallorganischen chemischen Gasphasenabscheidung (MOCVD)



Grabenüberdeckung beim CVD-Verfahren

- Idealfall, gleichmäßig bedeckte Kante durch hohe Oberflächenbeweglichkeit (a)
- Ungleichmäßig bedeckte Kante durch geringe Oberflächenbeweglichkeit bei hoher mittlerer freier Weglänge $\lambda \gg h$ (b)
- Ungleichmäßig bedeckte Kante durch geringe Oberflächenbeweglichkeit bei niedriger mittlerer freier Weglänge $\lambda \gg h$ (c)



Verschiedene Formen einer Grabenüberdeckung beim CVD-Verfahren

Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Grundlegendes zu Wahl der Reaktortypen

■ Prozessdruck

- „Low Pressure“ LPCVD: Hohe Diffusionskonstanten
 - Dichtes Stapeln der Wafer ohne Einfluss auf Rate des Schichtwachstums
- „High Pressure“ APCVD: Geringer Diffusionskoeffizient
 - Für homogene Schichten müssen Wafer so angeordnet werden, dass gleichmäßig Reaktanten zugeführt werden

■ Energiezufuhr

- PECVD: ermöglicht niedrige Temperaturen

CVD Prozesse

Prozess	Vorteile	Nachteile	Anwendungen	Anmerkung	Druck/ Temp.
APCVD	Einfach, hohe Rate, geringe Temperatur	Schlechte Kantenbedeckung Partikelkontamination	Oxide, Epitaxie	Diffusionslimitierte Prozessführung	100 kPa- 10 kPa 350 °C- 400 °C
LPCVD	Exzellente Homogenität und Reinheit, konforme Kantenbedeckung, hoher Wafer Durchsatz	Hohe Temperatur, Geringe Abscheiderate	Oxide, Siliziumnitride Polysilizium	Reaktionslimitierte Prozessführung	100 Pa- 10 Pa 400 °C- 900 °C
PECVD	Geringe Temperaturen, hohe Raten, gute Adhäsion, gute Kantenbedeckung, geringe pin-hole Dichte	Chemische Verunreinigung Verunreinigung durch Partikel	Niedrigtemperatur Isolatoren über Metalle, Passivierung		200 Pa- 600 Pa 300 °C 400 °C

Marc Madou; Fundamentals of Microfabrication

Vor- und Nachteile des CVD-Verfahrens

■ Vorteile

- Keine Reaktion mit Substratmaterial (z.B. für Oxidabscheidung)
- Einheitliche Verteilung der Substanz auf die Oberflächen
- Keine Schichtgradientenbildung
- Große Bandbreite an Materialien und chemische Verbindungen

■ Nachteile

- Die hohen Temperaturen bei der normalen CVD können das Substrat schädigen
- Gasförmigen Edukte müssen vorhanden sein für die Abscheidung der Oberflächenschichten
- Die gerne verwendeten Reaktionsgase wie PH_3 oder Carbonyle sind für Menschen giftig

Epitaxie

- Die Epitaxie kann als Spezialverfahren der CVD betrachtet werden
- Bei diesem Verfahren wird eine Schicht auf einer anderen Schicht erzeugt und deren Kristallstruktur übernommen
- Diese Verfahren wird genutzt:
 - um auf einem Wafer weitere einkristalline Schichten aufwachsen zu lassen
 - oder in einen Einkristall Dotierschichten einzubringen

- Homo-Epitaxie
 - Aufwachsen von Schichten aus gleichen Material

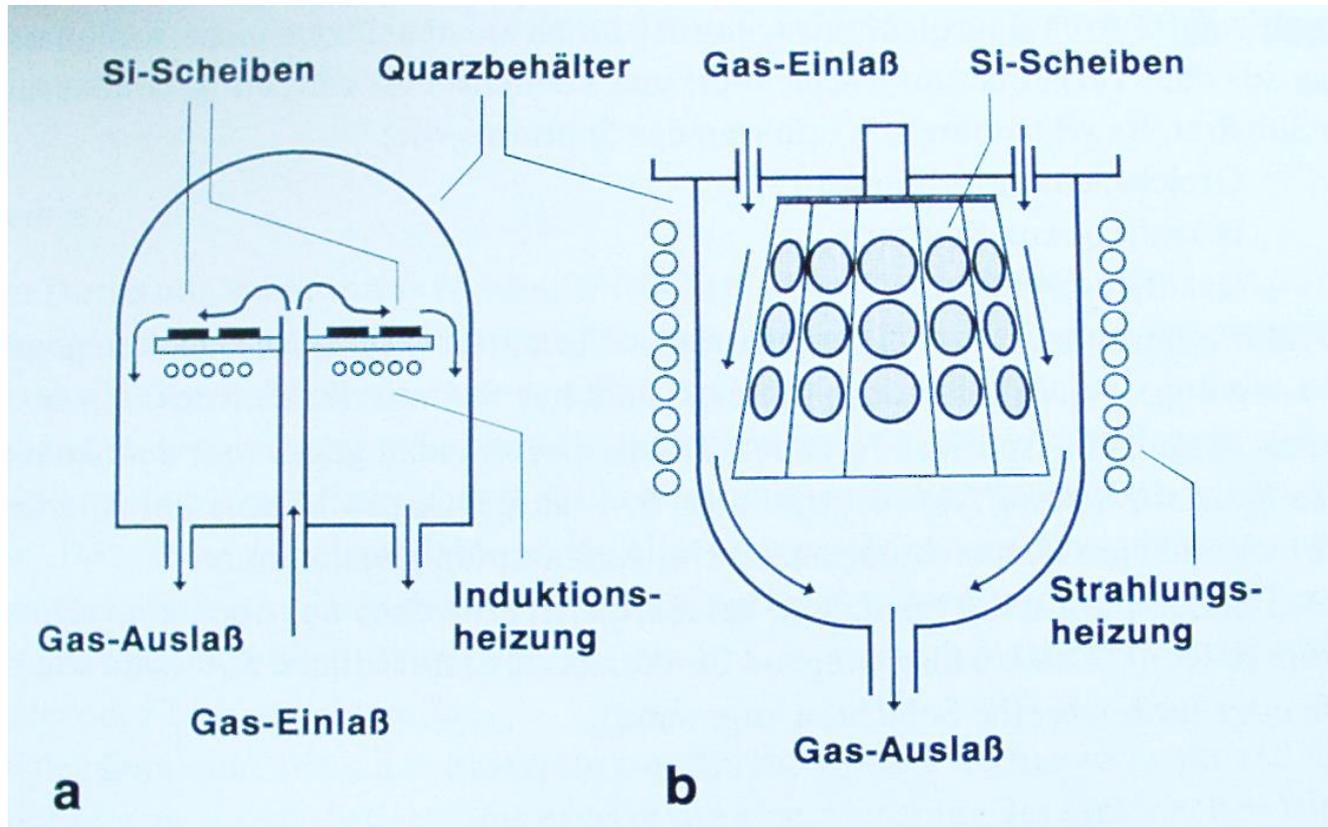
- Hetero-Epitaxie
 - Aufwachsen von Schichten aus unterschiedlichen Material

Epitaxie-Verfahren

- Liquid Phase Epitaxie (LPE)
 - Wafer wird in Schmelze eingetaucht und unter kontrollierten Bedingungen herausgezogen
 - Schmelze besteht aus metallischem Träger mit gelösten Atomen aus Halbleitermaterial in Sättigung, welche auf dem Substrat auskristallisieren

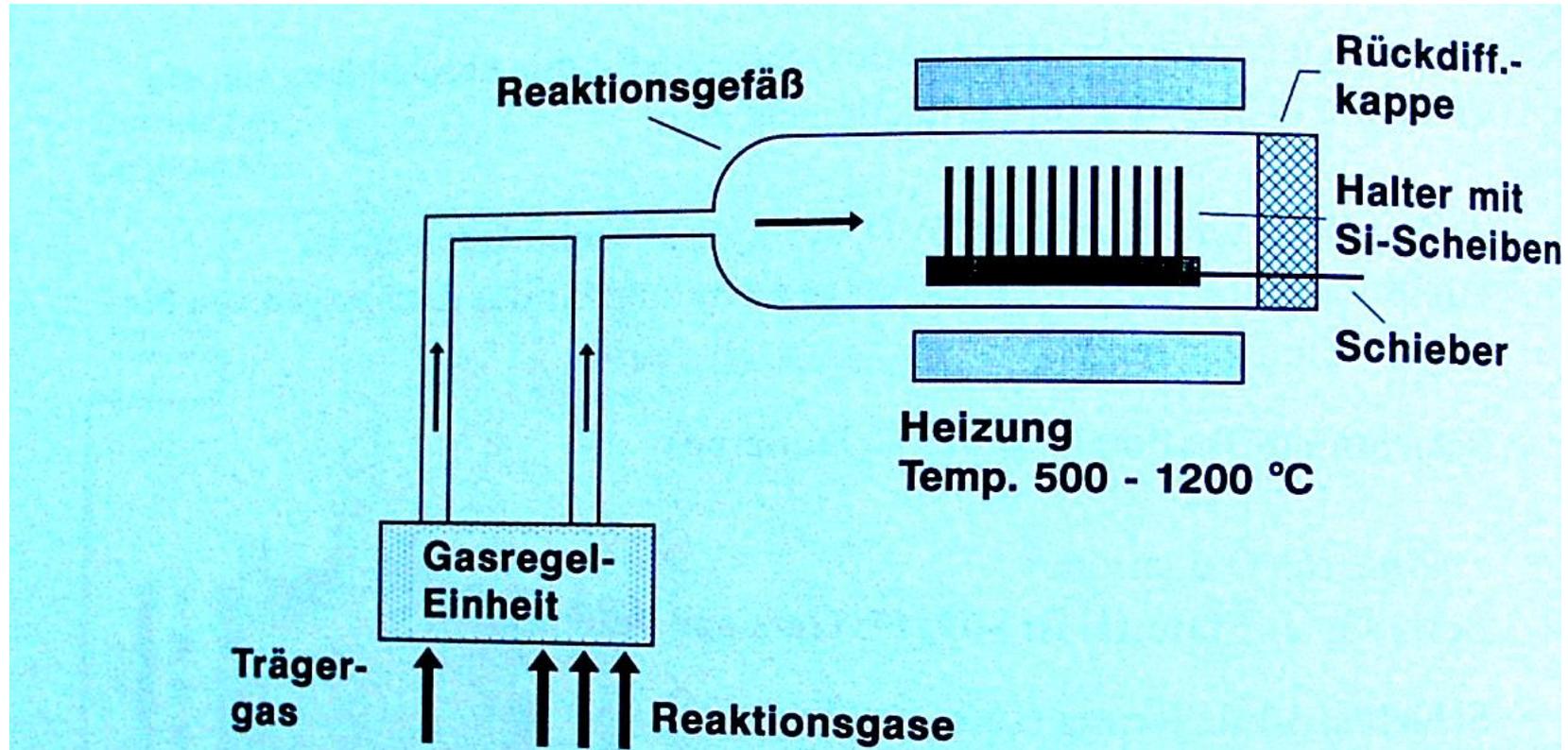
- Molekular Beam Epitaxie (MBE)
 - Molekularstrahl wird rasterförmig über Oberfläche gescannt
 - Prozessierung im Höchstvakuum
 - Beschichtungsrate sehr gering ($< 1 \mu\text{m}/\text{Stunde}$)
 - Wachstumsprozess lässt sich dafür Atomlagengenau steuern

Epitaxie Reaktoren



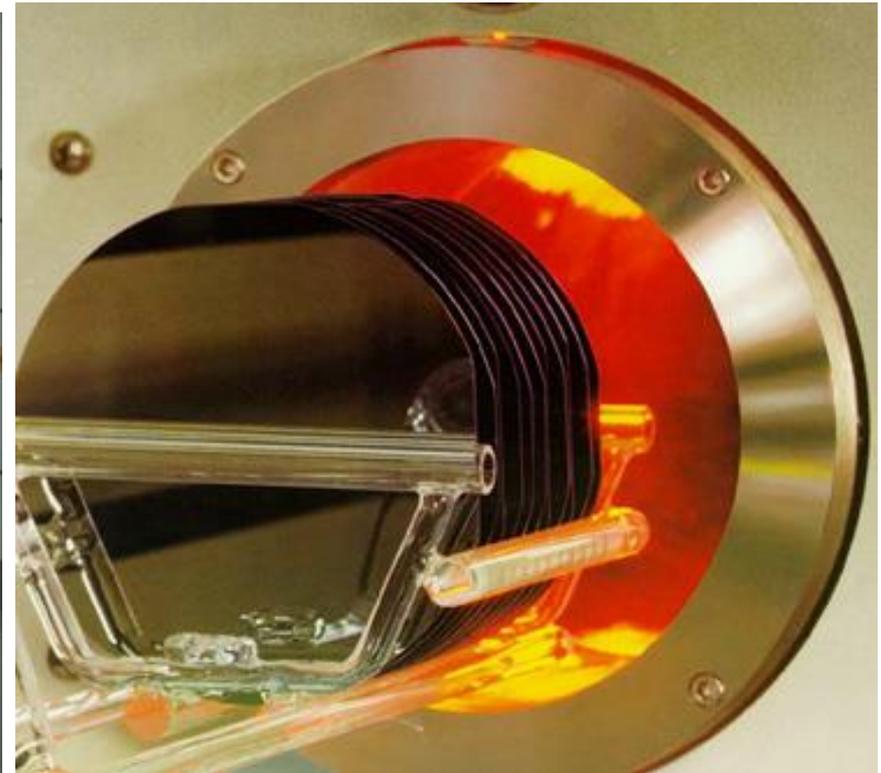
Prinzipskizze der Epitaxiereaktoren
 a) „Pancake“-Reaktor, b) Induktionsbeheizter Zylinderreaktor

Gas-Reaktor für Epitaxie

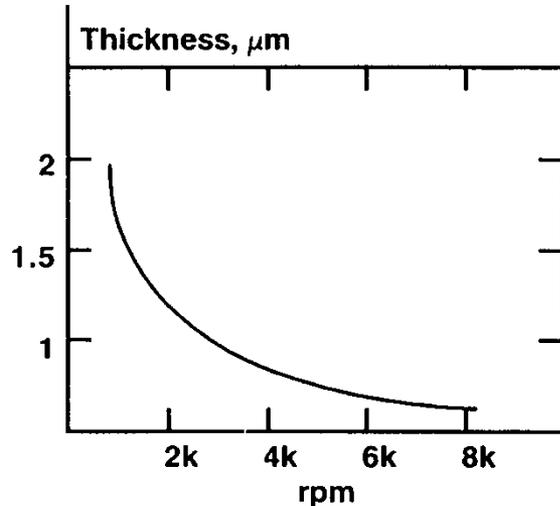


Prinzip eines Reaktoren für Hochtemperaturprozesse

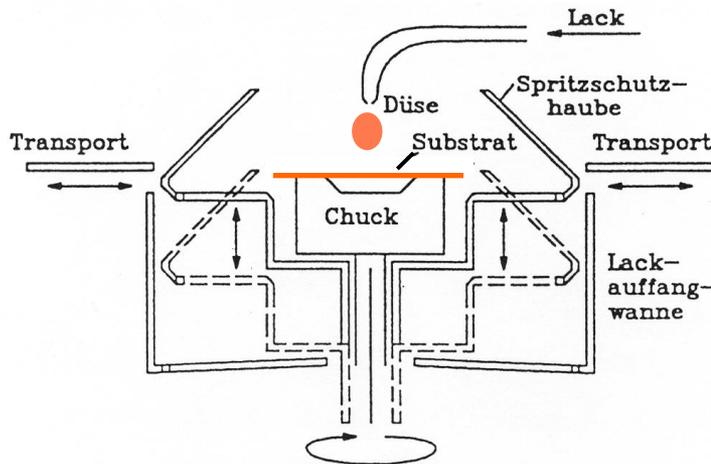
Horizontalöfen zur Schichterzeugung bei Temperaturen um 700-1100°C



Aufschleuder (Spin-On)-Verfahren zur Herstellung von Fotolackschichten



Abhängigkeit der Lackdicke von der Drehzahl



Die Lackdicke ist unabhängig von der dosierten Lackmenge!

Genauigkeit der Schichtdicke : $\pm 1\%$

Typische Lackschichten: auf Wafern:

Standard Dünnschichtprozesse
(Ätzen, Implantieren) : 1-2 μm

Spezialprozesse (Galvanik, ...): 30-90 μm

Lackdicke auf "Chrom-Masken": 0,5 μm

Prozeßablauf:

- Lack dosieren (einige cm^3)
- Lack verteilen
- Lack abschleudern
- Zentrifugalkraft wirkt gegen Viskosität, Adhäsion
- Das Abdampfen des Lösungsmittels stoppt das Abdünnen!

Zusammenfassung

- Vielfältige Beschichtungstechniken für unterschiedliche Anforderungen
- Geringe Prozesstemperaturen erforderlich: PVD und PECVD besonders geeignet
- Hohe Produktivität gefordert (bei geringem technischen Aufwand): Aufdampfen und LPCVD
- Hohe Anforderung an Kantenabdeckung: LPCVD und PECVD

Verfahren	PVD Aufdampfen	Sputtern	CVD APCVD	LPCVD	PECVD
Temp.	100 °C	< 300 °C	> 1000 °C	400 – 1000 °C	200 – 400 °C
Porendichte	Hoch	Mittel	Mittel	Sehr gut	Sehr gut
Kontaminationen	Gering	Hoch	Hoch	Gering	Gering
Haftung	Schlecht	Gut	Mittel	Gut	Gut
Konformität	Sehr schlecht	Schlecht	Schlecht	Sehr gut	Sehr gut

Fragensammlung

- Welche Arten der Schichtumwandlung gibt es?
- Wie funktioniert die feuchte und trockene Oxidation? Welche Vorteile und Nachteile haben die Verfahren?
- Wie funktioniert eine Sputteranlage?
- Welche Arten der Epitaxie gibt es? Was sind die Unterschiede?

SCHICHTSTRUKTURIERUNG DURCH ÄTZEN

Einordnung der Schichtstrukturierung

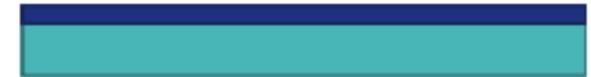
Substrat mit Bearbeitungsrückständen
oder Verschmutzungen



Reinigung / Strippen
der Maske des letzten Zyklus



Schichtabscheidung



Lithographie



Strukturübertragung (1)



Strukturübertragung (2)



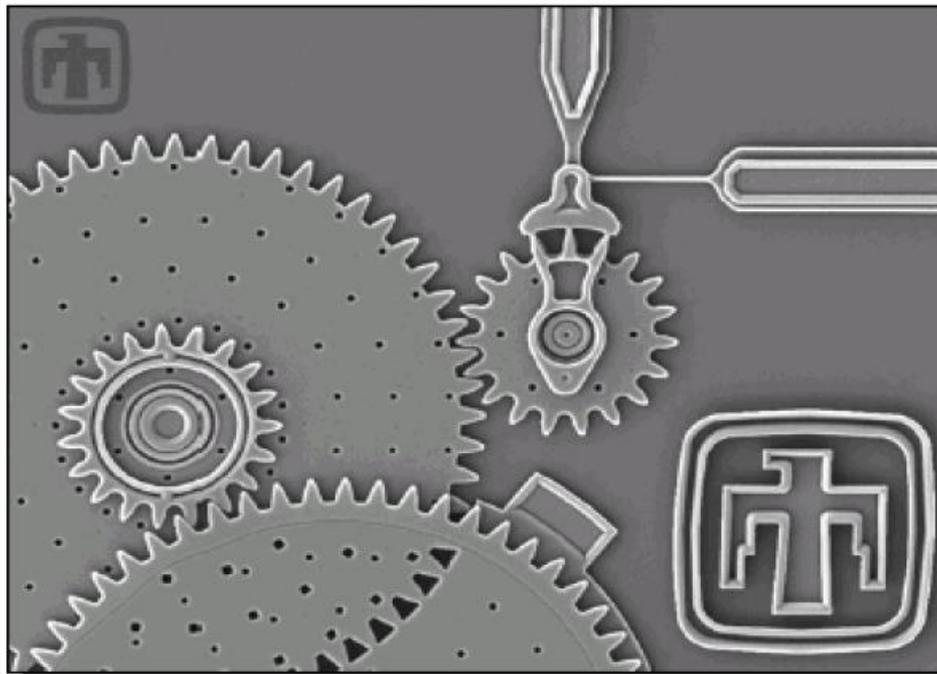
Je nach Komplexität
bis zu 100 Zyklen

Ätzen: Übertragung einer durch
Photolithographie erzeugten
Struktur in ein Substrat bzw. eine
Schicht

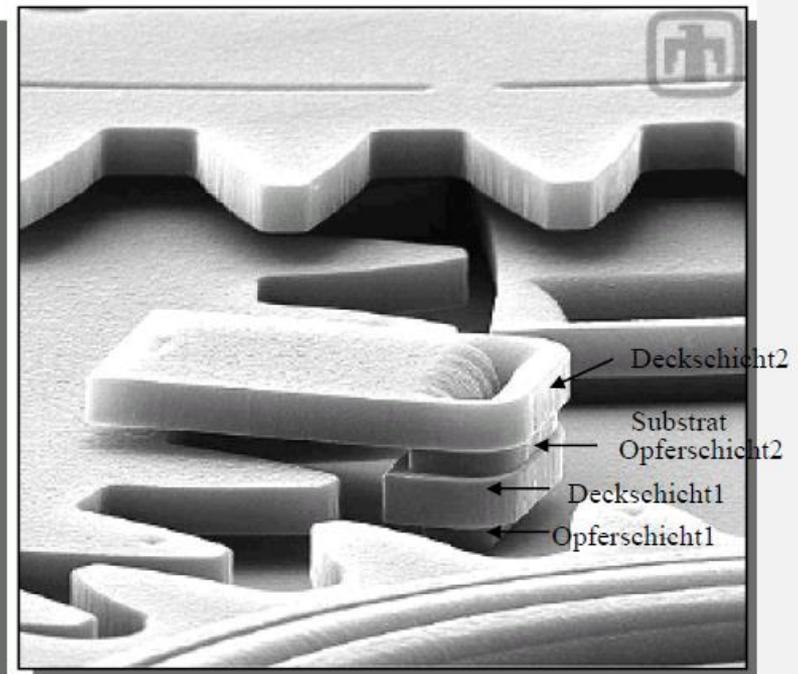
Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Ätzen in der Oberflächen-Mikro-Mechanik

- Strukturen werden aus einer Folge von Schichten herausgeätzt, die auf dem Substrat abgeschieden wurden.
- Abfolge aus selektiv ätzbaren Substanzen (z.B. Poly-Si und SiO₂)



Mikrogetriebe



Detail aus dem Mikrogetriebe

Ätzen in der Bulk (Volumen)-Mikro-Mechanik

- Strukturen werden aus dem Substrat herausgeätzt
- Besonders geeignet für tiefe Strukturen

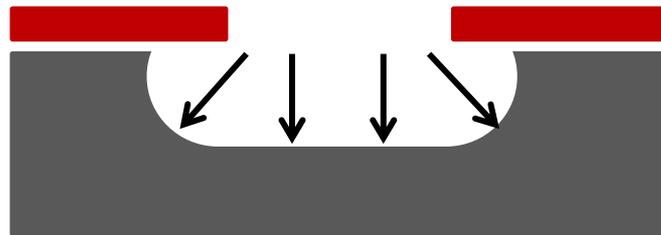
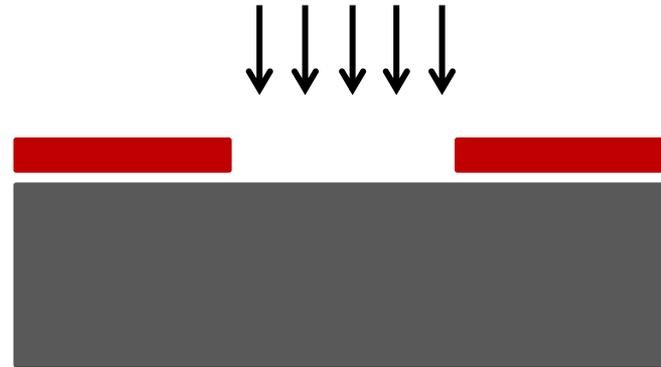


BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

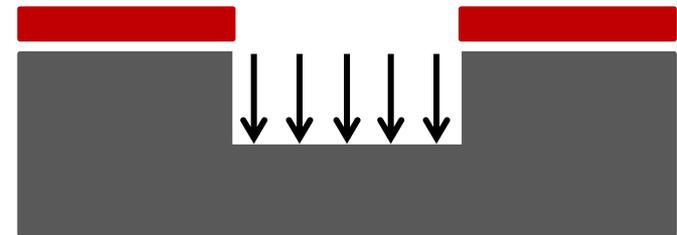
Begriff	Definition
Ätzrate $r = \Delta z / t$	Abtragsgeschwindigkeit des zu ätzenden Materials [$\mu\text{m}/\text{min}$] bzw. der zu ätzenden Schicht
Selektivität $S = r_{\text{mat1}} / r_{\text{mat2}}$	Verhältnis der Ätzrate des zu ätzenden Materials zur Ätzrate eines anderen Materials, z.B. die Fotolackmaske, die unter der zu ätzenden Schicht liegende Schicht, das Substrat.
Ätzzeit $t = \Delta z / r$	Die Dauer des Ätzvorgangs t ergibt sich aus dem Quotienten Schichtdicke / Ätzrate zzgl. einer prozessabhängigen Zeitvorgabe. Durch die Vorgabe werden Inhomogenitäten der Schichtdicke, der ätzenden Schicht oder der Ätzrate ausgeglichen, damit das zu ätzende Material restlos entfernt wird
Überätzen	Die Dauer des Ätzvorgangs ist größer als die Ätzzeit
Unterätzen	Unterätzen der Maske beim isotropen Ätzen

Begriff	Definition
Isotropie	Die Ätzrate ist richtungsunabhängig
Anisotropie	Die Ätzrate ist richtungsabhängig
Anisotropiefaktor (A)	Beschreibt das Verhältnis der Ätzrate in horizontale und vertikale Richtung $A = 1 - V_1 / V_2$ bzw. $A = 1 - V_{\text{horizontal}} / V_{\text{vertikal}}$; $0 \leq A \leq 1$ (A= 1 größte Anisotropie, A= 0 Isotropie)
Nasstechnik	Materialabtrag mit einer sauren oder basischen Lösung, die anorganisch oder organisch sein kann
Trockentechnik	Materialabtrag mit Gas, Ionen oder reaktivem Plasma

Isotrop - Anisotrop

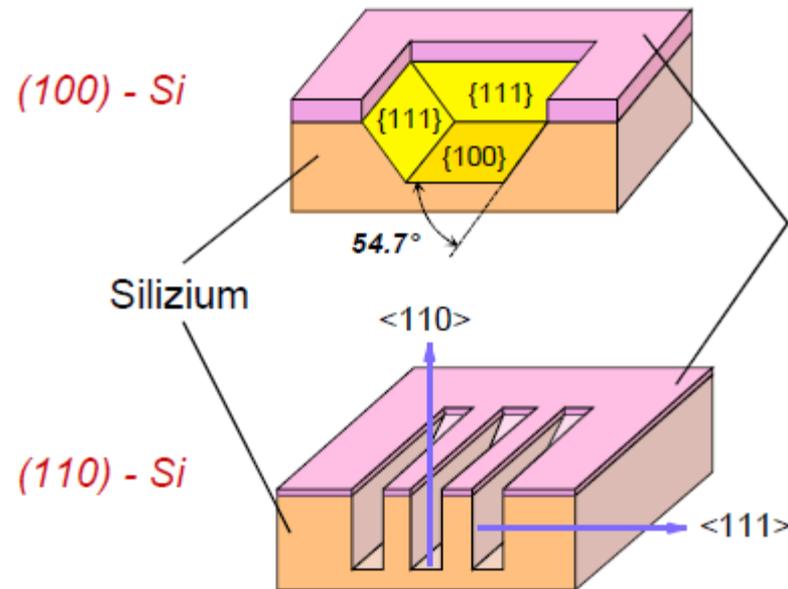
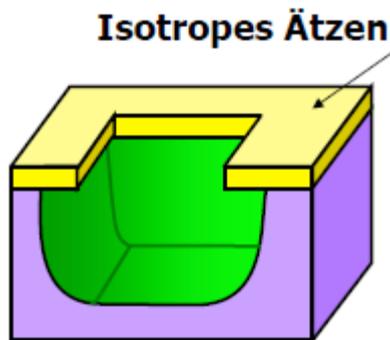


isotrop



anisotrop

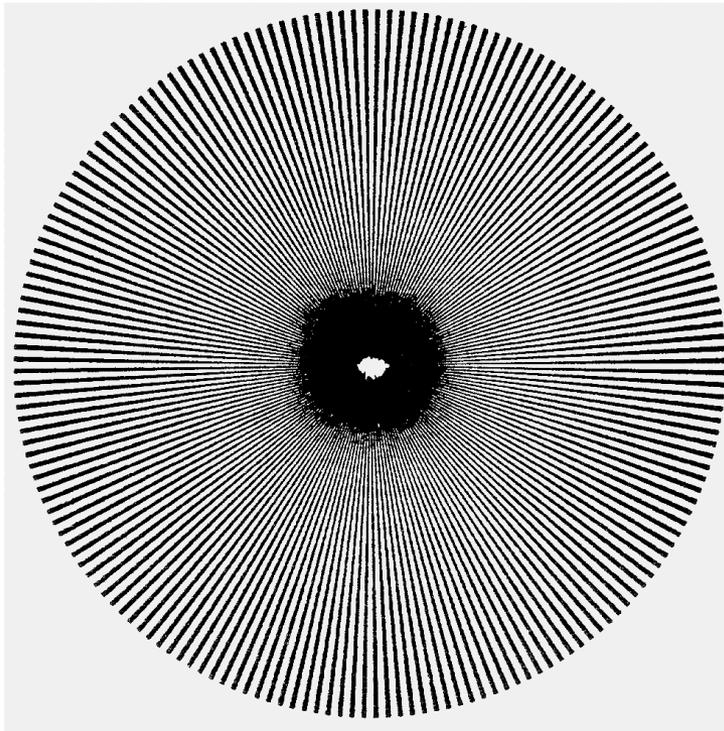
Isotrop - Anisotrop



Ätzen von Silizium mit KOH (Kalilauge)

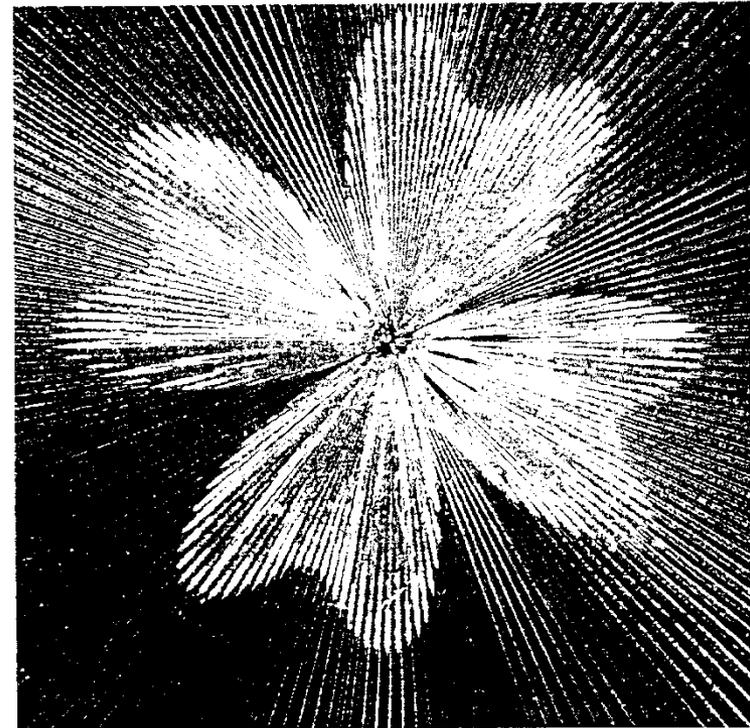
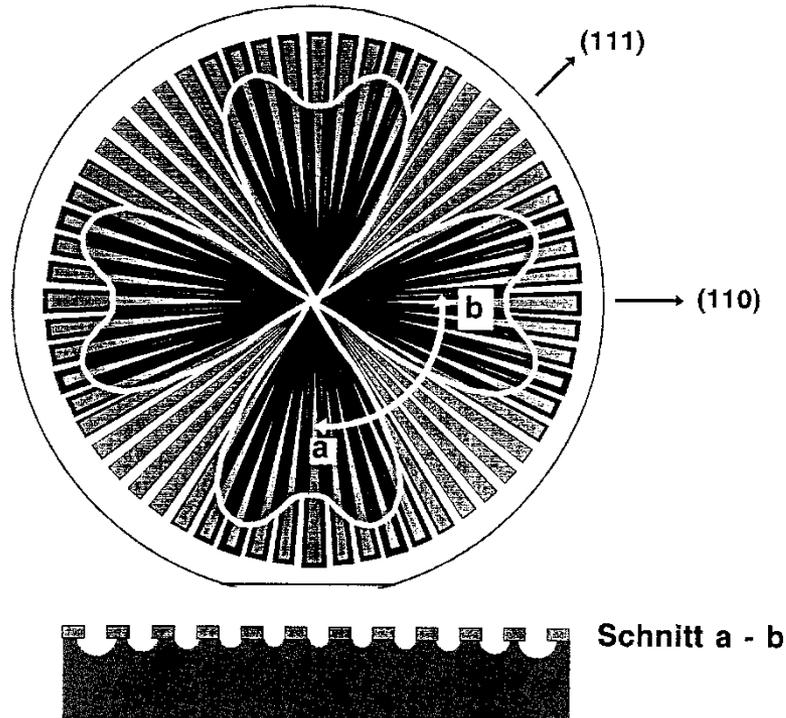
Charakterisierung der Anisotropie

- Anisotropie wird durch Messung der Unterätzung entlang verschiedener Kristallrichtungen bestimmt

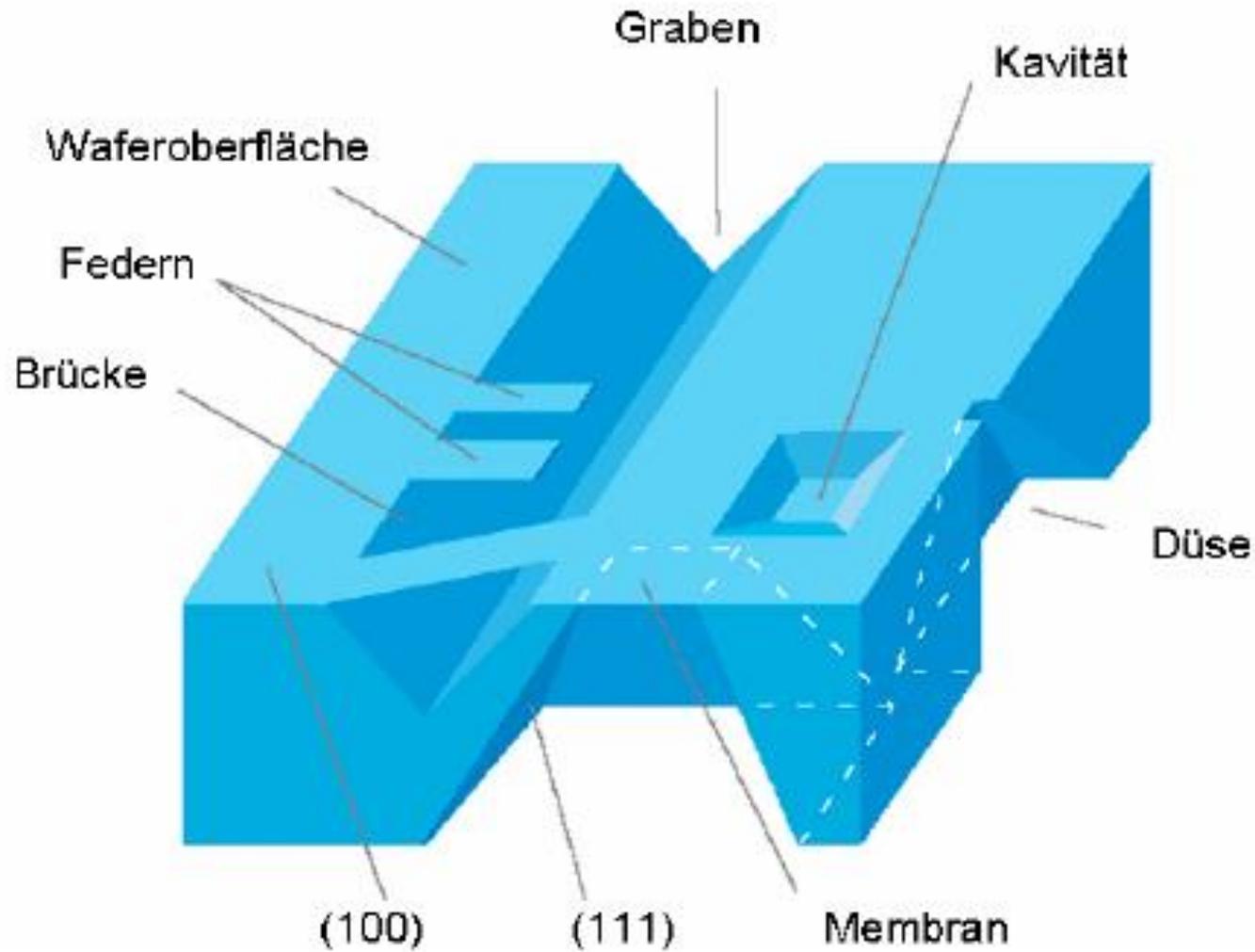


Testmaske zur Untersuchung der Orientierungsabhängigkeit der lateralen Unterätzrate . Der Winkelabstand zwischen den einzelnen Strahlen beträgt 1°

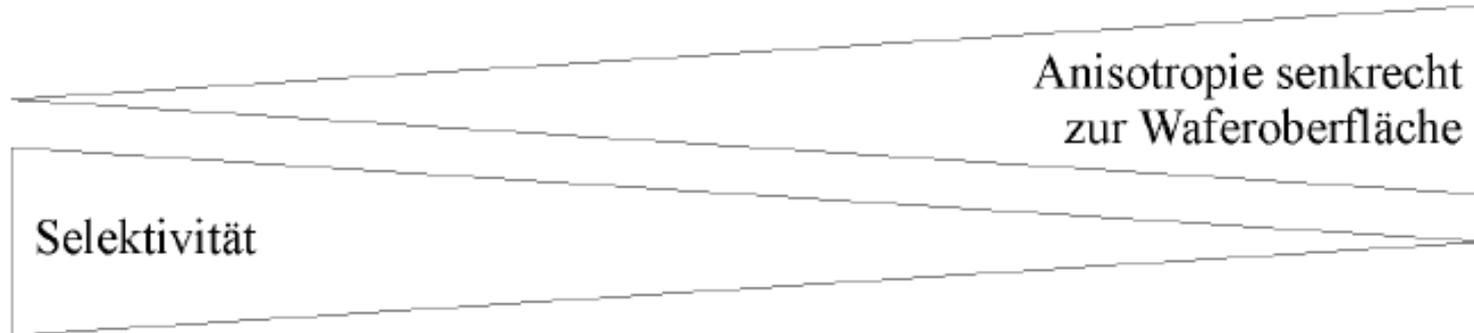
Charakterisierung der Anisotropie



Entstandenes Ätzmuster auf einer mit Ethylendiamin geätzten (100)-Scheibe



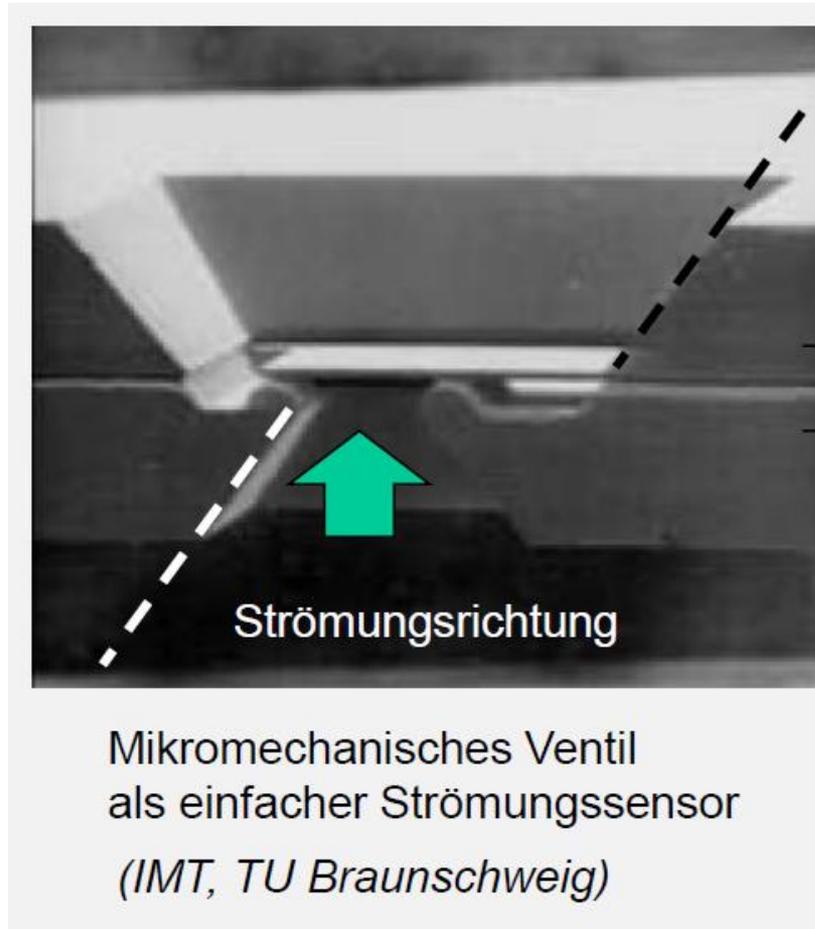
Selektivität ↔ Anisotropie



Naßchem. Ätzen	BE Barrel-Ätzen	PE Plasma-ätzen	RIE Reaktives Ionen-ätzen	RIBE Reaktives Ionenstrahl-ätzen	IE Sputter-ätzen	IBE Ionenstrahl-ätzen
Chemische Verfahren			Trockenätzverfahren		Physikalische Verfahren	
			Kombination Chemie / Physik			

ANWENDUNGSBEISPIELE

Beispiel Strömungssensor



Anisotropes Ätzen

Beispiel Beschleunigungssensor

■ Messparameter

- 3D-Beschleunigung (64Hz)
 - Messbereich +/- 8g, Auflösung 4mg
- Luftdruck / Höhe (1Hz)
 - Barometrische Höhenmessung, Auflösung ca. 15cm



■ Aufzeichnungsdauer

- Speicher: ca. 2 Monate bei Rohdatenaufzeichnung
- Batterielaufzeit: ca. 7 Tage

■ Features

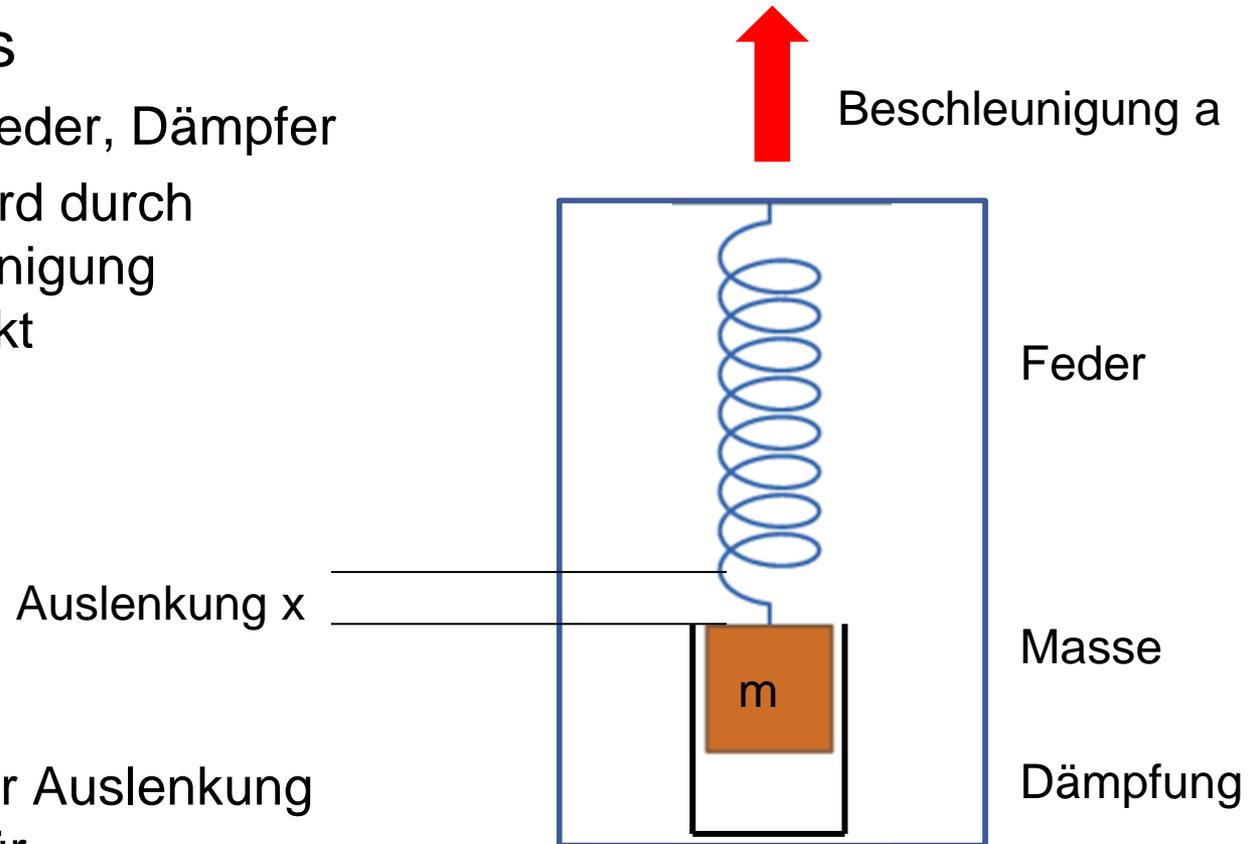
- Bessere Aktivitätserkennung durch Drucksensor
- Exakte, modellbasierte Energieumsatzbestimmung
- Optimiert für Studien
- Rohdatenaufzeichnung, offenes Datenformat
- Verschiedene Tragesysteme



Beispiel Beschleunigungssensor

- Besteht aus
 - Masse, Feder, Dämpfer
 - Masse wird durch Beschleunigung ausgelenkt

- Größe der Auslenkung ist Maß für Beschleunigung



Beschleunigungssensoren

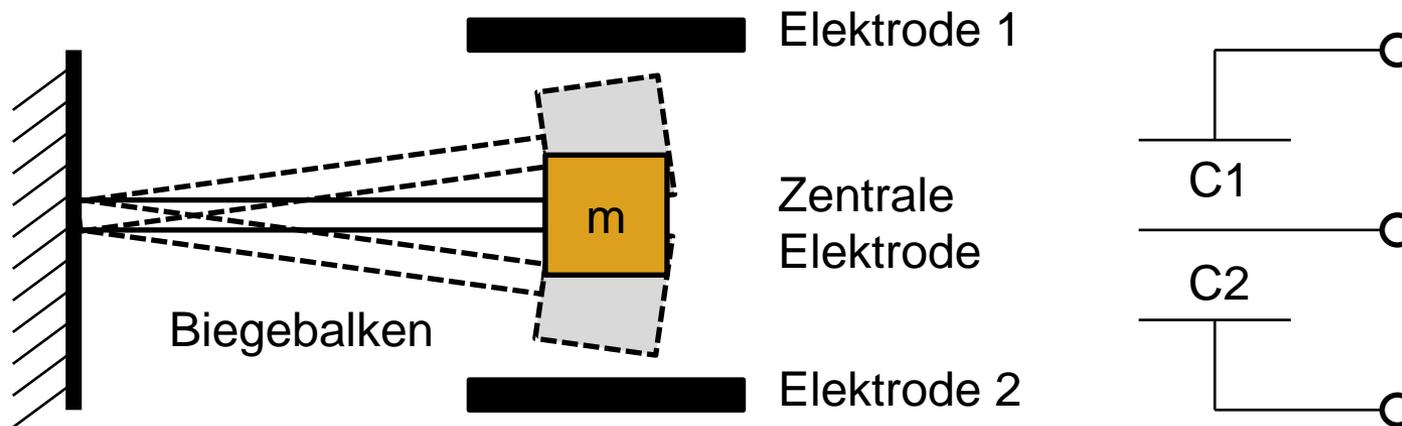
- Wichtigste Sensoren:
 - Beschleunigungssensor
 - Neigungssensor (Messung der Erdbeschleunigung)

- Unterscheidung nach Wirkprinzip
 - Kapazitiv
 - Piezoresistiv

- Unterscheidung nach Aufbau
 - Hybrid
 - Monolithisch

Kapazitiver Beschleunigungssensor

- Auslenkung verändert die Kapazität eines Kondensators

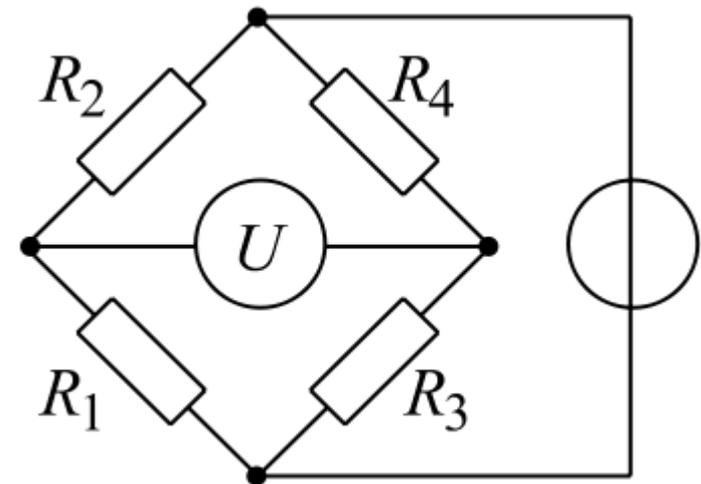
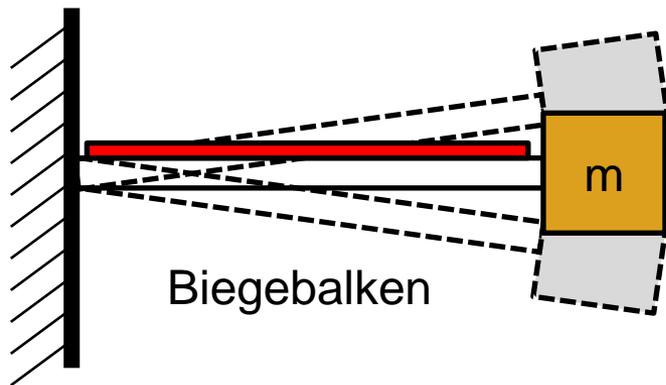


Nachteile: aufwendige Signalverarbeitung (sehr kleine Kapazitätsänderungen)

Vorteile: einfache Gegenkopplung (Null-Mode) möglich

Piezoresistiver Beschleunigungssensor

- Auslenkung verändert den Widerstand eines piezoresistiven Materials

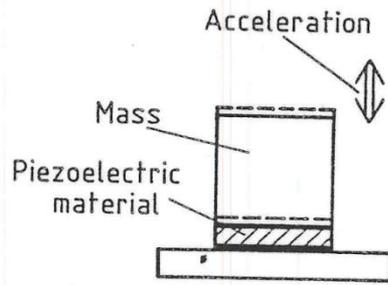


Vorteile: Einfach auszulesen (Messbrücke)

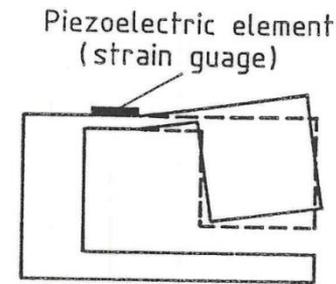
Nachteile: Offset und Empfindlichkeit temperaturabhängig

→ Kompensation notwendig

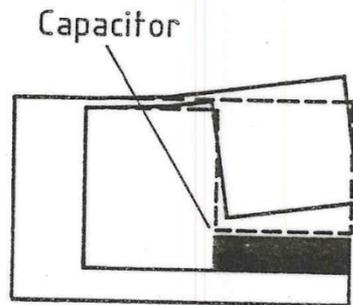
Wirkprinzipien von Beschleunigungssensoren



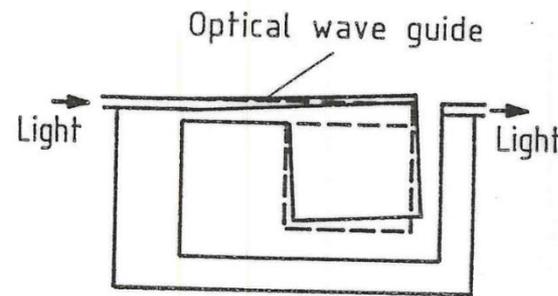
(a)



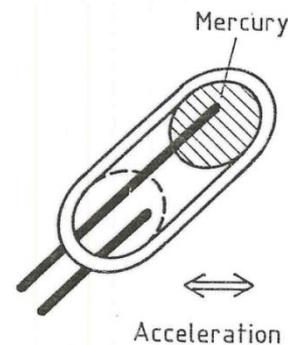
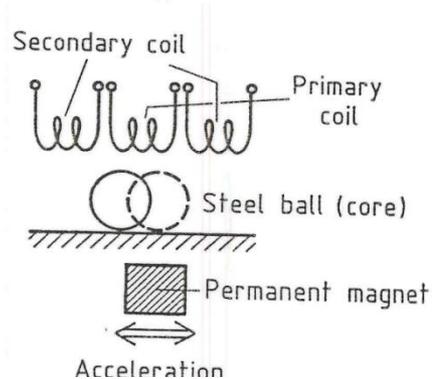
(b)



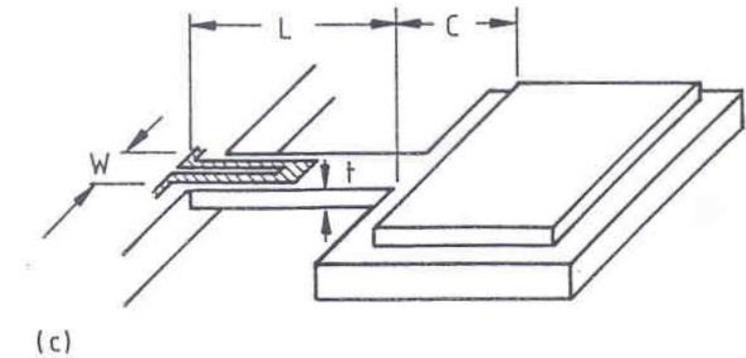
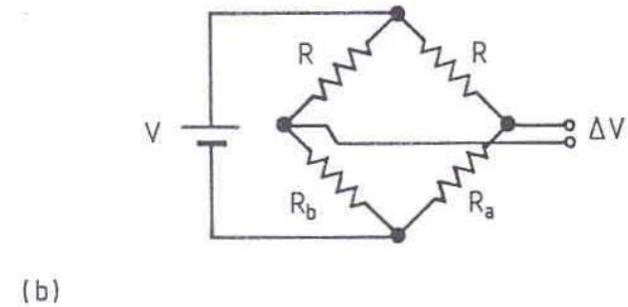
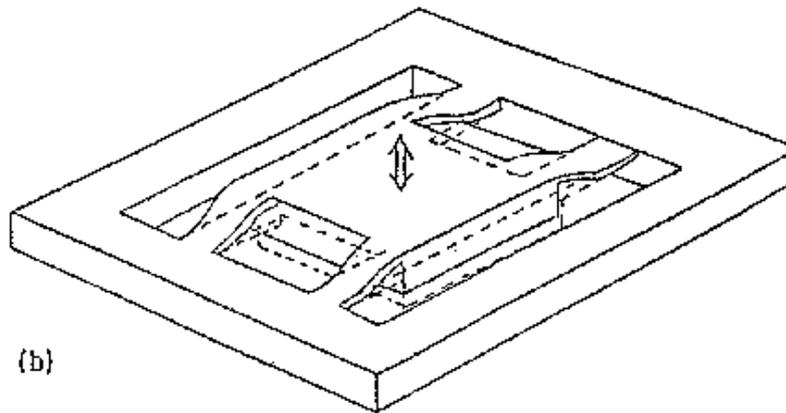
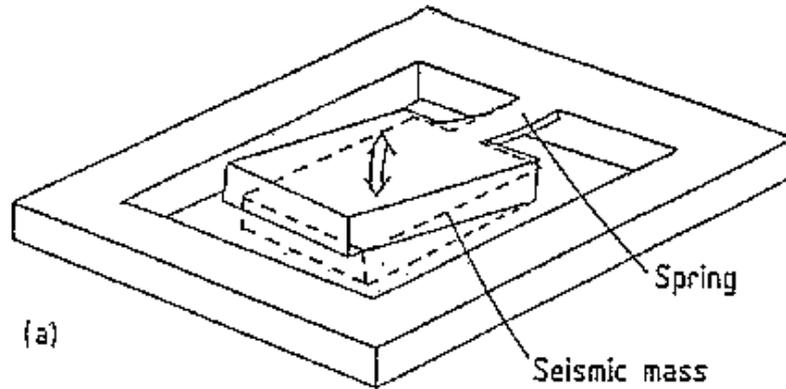
(d)



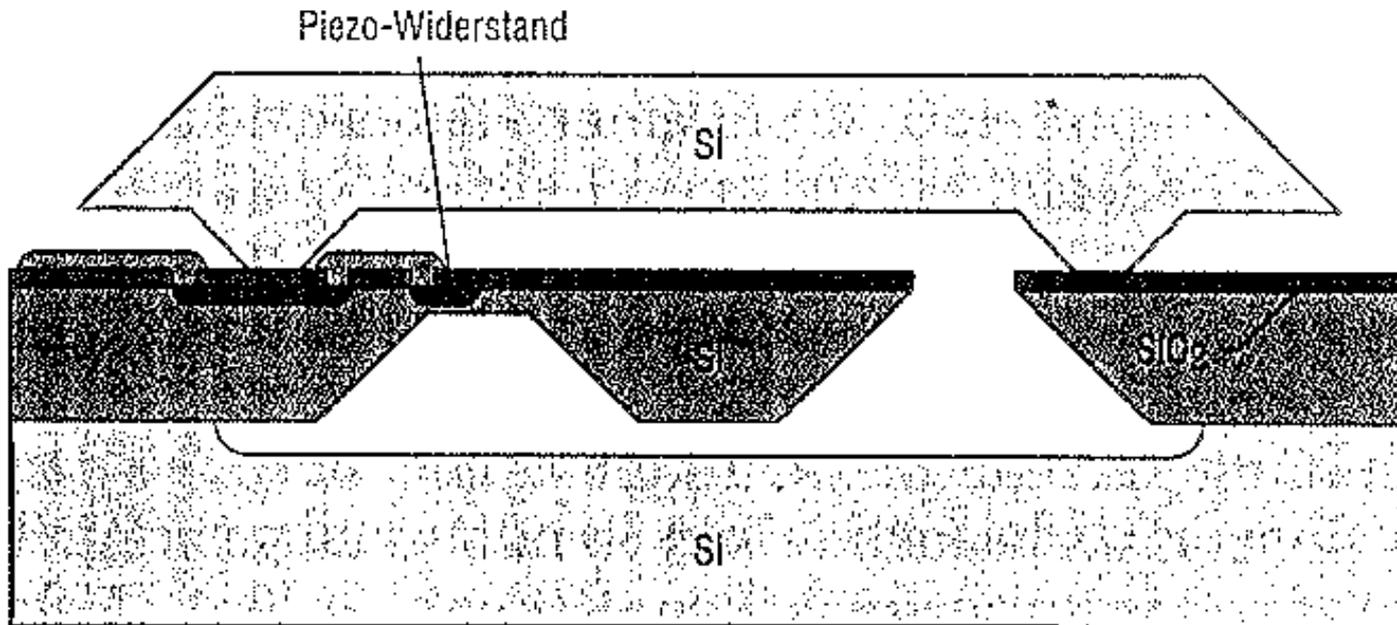
(e)



Beschleunigungssensoren

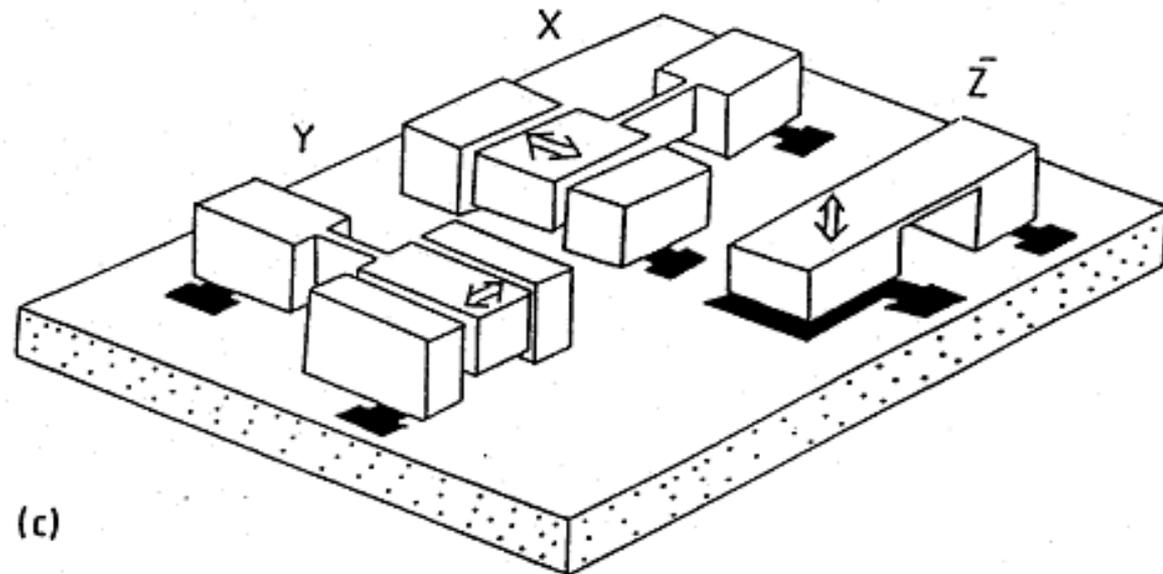


Piezoresistiver Beschleunigungssensor (Hybrid)

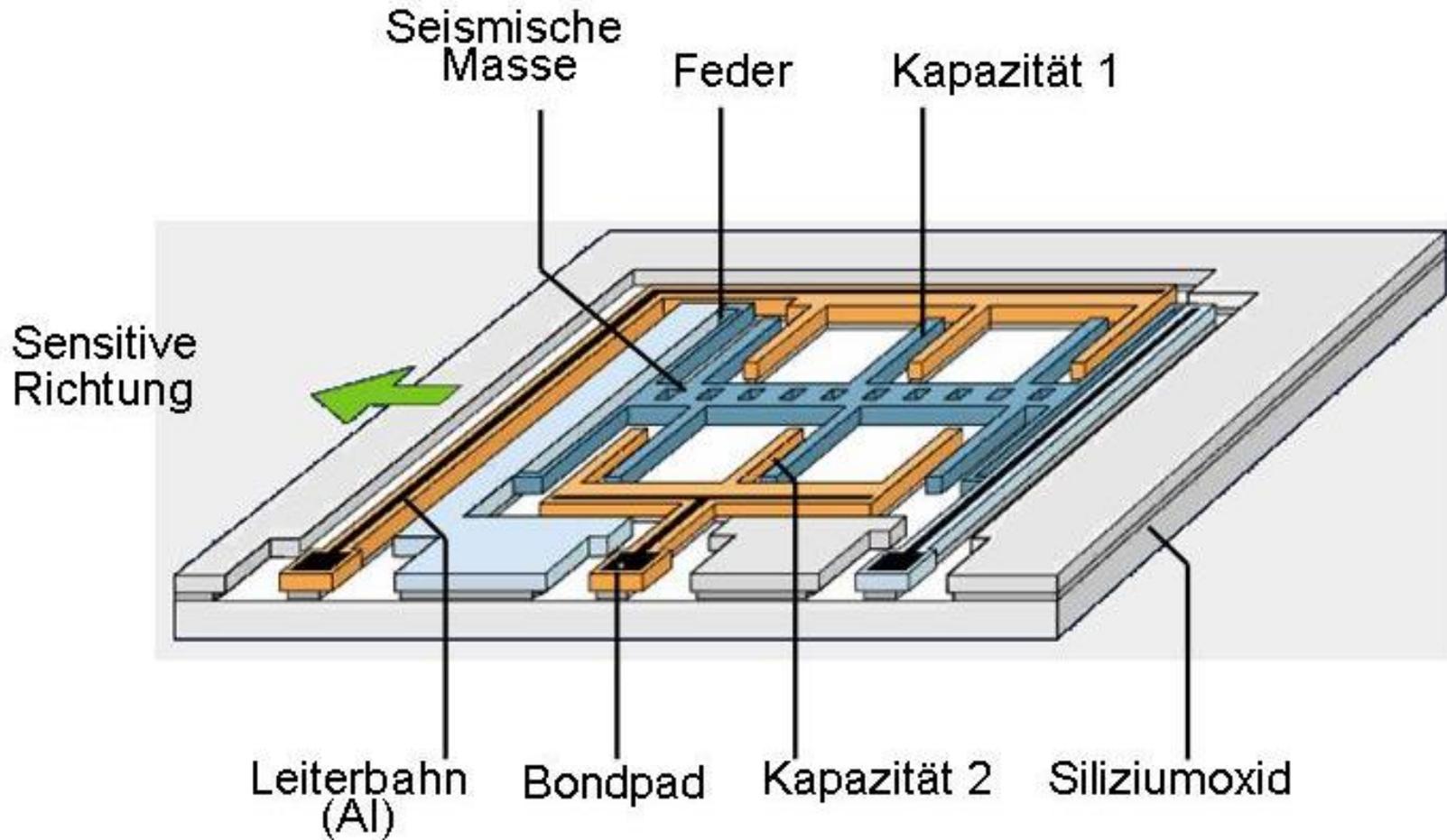


Hybride Beschleunigungssensoren

3-axialer
Beschleunigungssensor in
LIGA-Technik



Monolitische Beschleunigungssensoren



Monolitische Beschleunigungssensoren

