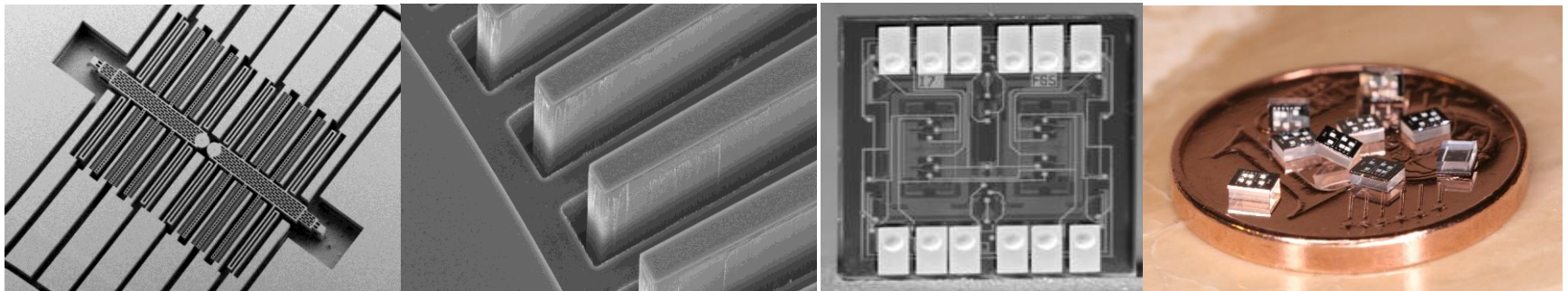
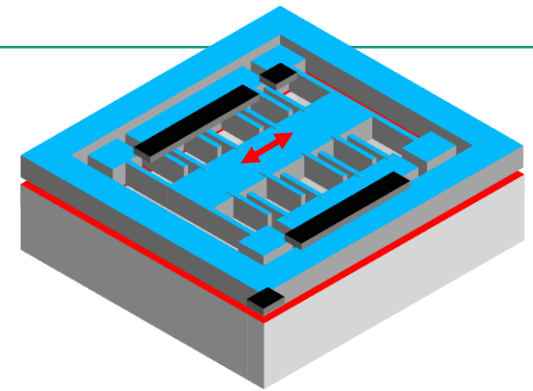


# MEMS-Technologien für hochpräzise Inertialsensoren

## MEMS technologies for high performance inertial sensors

Karla Hiller, Susann Hahn, Roman Forke, Dirk Wunsch, Knut Gottfried, Mathias Franz, Matthias Küchler



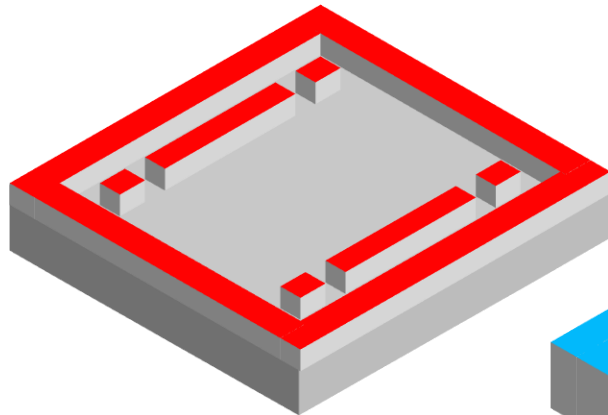
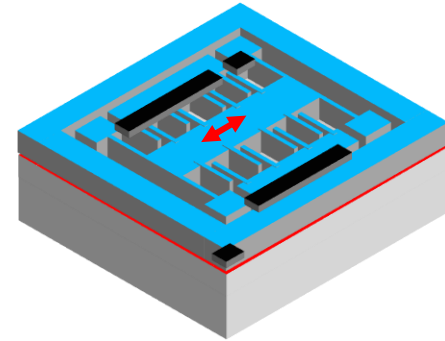
# Agenda

- Einführung BDRIE-Technologie
- Design-Aspekte und Designregeln
- Ätzprozess
- Verkapselung für Si-Si-Varianten
- Verkapselung für Glas-Si-Glas-Varianten
- Anwendungsbeispiele
- Zusammenfassung

# BDRIE-Technologie (Bonding and Deep RIE)

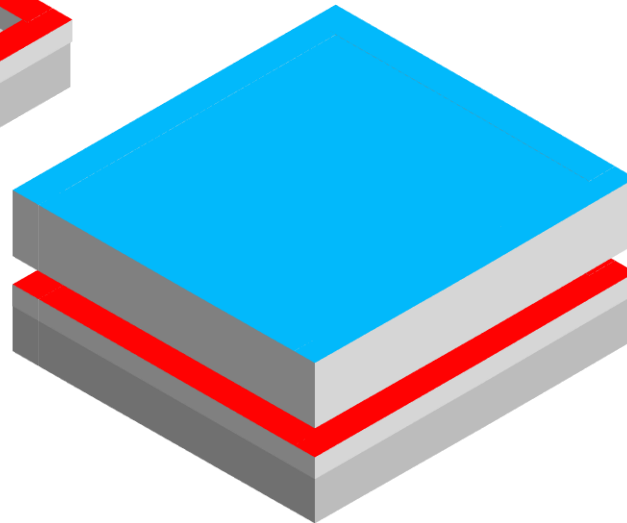
Prinzip: Waferverbund mit vorstrukturierter Kavität

SOI-Variante:

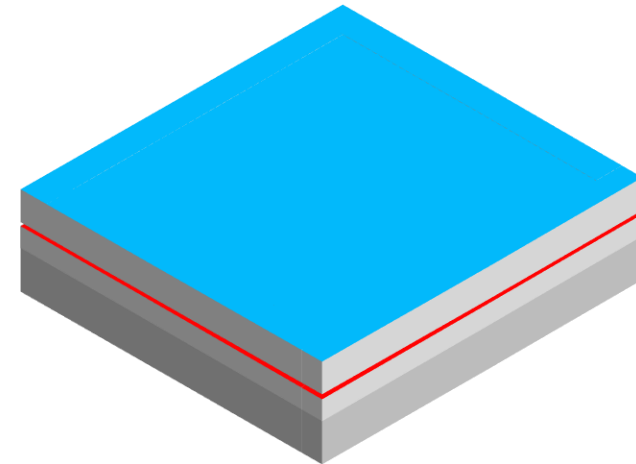


- 1 Thermische Oxidation
- 2 Oxid ätzen
- 3 Si ätzen der Kavität

4 Direktes Bonden 2. Wafer



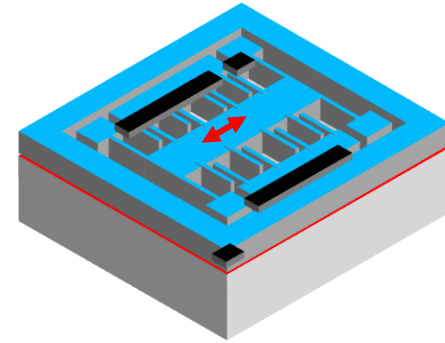
5 Abdünnen (Schleifen, Ätzen, Polieren)



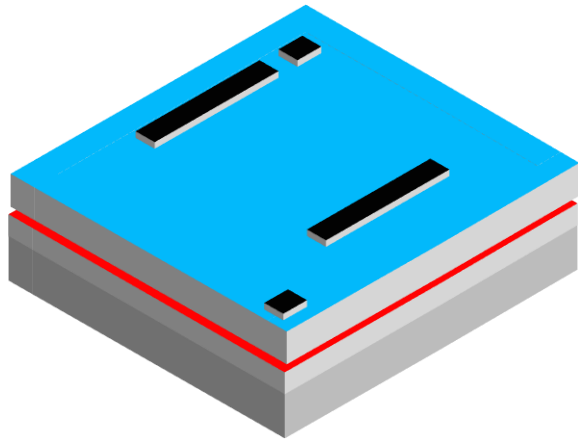
# BDRIE-Technologie (Bonding and Deep RIE)

Prinzip: Waferverbund mit vorstrukturierter Kavität

SOI-Variante:

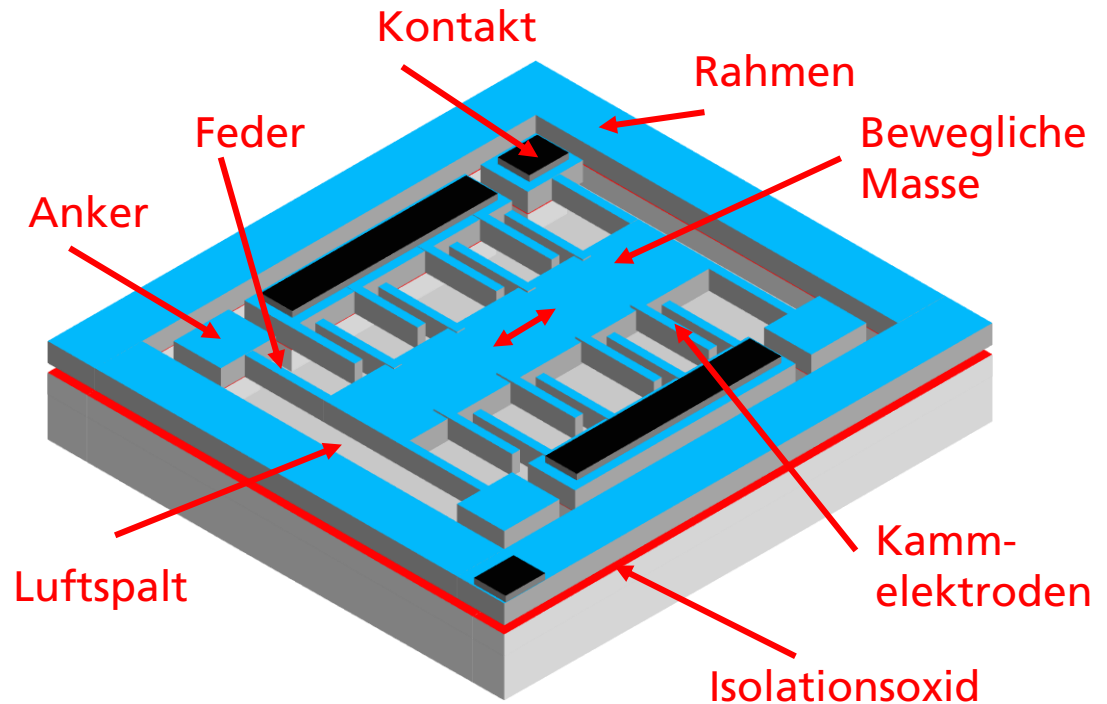


8 Ätzen Si bis in die Kavität

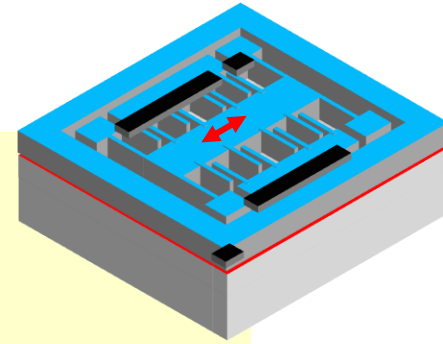


6 Sputtern Aluminium

7 Ätzen Aluminium



# BDRIE-Technologie (Bonding and Deep RIE)

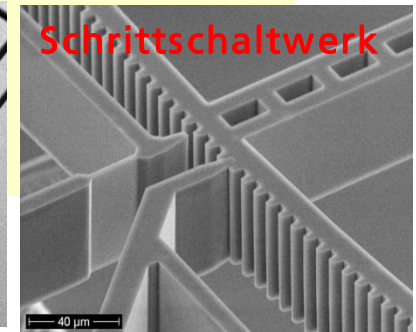
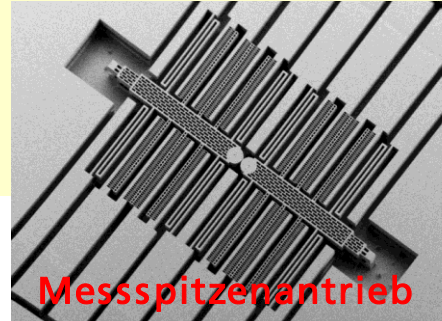
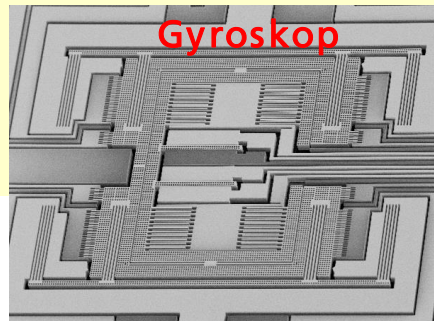
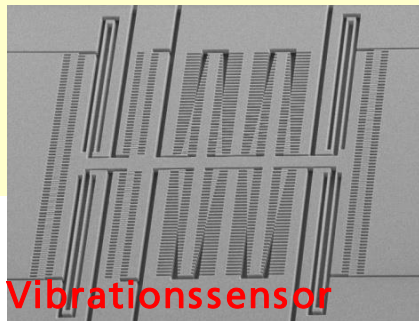


## Vorteile und Nachteile:

- Gebondete Wafer und vorgeätzte Kavitäten (teurer)
- Restriktionen im Verhältnis zwischen Größe der Kavität und Schichtdicke
- Mindestgröße der Stützstellen
- + Dicke Schichten möglich für hohe Empfindlichkeit
- + fast keine Designbeschränkungen
- + nur ein (anisotroper) Ätzschritt notwendig, um die Struktur zu definieren und freizulegen
- + kein Nassätzprozess notwendig – keine Sticking-Probleme

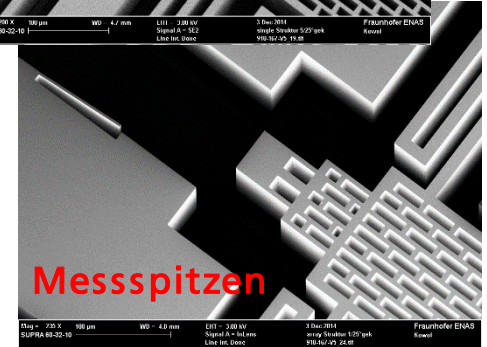
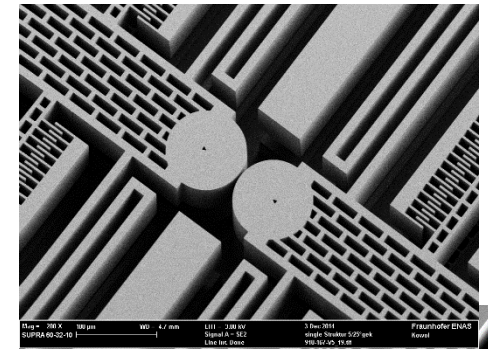
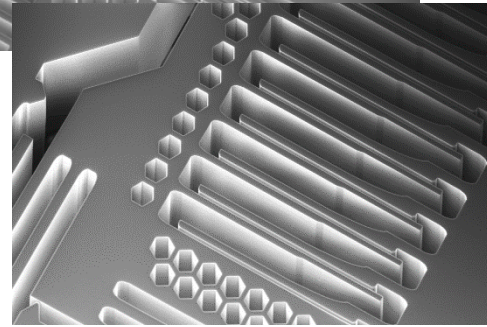
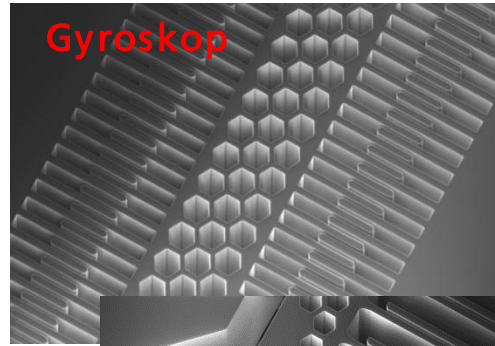
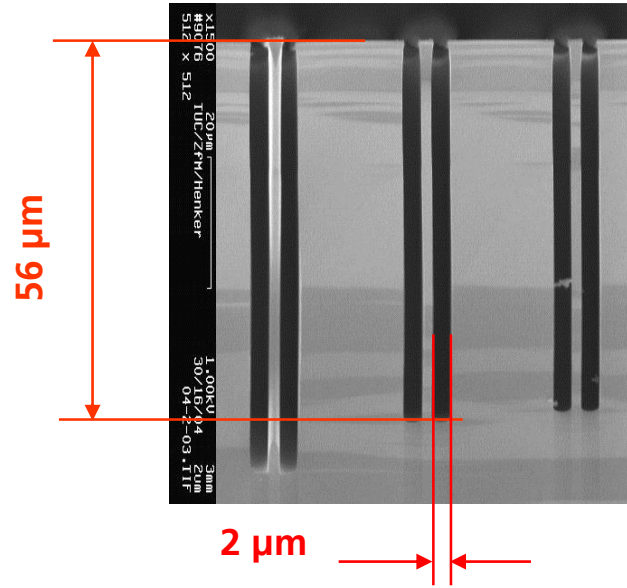
## Strukturen hergestellt in Chemnitz: Inertialsensoren, Elektrostatische Aktuatoren

- Strukturhöhe: typisch 50  $\mu\text{m}$ , bis zu 75  $\mu\text{m}$  realisiert
- kleinster Trench bei 45  $\mu\text{m}$  Höhe: 1,5  $\mu\text{m}$  (Aspektverhältnis 30:1)
- große Unterschiede in den Trenchbreiten: > 50:1



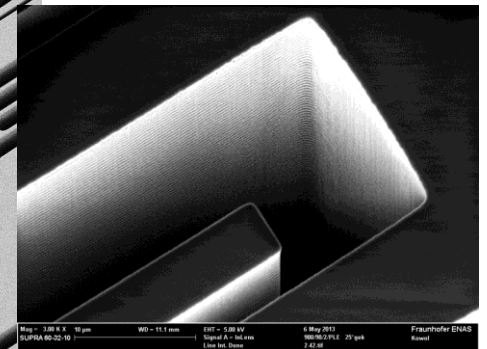
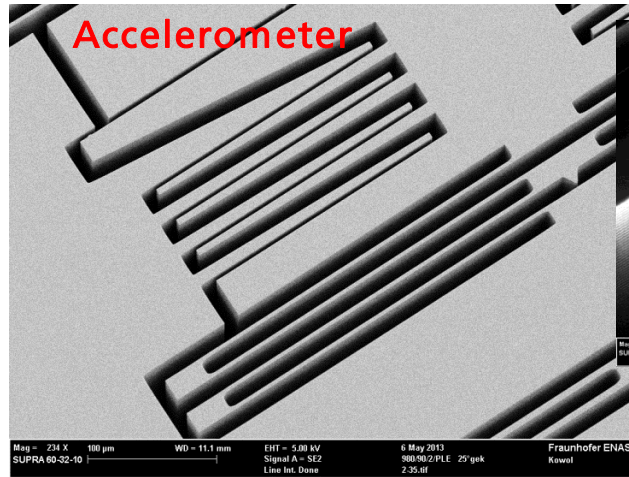
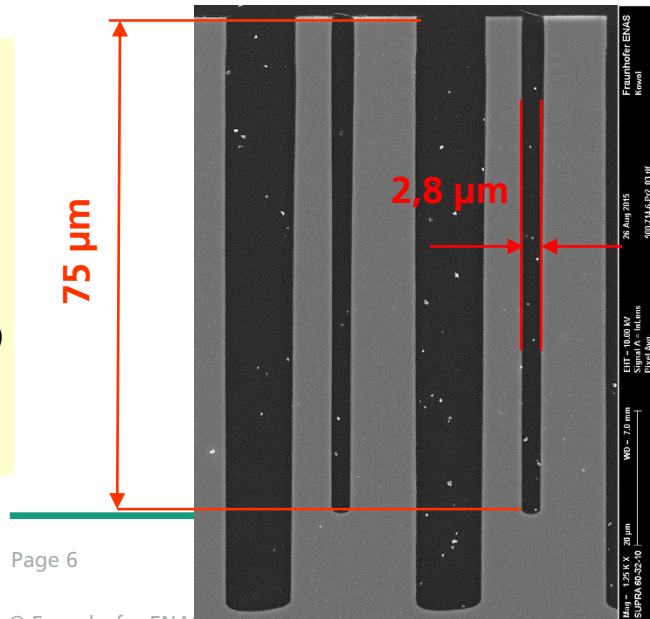
# Ätzprozess für hohes Aspektverhältnis

STS



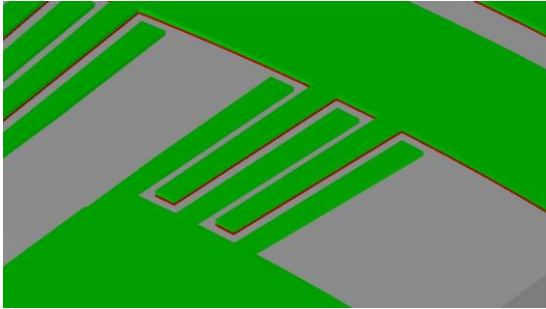
50 µm Höhe

Omega DSI

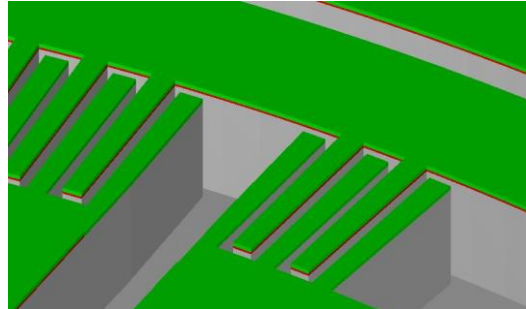


75 µm Höhe

# Vertikal gestufte Elektroden für out-of-plane-Messungen



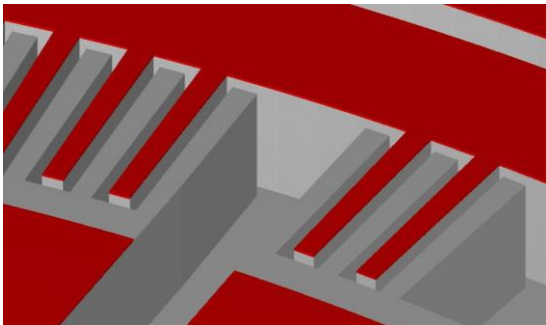
Zweistufige Ätzmaske



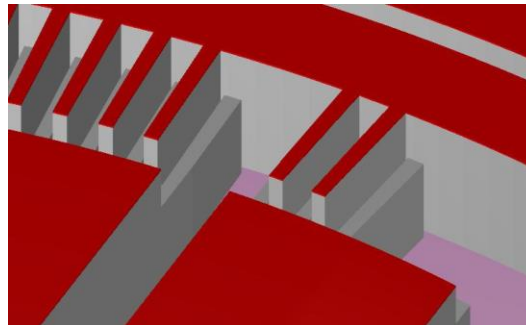
1. DRIE-Vorätzschritt



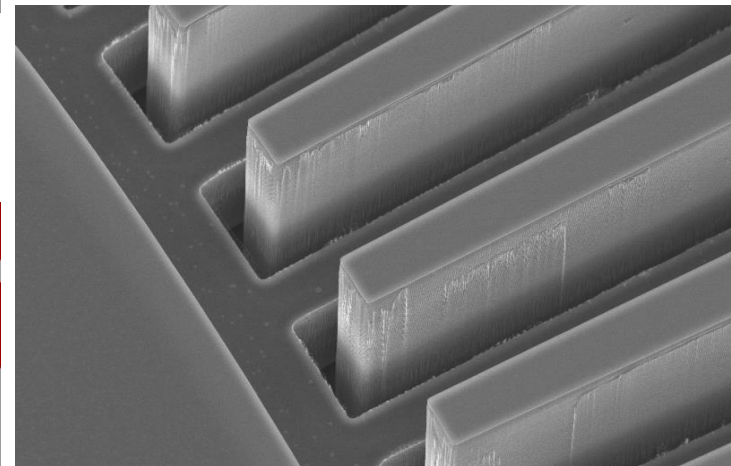
Schematischer Querschnitt



2. Entfernen obere Maske



3. DRIE-Perforationsätzung



zfm-fhg/hoebelt/30-55-22

20 µm

**Kammantrieb:**

**feststehender Kamm ca. 25 µm  
abgesenkt, Strukturhöhe 75 µm**

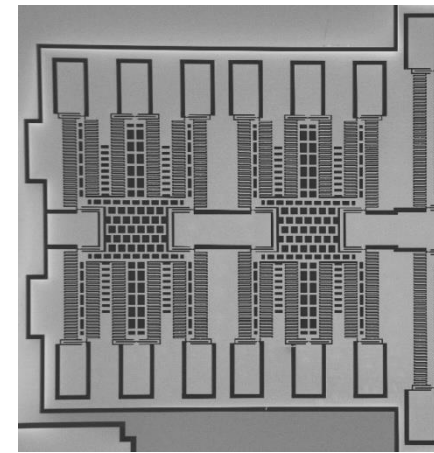
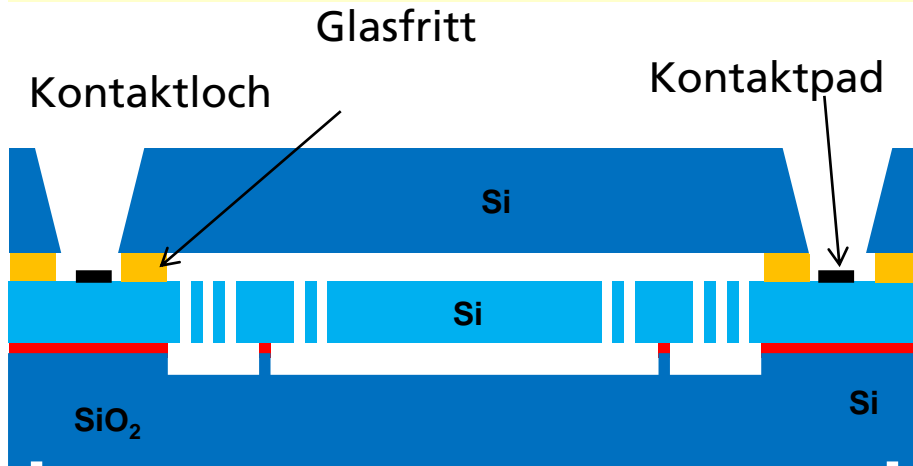
# Verkapselung von BDRIE-Strukturen (1)

## Si-Deckel mit Öffnungen

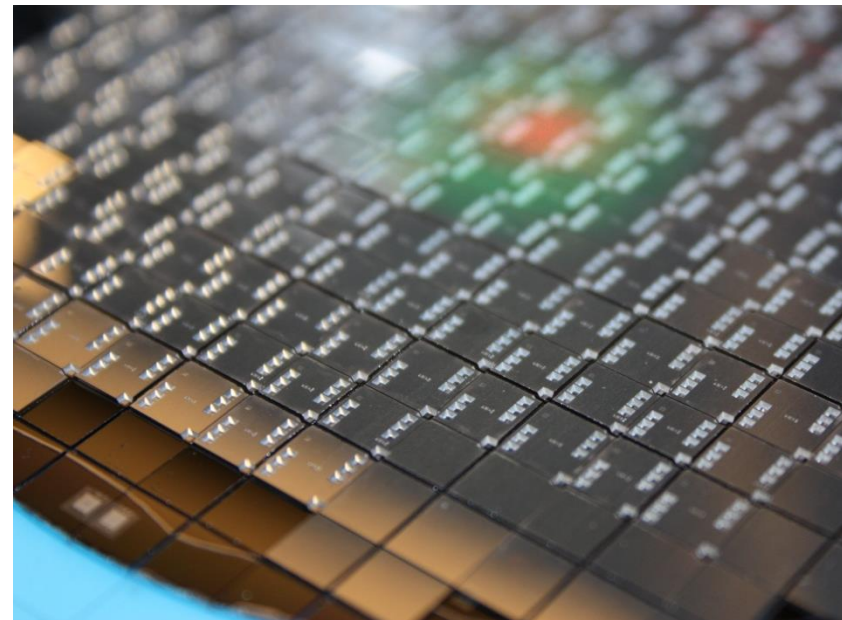
- Vorzugsweise Glasfritt-Bonden:  
Druckbereich 10 mbar...1 bar
- Anwendungsbeispiel: **Vibrationssensor**

### Nachteile:

- Große Öffnungen
- Dichtung um jedes Kontaktloch
- Keine Umverdrahtung möglich



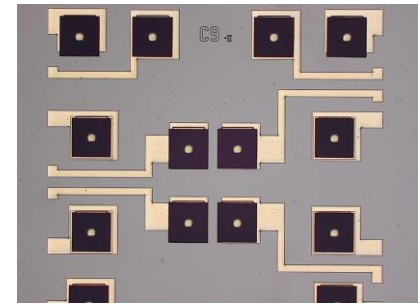
**Vibrationssensor**





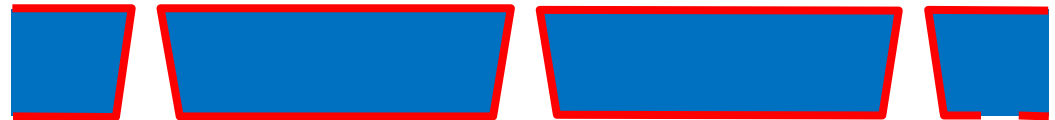
# Verkapselung von BDRIE-Strukturen (2)

## Vorgeätzte Löcher um Basic-Si-Wafer



Gyroskop

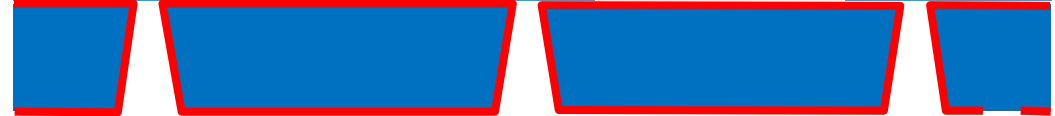
1 Si-Basiswafer mit vorgeätzten Löchern und SiO<sub>2</sub>



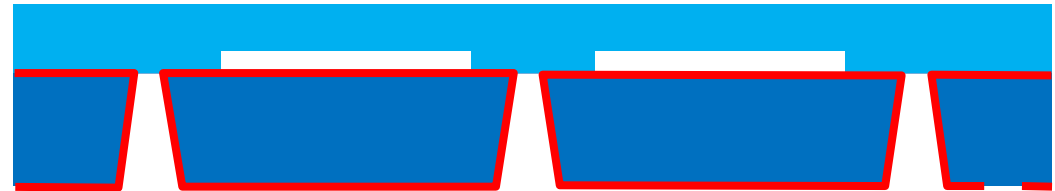
2 Si-Wafer mit vorgeätzten Kavitäten



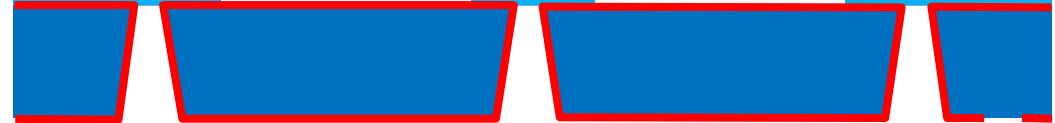
3 Direktes Bonden



4 Abdünnen des Si-Wafers



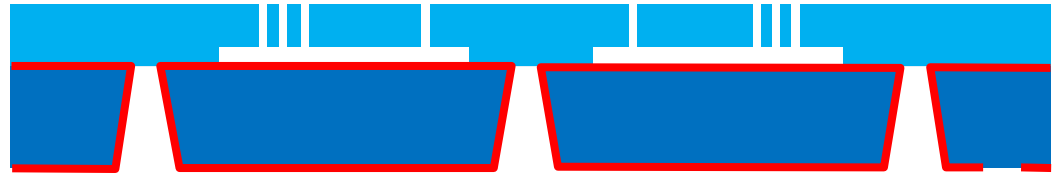
5 DRIE des Si



# Verkapselung von BDRIE-Strukturen (2)

## Vorgeätzte Löcher um Basic-Si-Wafer

5 DRIE des Si-Wafers



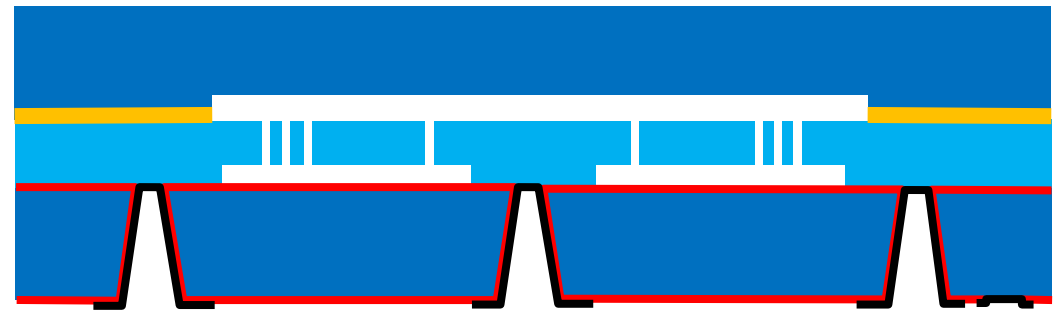
6 Si-Deckelwafer mit vorgeätzten Kavitäten



7 Direktes Bonden

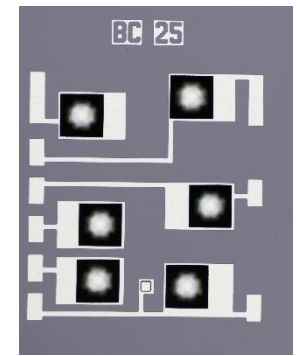


8 Abscheidung und Strukturierung Metall



# Verkapselung von BDRIE-Strukturen (3)

## Geätzte Löchern im abgedünnten Basic-Si-Wafer



Accelerometer

1 Si-Wafer mit thermischem Oxid



2 Si-Wafer mit vorgeätzten Kavitäten



3 Direktes Bonden



4 Abdünnen des Si-Wafers



5 DRIE des Si



# Verkapselung von BDRIE-Strukturen (3)

## Geätzte Löchern im abgedünnten Basic-Si-Wafer

6 Anodisches Bonden mit Glas oder direktes Bonden mit Si (vorstrukt. Kavitäten)



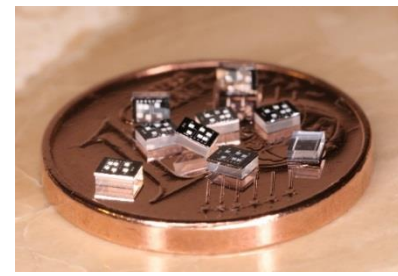
7 Abdünnen des unteren Si-Wafers



8 Nassätzen von Löchern ins Si



# Verkapselung von BDRIE-Strukturen (3) Geätzte Löchern im abgedünnten Basic-Si-Wafer



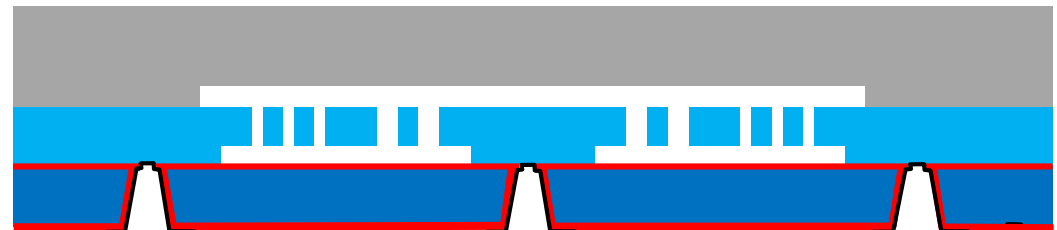
9 Abscheidung von SiO<sub>2</sub> (Isolator)



10 Ätzen von Kontaktöffnungen

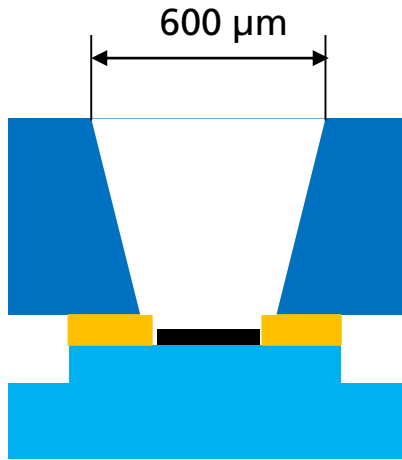


11 Sputtern und Strukturieren von  
Metall

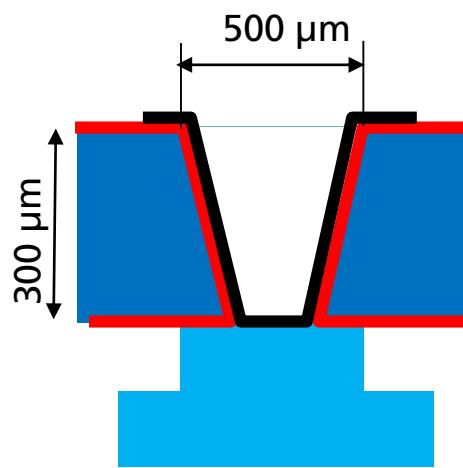


# Verkapselung von BDRIE-Strukturen – Vergleich Lochgrößen

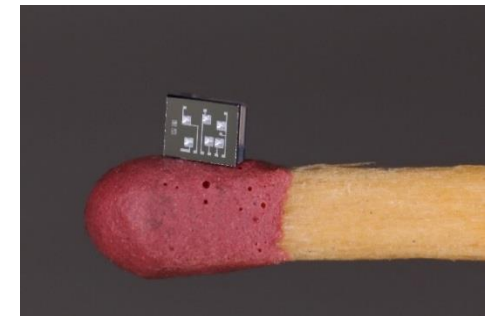
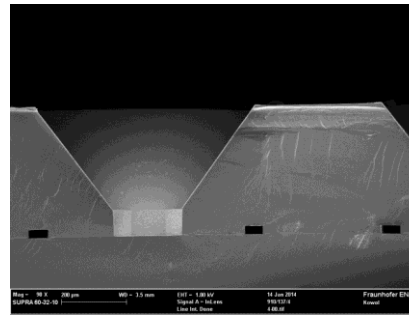
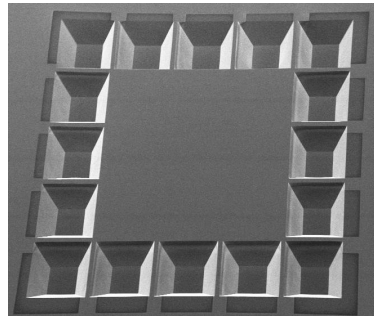
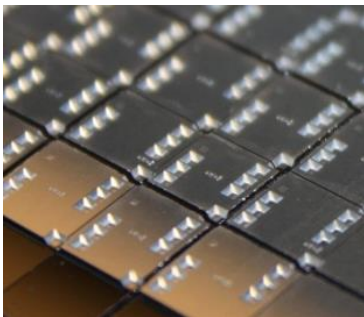
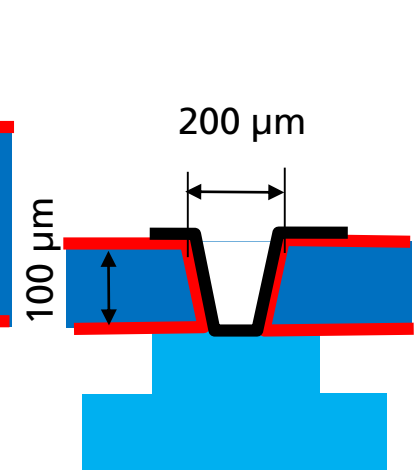
Variante 1



Variante 2

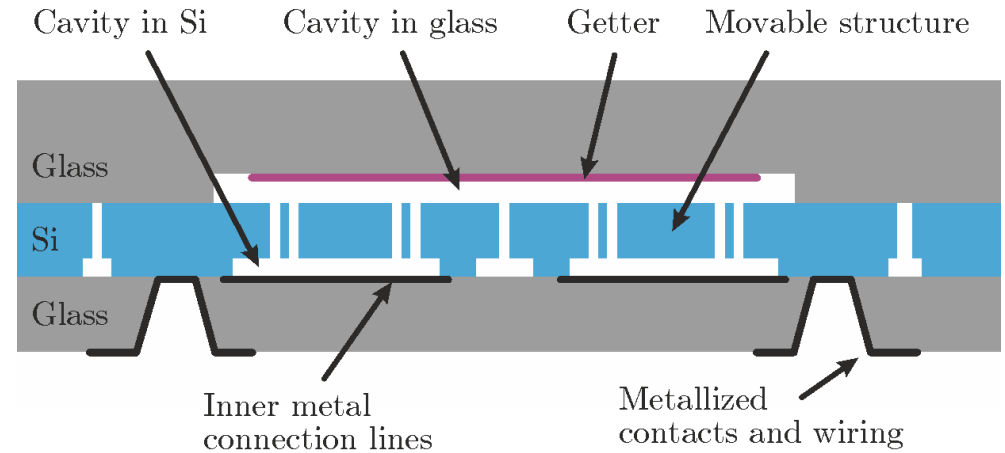


Variante 3

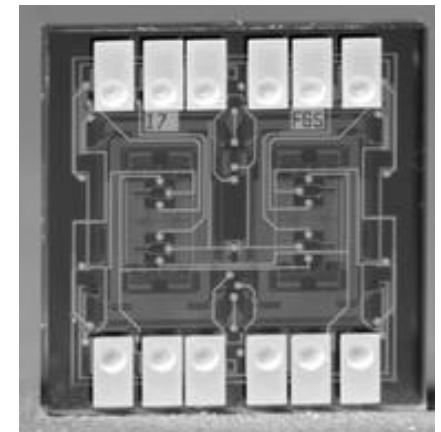
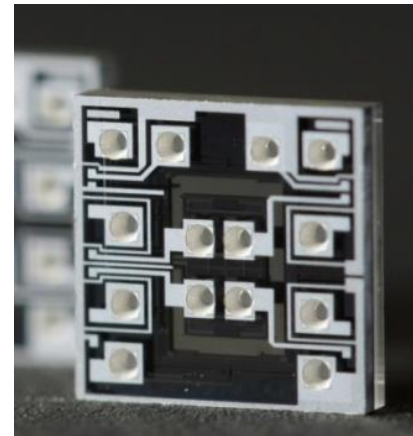


# Verkapselung von BDRIE-Strukturen (4) Glas-Si-Glas-Verbunde

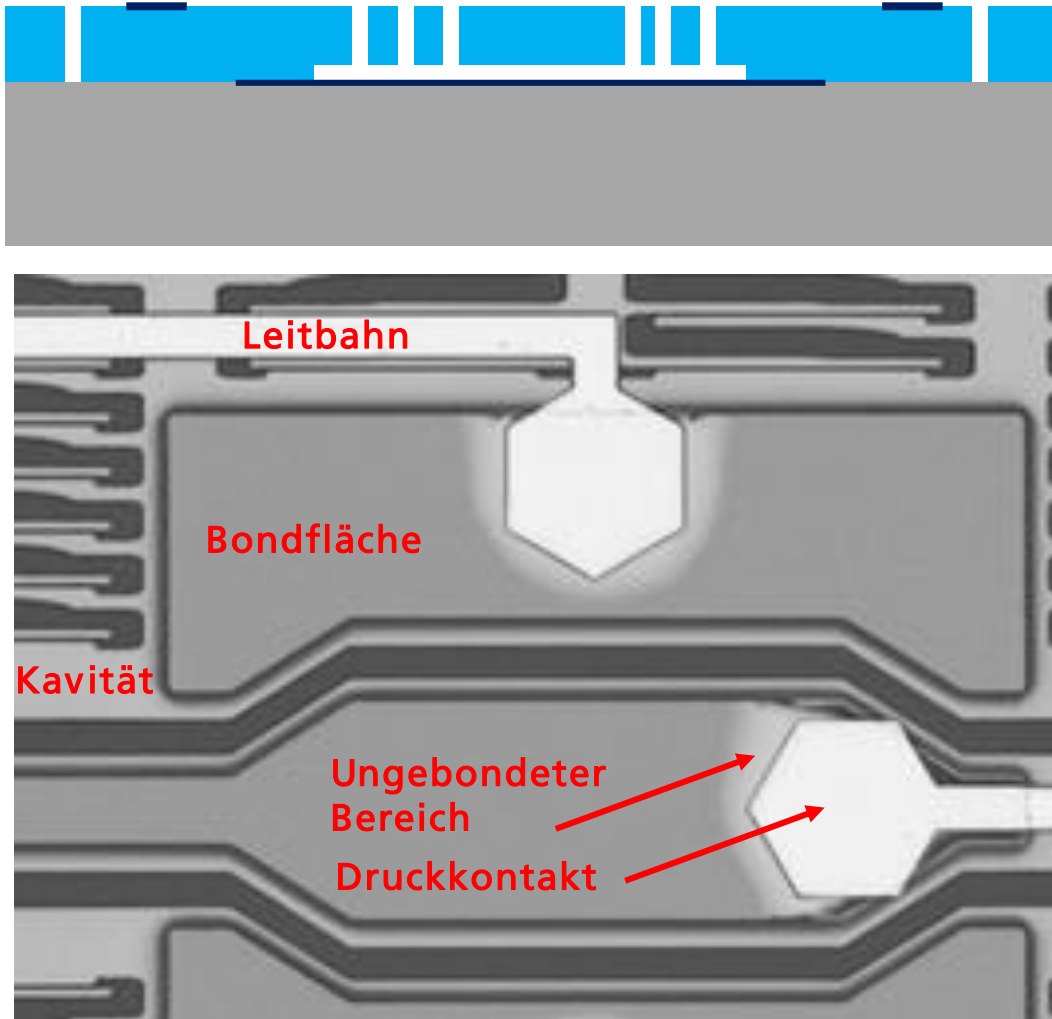
- Glaswafer mit Metallisierung für innere Verdrahtungsebene
- Si-Wafer mit geätzten Gruben
- Anodisches Bonden
- Abdünnen des Si-Wafers
- DRIE in Si-Wafer
- Glaswafer mit geätzten Gruben und Gettermaterial
- Anodisches Bonden
- Abdünnen des Glaswafers
- Ätzung der Kontaktlöcher
- Metallisierung



MEMS-Beispiele (Gyroskope)



# Innenliegende metallische Strukturen



## Anwendung:

- Verbindungsleitungen ins Innere der Sensoren
- Elektroden für vertikale Detektion

**Material:** Al (250 nm Dicke)

Bondparameter: 800 V,  
400°C

Breite des ungebondeten  
Bereiches: < 25  $\mu\text{m}$

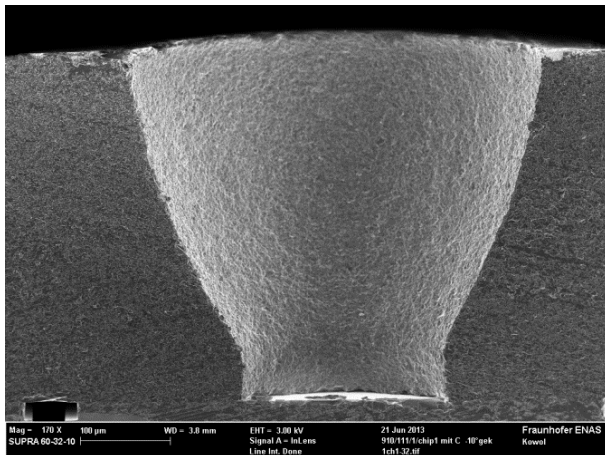
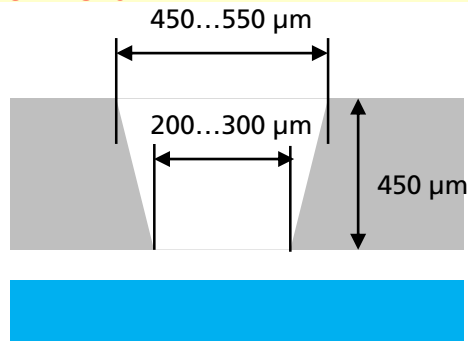
Erzielte Zuleitungs-  
widerstände (Al-Si-Al-Si-Al):  
< 50 Ohm



# Herstellung von Löchern in Borosilikatglas/Si-Verbunden

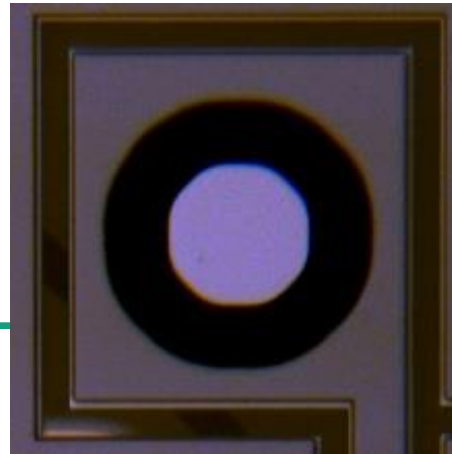
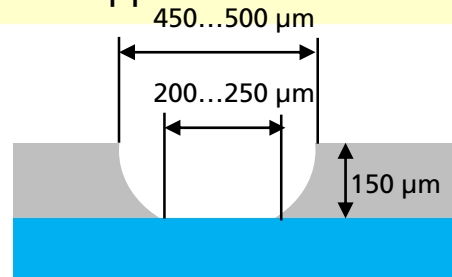
## Sandstrahlen

- Lochherstellung vor Bonden (Schott, Planoptics, Tecnisco)
- Glasdicke 400...500  $\mu\text{m}$
- **Konische Form, Ausbrüche unterschiedlicher Größe an Unterkante: Metallisierung erschwert**



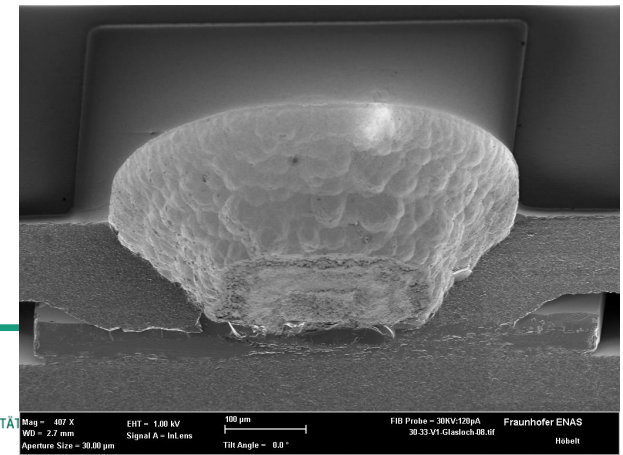
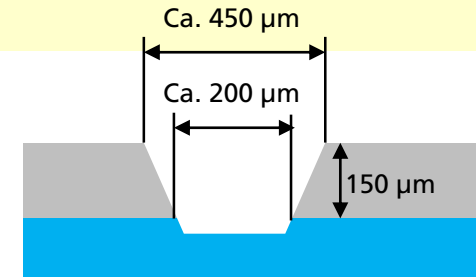
## Nassätzen

- Lochherstellung nach Bonden
- Maske: Cr/Au/Resist, 100  $\mu\text{m}$  Öffnung
- Ätzer: HF (30...40%)
- isotrope Ätzcharakteristik
- **Glasdicke max. 150  $\mu\text{m}$**
- **Ätzstopp am Interface**



## Plasmaätzen

- Lochherstellung nach Bonden
- Maske: Al, 100  $\mu\text{m}$  Öffnung
- Ätzgas: SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>
- überw. isotrope Ätzcharakteristik
- **Glasdicke max. 150  $\mu\text{m}$**
- **kein Ätzstopp am Interface**



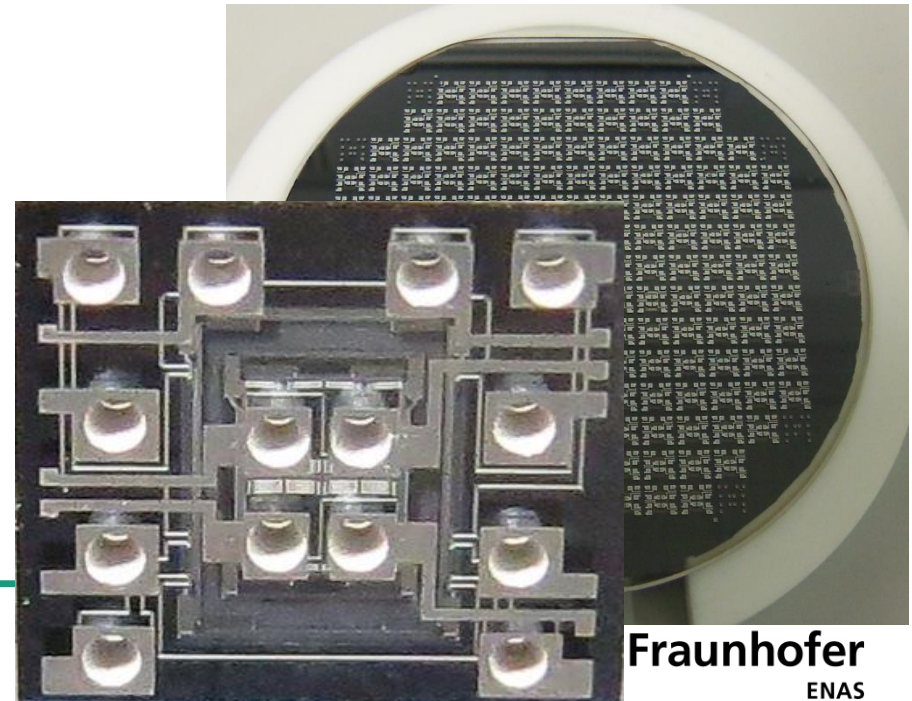
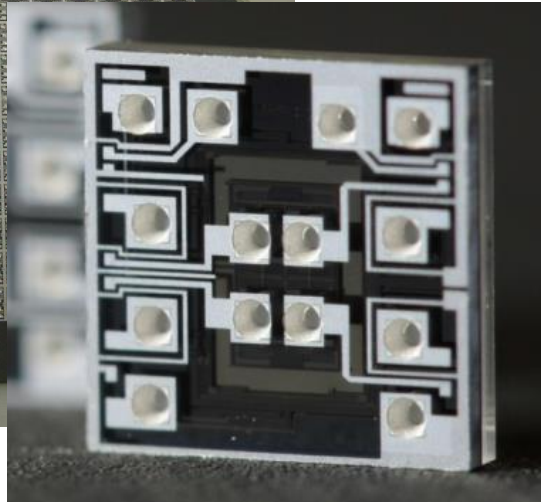
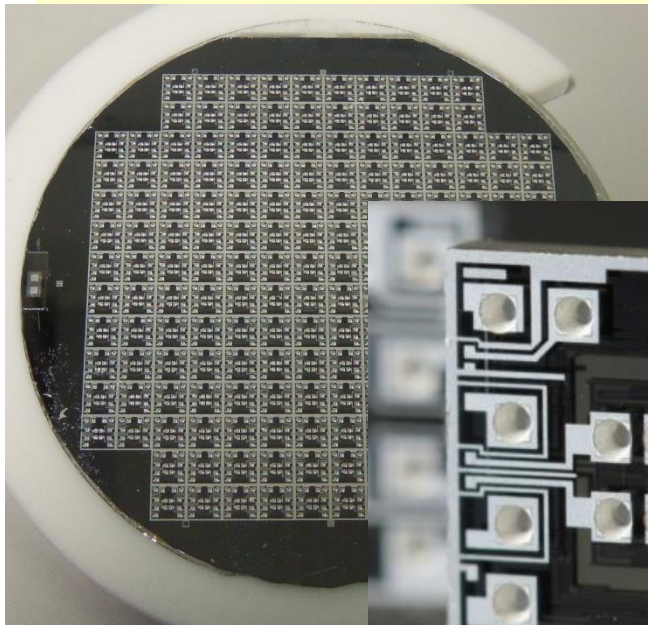
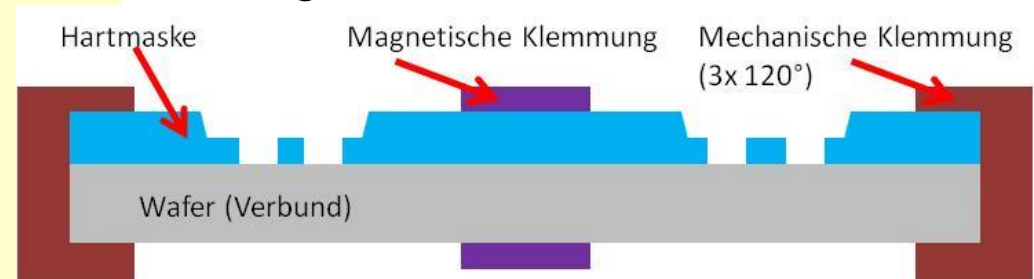
# Metallisierung der Löcher und Umverdrahtung auf Glas

## Sputtern Al (1,5 $\mu\text{m}$ ), Lithografie und Ätzen

- geringe Leitbahnbreiten und -Abstände möglich
- Sprühbelackung: Lackdicke ca. 8  $\mu\text{m}$
- **Bedeckung der Lochkanten gut, aber Abrisse an Innenkanten, Blasenbildung**
- deshalb: nachträglich Verstärkung der Lochmetallisierung über Hartmaske (3  $\mu\text{m}$  Al + 1,5  $\mu\text{m}$  Al)

## Sputtern Al (1,5...3 $\mu\text{m}$ ) über Hartmaske

- Leitbahnbreiten und -abstände  $\geq 100 \mu\text{m}$
- Hartmaske aus geätztem Wafer (Nassätzen+Plasmaätzen), über Wafer justiert und geklemmt



# Einstellen des Sensor-Innendruckes

Anodisches Bonden:

Verbindungsbildung erfolgt bei erhöhter Temperatur (400°C), Freisetzen von O<sub>2</sub>

- Druckbereich 50 mbar....1 bar (3 bar):  
Einstellen der Druckes durch Kammerdruck während des Bondens unter Beachtung des Abkühlvorgangs

$$p_{\text{Bond}}/p_{\text{nutz}} = T_{\text{bond}}/T_{\text{nutz}}$$

$$p_{400^{\circ}\text{C}}/p_{20^{\circ}\text{C}} = 2,3$$

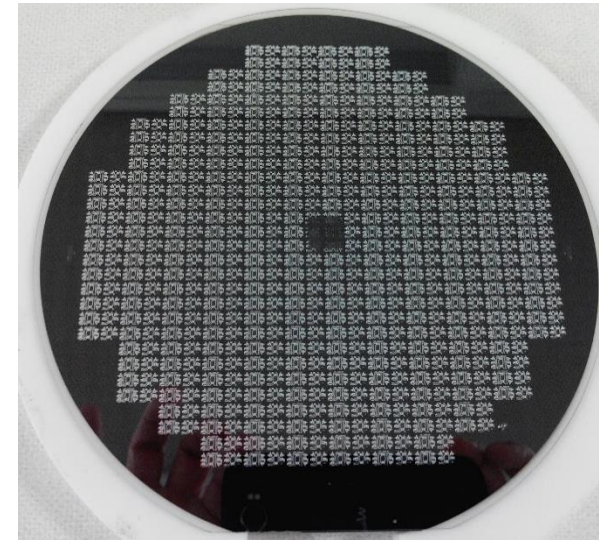
- minimaler Druck ohne zusätzliche Maßnahmen (durch Ausgasen begrenzt): ca. 1..10 mbar (bei 1 Pa Kammerdruck)
- minimaler Druck bei Verwendung von Getter (500 nm Ti, selektiv gesputtert): ca. 1...10 Pa

max. erreichte Schwingungsgüten:  
ca. 250.000 bei slide-film-Dämpfung  
ca. 70.000 bei squeeze-film-Dämpfung

**Waferverbund 4“, Blick auf Deckelseite mit Getter**



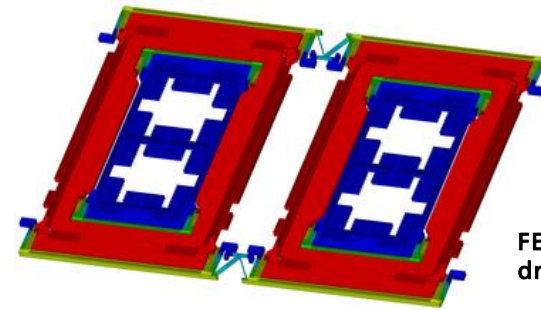
**Waferverbund 6“, Blick auf Lochseite**



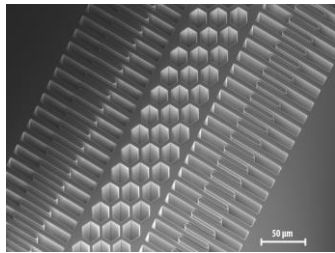
# Anwendung: 2-Massen-Gyroskop FG5 2016 (ENAS/EDC)

## MEMS+AASIC2.2+DASIC2:

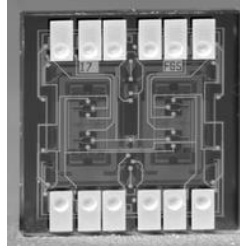
- Messbereich: 0.03...500 °/s
- Bandbreite: 120 Hz
- Bias-Instabilität: < 5 °/h
- ARW: < 0,2 °/√h
- Skalenfaktor-Nichtlinearität: < 1000 ppm



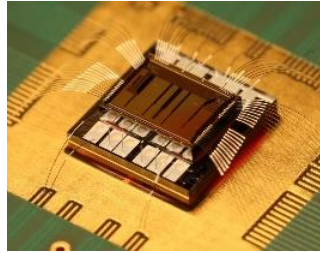
FEM Simulation  
drive mode



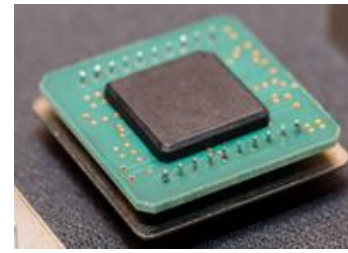
REM Antriebskamm



MEMS chip



AASIC on MEMS

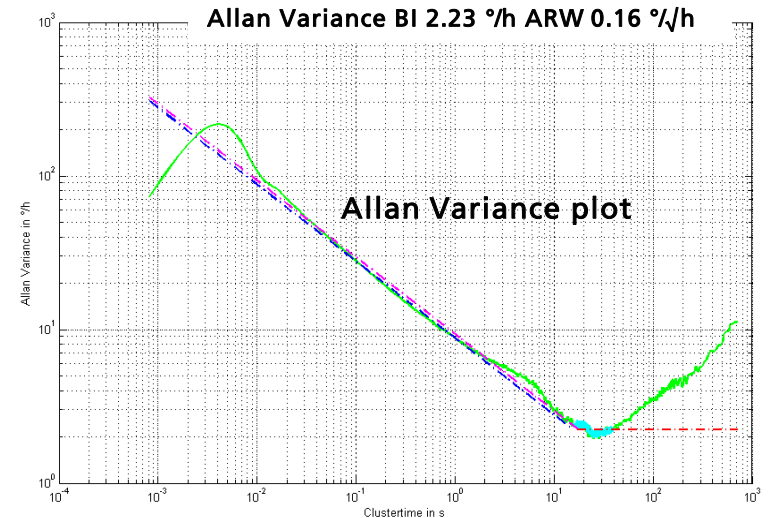
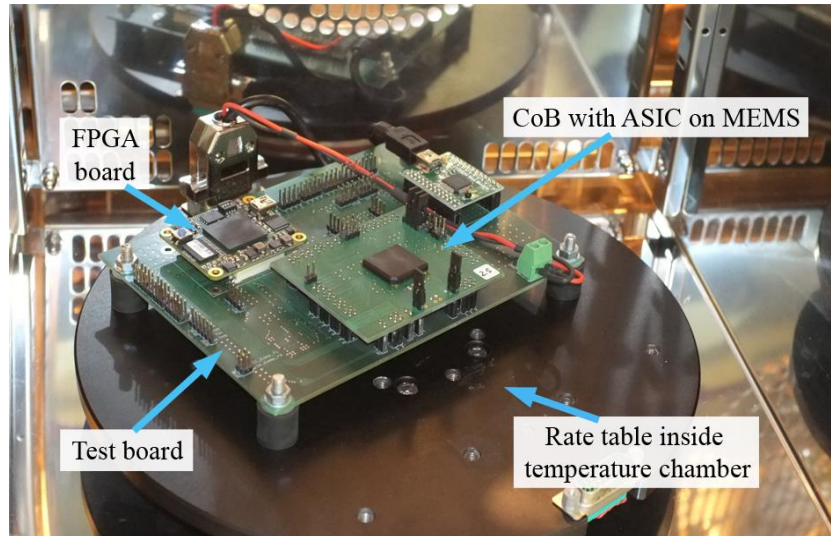


Metallgehäuse



CLDCC  
Keramikgehäuse

## Gyrosystem auf Drehtisch



# Anwendung: Closed-loop XY Beschleunigungssensor AC05g

## Parameter:

- Messbereich +/- 5g
- Auflösung 14 bit
- Bandbreite 500 Hz
- Sensitivität (500 Hz): 9 mg/LSB
- Scalenfaktor-Nichtlinearität < 0,02 %FS
- Noise: 200  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

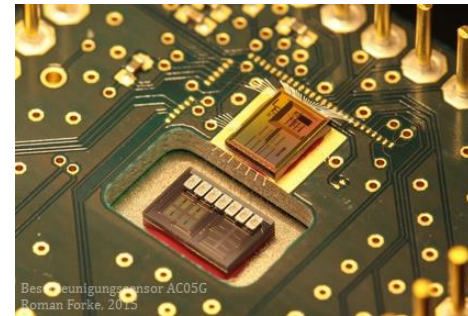
Kooperation: ENAS/EDC Chemnitz (ASICs)

## Anwendungen:

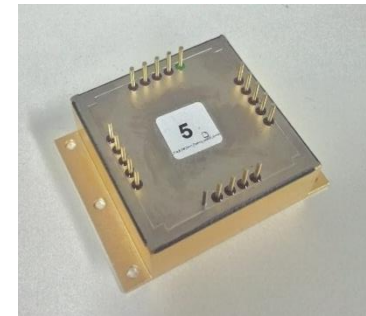
### Messung von

- Beschleunigung
- Neigung
- Vibrationen

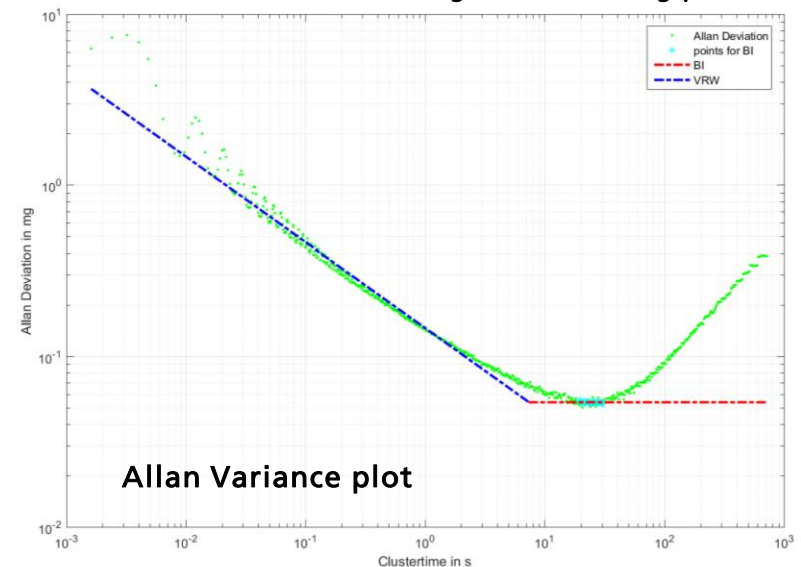
MEMS beside ASIC on PCB



Metal package



Allan Variance BI = 0.05 mg VRW = 0.002 mg/ $\sqrt{\text{h}}$



# Zusammenfassung

- BDRIE-Technologie erweist sich als leistungsfähige Plattform zur Herstellung von Sensoren und Aktuatoren
- große Flexibilität im Design
- vertikal gestufte Elektroden, innenliegende Verbindungen und Elektroden ermöglichen die Integration von Sensoren für alle 3 Raumrichtungen in einem Chip
- Ti als Dünnschichtgetter in Anodisch gebondeten Verbunden ermöglicht langzeitstabile Resonatoren mit hohen Güten
- bisherige Anwendungen, demonstriert an Prototypen:
  - x-y-Beschleunigungssensoren
  - Vibrationssensoren
  - z-Achsen-Gyro,
  - Aktuatoren zur Positionierung von AFM-Messspitzen
  - Mikro-Zugversuch, Schrittschaltwerk