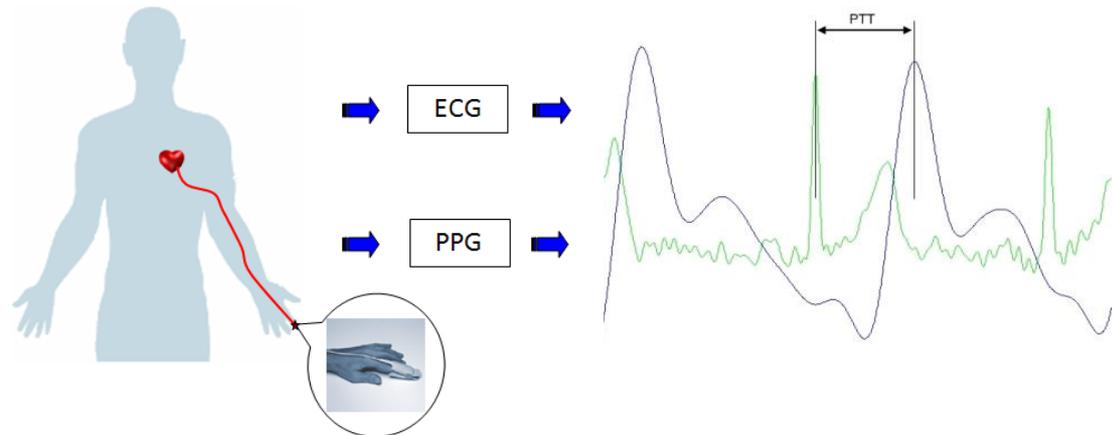


# Vorlesung Mikrosystemtechnik Teil 9: Mikromechanik II

Stefan Hey

Institut für Technik der Informationsverarbeitung



# Gliederung

- Evaluation, Ergebnisse
- MST am KIT
- Wiederholung
- Oberflächenmikromechanik
- Sonderformen der OMM (SREAM-Verfahren)
- Bulk-Mikromechanik
- Anwendungen und Beispiele

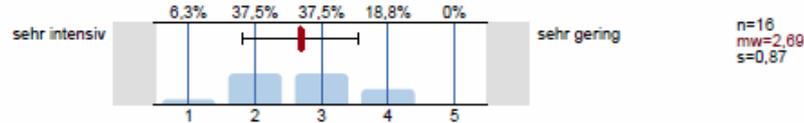
# EVALUATION

# 1. Fragen zur Lehrveranstaltung

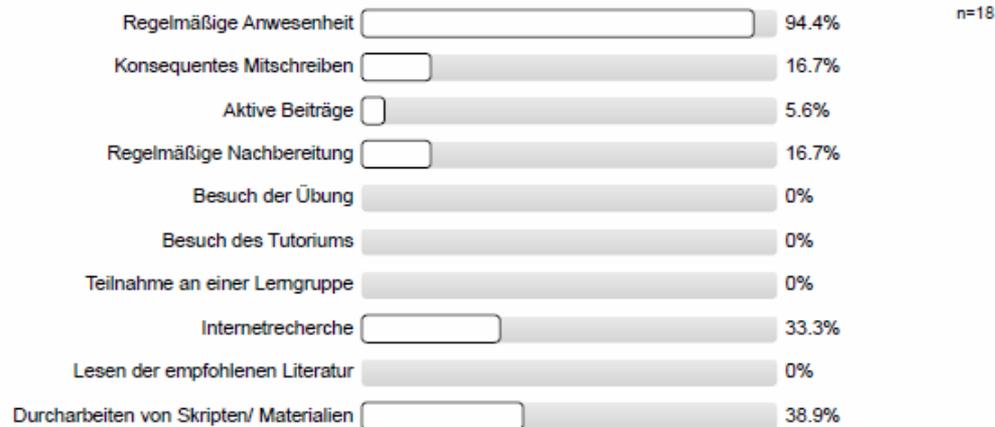
1.1) Mein Wissen beziehe ich primär aus:



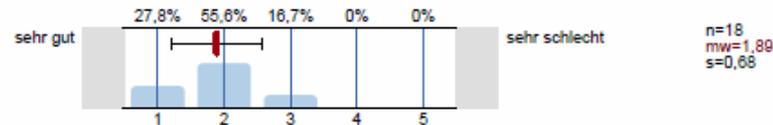
1.2) Wie beurteilen Sie die Mitarbeit Ihrer Studienkollegen/innen innerhalb dieser Lehrveranstaltung?



1.3) Mein Engagement für diese Lehrveranstaltung ist gekennzeichnet durch: (Mehrfachnennungen möglich)



1.4) Die inhaltliche Abstimmung zu anderen Lehrveranstaltungen in meinem Studienplan ist...

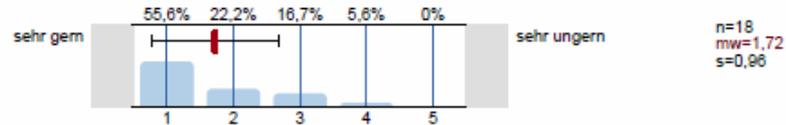


WS 14/15

+0,05

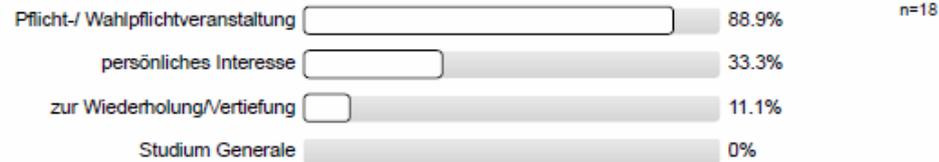
+0,14

1.5) Wie gerne besuchen Sie die Lehrveranstaltung?

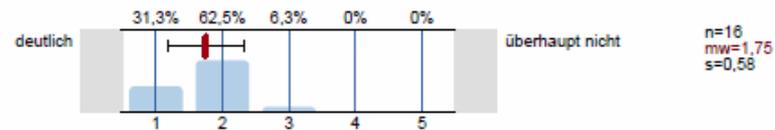


-0,05

1.6) Warum besuchen Sie diese Lehrveranstaltung?

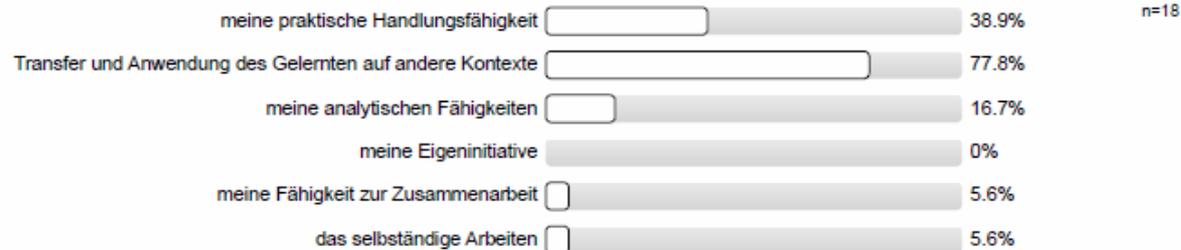


1.7) Erkennen Sie die Bedeutung der Lehrinhalte für das weitere Studium?

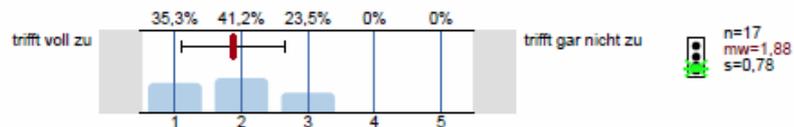


+0,06

1.8) Die Lehrveranstaltung fördert (Mehrfachnennungen möglich)

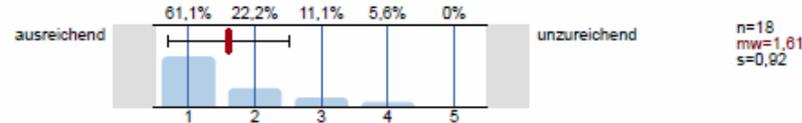


1.9) In dieser Lehrveranstaltung lerne ich viel.



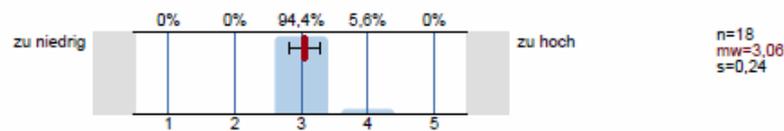
+0,26

1.10) Vorkenntnisse aus anderen Veranstaltungen



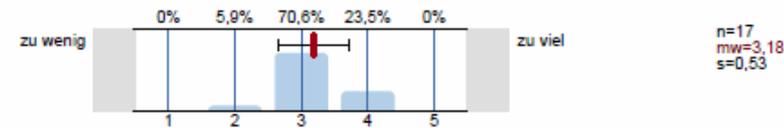
+0,28

1.11) Niveau



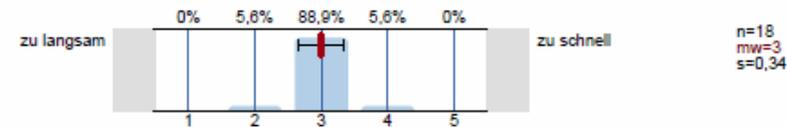
-0,02

1.12) Umfang



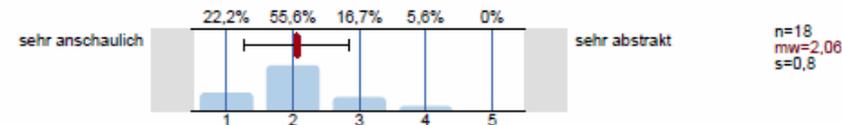
+0,03

1.13) Tempo



-0,08

1.14) Anschaulichkeit



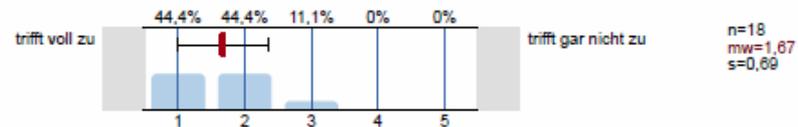
+0,31

1.19) die Folien sind ausführlich



-0,02

1.20) die Folien sind verständlich geschrieben



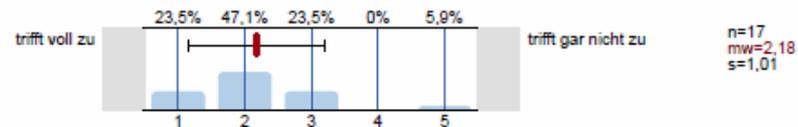
-0,15

1.21) die Folien sind gut strukturiert



-0,14

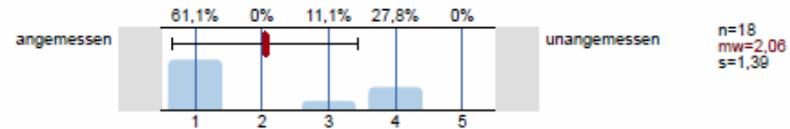
1.22) die Folien sind zur Wiederholung des Stoffes gut geeignet



+0,28

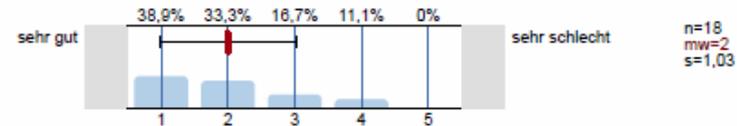
## 2. Fragen zur Bewertung der Raumbedingungen

2.1) Die Raumgröße ist der Teilnehmerzahl



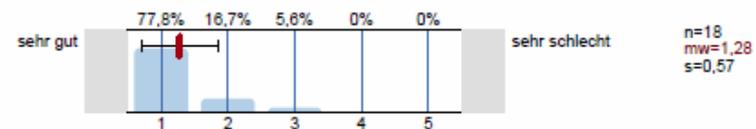
-0,25

2.2) Die Akustik in diesem Raum ist



-0,31

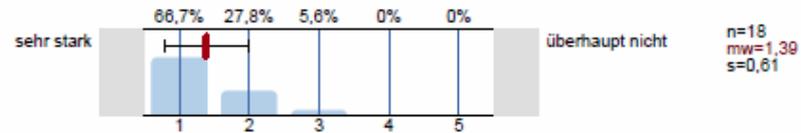
2.3) Die Sichtbedingungen in diesem Raum sind



-0,05

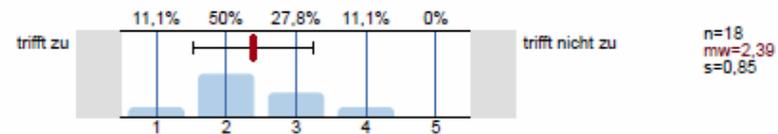
3. Fragen zum/zur Dozenten/in

3.1) Verweist der/die Dozent/in auf Zusammenhänge zwischen Theorie und Praxis?



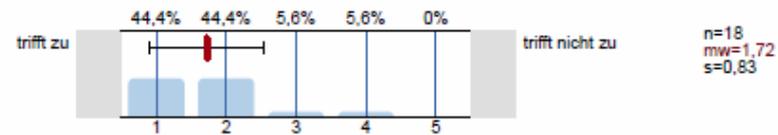
+0,01

3.2) Der/Die Dozent/in spricht laut und deutlich.



+0,24

3.3) Der/Die Dozent/in hält Blickkontakt.



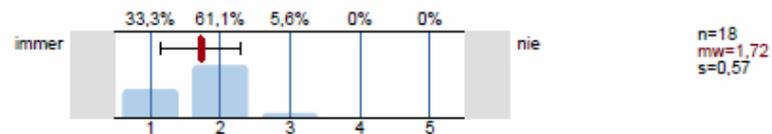
+0,41

3.4) Wie ist der/die Dozent/in vorbereitet?



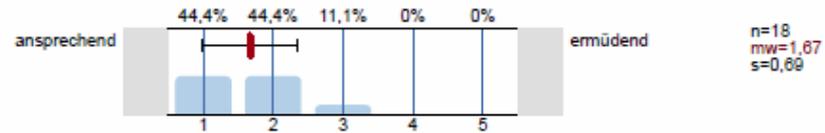
-0,05

3.5) Wird Wesentliches herausgearbeitet?



+0,41

3.6) Wie beurteilen Sie die Darbietung insgesamt?



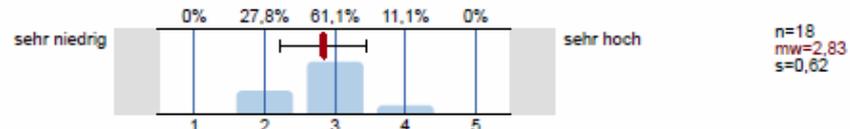
+0,05

## 6. Monitoring

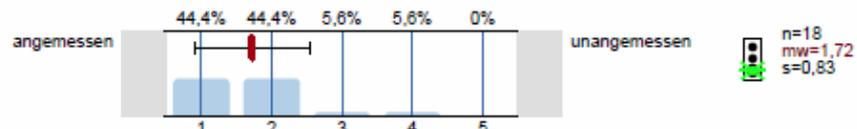
6.1) Bitte benoten Sie die Lehrveranstaltung insgesamt.



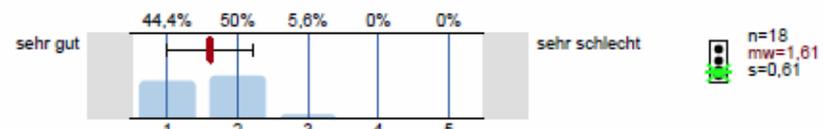
6.2) Wie hoch ist der notwendige Arbeitsaufwand für diese Lehrveranstaltung?



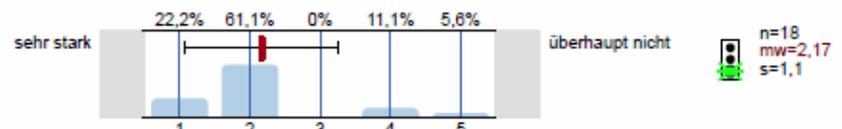
6.3) Der notwendige Arbeitsaufwand für die Lehrveranstaltung ist...



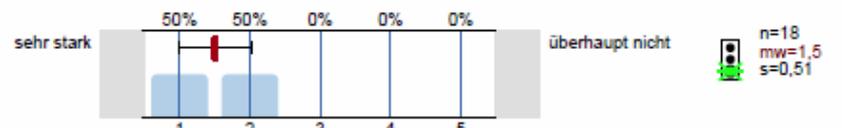
6.4) Wie ist die Lehrveranstaltung strukturiert?



6.5) Wirkt der/die Dozent/in engagiert und motiviert bei der Durchführung der Lehrveranstaltung?



6.6) Geht der/die Dozent/in auf Fragen und Belange der Studierenden ein?



WS 14/15

+0,28

+0,01

+0,54

+0,19

+0,48

+0,27

Ihre Lehrveranstaltung „Mikrosystemtechnik“ hat den Lehrqualitätsindex

LQI = 100.

# MST AM KIT



KIT  
Karlsruher Institut für Technologie

www.kit.edu

## RESEARCH TO BUSINESS

Kunden-Newsletter Innovation

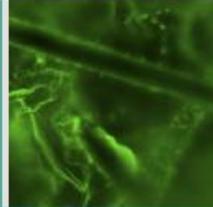
www.facebook.com/KITInnovation

Ausgabe 3|2012



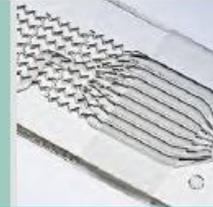
**INNOVATIONS-PROJEKT**  
3D-Life-Streaming über skalierbare Cloud-Computing-Lösung

Seite 3



**TECHNOLOGIE-TRANSFER**  
Mikrobielle „Spürnase“ für Biogasanlagen

Seite 6



**TECHNOLOGIE-TRANSFER**  
Mikrofluidikchip für medizinische Langzeitexperimente

Seite 7

### Editorial



#### Der Blick zurück

Wie war das eigentlich zu meiner Zeit? Diese Frage kam mir während der Antragsphase zur EXIST-Gründerschmiede oft. Die Antwort lautet: In den 80er Jahren zu Zeiten meines Ingenieurstudiums in Karlsruhe war das Thema Gründen bei uns Studierenden nicht so präsent

### Das KIT als Gründerschmiede

Strategischer Fokus auf Unternehmensgründungen wird ausgebaut.

Unternehmensgründungen sind für den Wirtschaftsstandort Deutschland von großer Bedeutung. 2011 wurden in der Bundesrepublik über 400.000 Unternehmen gegründet, von denen etwa 15 Prozent mit einem Produkt oder einer Dienstleistung auf den Markt kamen, die sich als Neuheit auf dem regionalen, deutschen oder weltweiten Markt bezeichnen ließen. Gerade diese Jungunternehmen gelten als Innovationstreiber und stärken die Gesamtwirtschaft des Landes. Um die enormen Potenziale des KIT als marktwirtschaftlichen Faktor weiter zu stärken, werden die Unterstützung für Gründer und der Auf-



Im Gründer-Cube auf dem Campus Süd berät das Center for Entrepreneurship Studierende, Doktoranden, Professoren und Alumni zum Thema Unternehmensgründung.

ersten „Hightech-Inkubator“ eröffnet. Kern des Antrags ist es, die Lücken

# Wolkenkratzer im Mikroformat

## TECHNOLOGIETRANSFER

HOTLINE 0721 608-25530 | E-MAIL [innovation@kit.edu](mailto:innovation@kit.edu)

## Wolkenkratzer im Mikroformat

Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis.

Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis werden unter anderem in Röntgenlinsen, in fluidischen Filterstrukturen, für optische Anwendungen in der Medizintechnik und bei der Qualitätssicherung eingesetzt. Beim Herstellen von extrem hohen Mikrostrukturen mit sehr kleinen Durchmessern begrenzt die Materialfestigkeit die maximal erreichbaren Strukturhöhen. Bei der röntgenlithographischen Fertigung wird ein fotoempfindlicher Kunststoff auf ein Substrat aus Silizium aufgebracht und anschließend durch gezielte Belichtung stellenweise ausgehärtet. Da sich Kunststoff und Silizium bei Temperaturänderungen unterschiedlich ausdehnen, können die unterschiedlichen Temperaturen im Prozess bei kritischen Geometrien zu einer Deformation des gesamten Bauteils führen.

Wissenschaftler des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT) haben ein Verfahren entwickelt, das die Herstellung von Mikrostrukturen aus einem Material ohne Substrat ermöglicht. Hierzu werden gegenüberliegende Kanten eines quaderförmigen Blocks aus dem zu strukturieren-



Refraktive Röntgenlinse mit Deckel- und Bodenplatte.

den Material so belichtet, dass im ersten Schritt ein Boden und ein Deckel entstehen. Im zweiten Schritt werden die Mikrostrukturen zwischen Boden- und Deckenplatte belichtet.

Durch die Verwendung eines einzigen Materials können Deformationen im Produktionsprozess vermieden werden. Boden- und Deckenplatten geben den im Zwischenraum angeordneten Strukturen genug Stabilität, um eine Beschädigung der Strukturen zu verhindern. Der Übergang zwischen bestrahlten und unbestrahlten Bereichen ist sehr scharf, die Hohlräume zwischen den Strukturen sind praktisch frei von teilentwickeltem Material.

Durch die mit diesem Verfahren erzielbaren höheren Mikrostrukturen lassen sich zum Beispiel Röntgenlinsen mit einer größeren Eingangsöffnung realisieren, die mehr Röntgenlicht im Fokus bündeln.

### ARTIKEL INTERESSANT FÜR

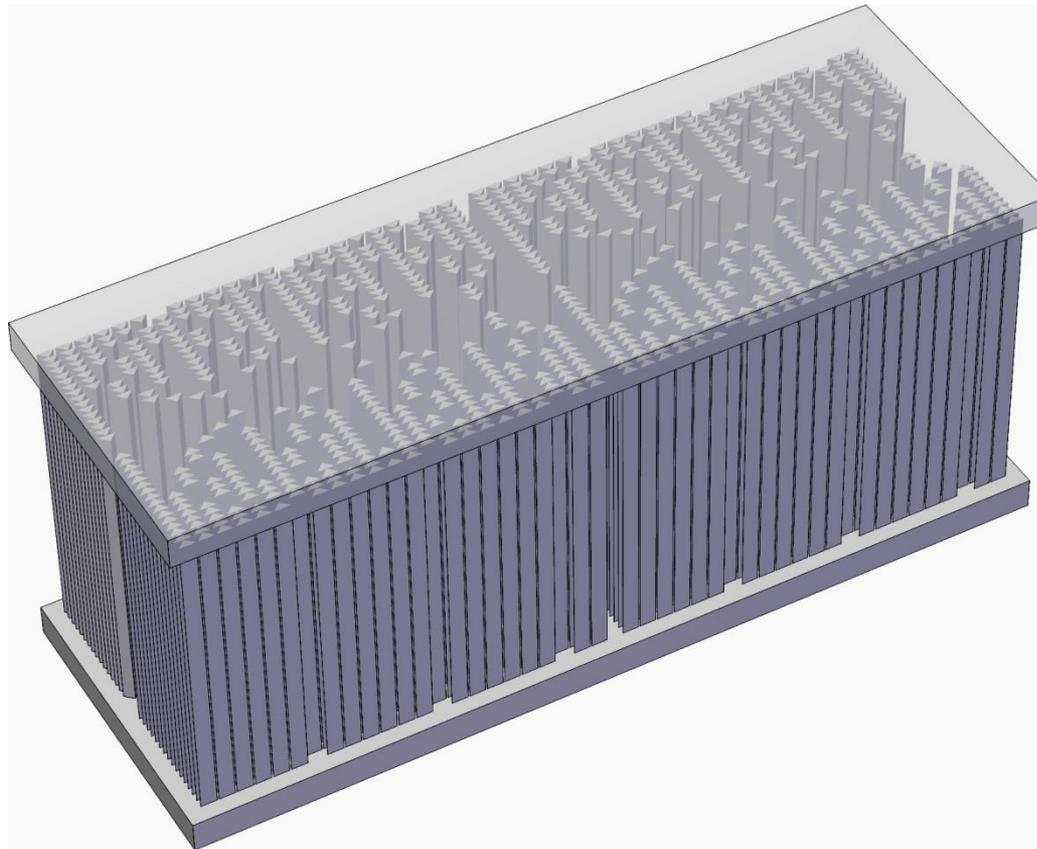
- Analytik
- Biotechnologie
- Mikrotechnik
- Filtertechnik
- Medizintechnik
- Diffraktometrie

### WEITERE INFORMATIONEN

- Nutzen Sie beiliegende Faxantwort

# Wolkenkratzer im Mikroformat

- Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis



## Elektrophysiologische Messtechnik zur Untersuchung von Zellen

Effiziente Messungen der Stromspannungskurve von Zellen in einem mikrofluidischen System.

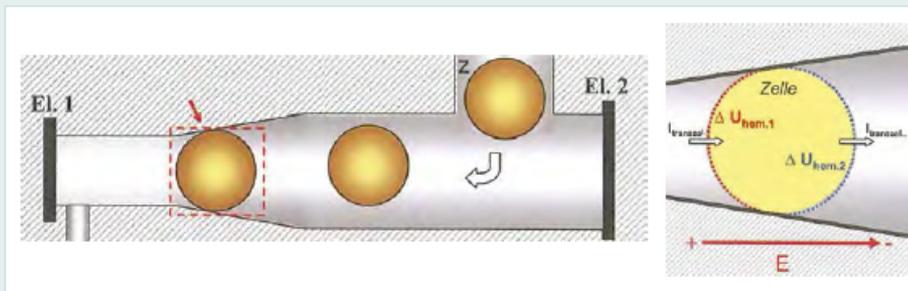
In der pharmakologischen Forschung und Diagnostik sind Untersuchungen an pflanzlichen Zellkulturen von großer Bedeutung. Mithilfe von Messungen an Zellen kann beispielsweise die Wirkung von Arzneimitteln festgestellt werden. Ionenkanäle in einer Zellmembran spielen eine große Rolle bei der Entwicklung neuer Medikamente, da sie stark auf Arzneien reagieren. Mithilfe elektrischer Strommessungen an der Zelle wird die Aktivität einzelner Ionenkanäle

der Zellmembran untersucht, um Auskunft über elektrische, kinetische und andere Eigenschaften der Ionenströme in den Kanalproteinen geben zu können.

Herkömmliche Messmethoden der Elektrophysiologie, wie die Patch-Clamp-Technik, sind nur für eine begrenzte Auswahl von Zelltypen geeignet und führen meist zu einer Zerstörung der Zelle. Wissenschaftler des KIT haben eine Messmethode entwickelt, um Wirkstoffe in Zellen

effizienter, mit weniger Aufwand, kostengünstiger und zerstörungsfrei zu testen.

Die NIMEP-Technologie bietet einen neuen Ansatz zum Testen von Wirkstoffen in (momentan pflanzlichen) Zellen mit der nicht-invasiven mikrofluidischen Plattform für die Elektrophysiologie. Dabei wird die Zellmembran mit einem spannungssensitiven Membranfarbstoff eingefärbt und anschließend in einem mikrofluidischen System positioniert. Das System ist von zwei Elektroden begrenzt, über die ein elektrisches Feld angelegt wird. Der Strom, der die Zelle passiert, kann mit herkömmlichen elektrophysiologischen Verfahren gemessen werden, und die Änderung der Membranspannung wird optisch erfasst. Mit diesen Daten kann nun die Stromspannungskurve einer Zelle errechnet werden. Dieses Verfahren wurde als Alternative und Ergänzung zur Patch-Clamp-Methode entwickelt, um dem wachsenden Bedarf an Messungen in der Pharmaindustrie gerecht zu werden.



Schematische Darstellung der NIMEP-Technik: Positionierung der Zelle in einem mikrofluidischen System (Abb. links) mit einer vergrößerten Darstellung beim Anlegen eines elektrischen Feldes (Abb. rechts).

### ARTIKEL INTERESSANT FÜR

- Pharmaindustrie
- Medizin
- Biotechnologie
- Elektrophysiologie

### WEITERE INFORMATIONEN

- Nutzen Sie beiliegende Faxantwort

# Elektrophysiologische Messtechnik zur Untersuchung von Zellen

- Effiziente Messungen der Stromspannungskurve von Zellen in einem mikrofluidischen System.

Abb. 1

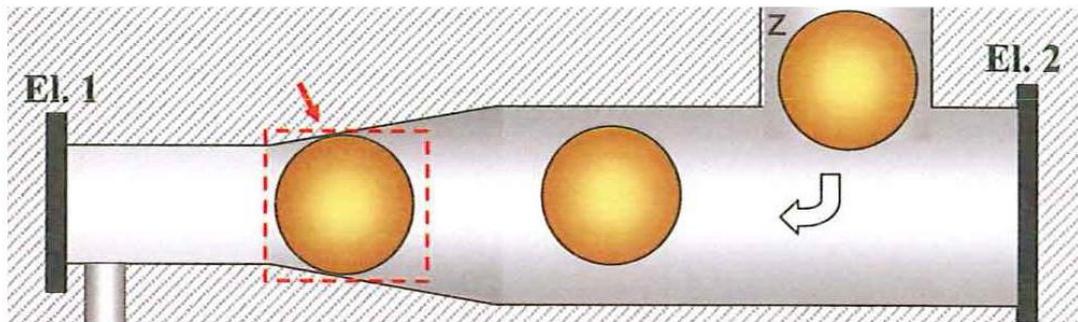
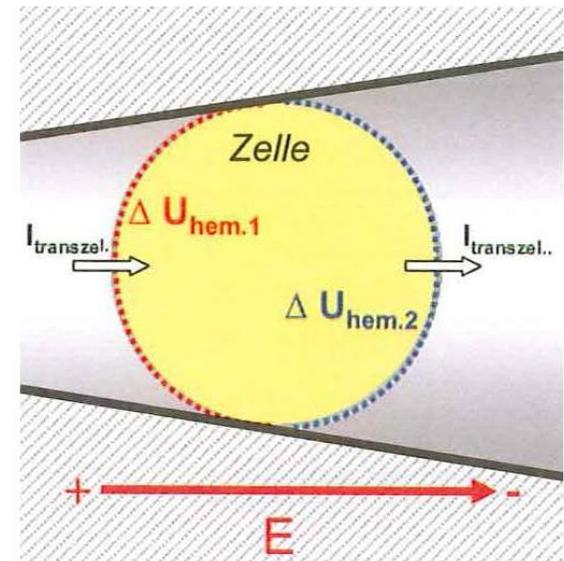
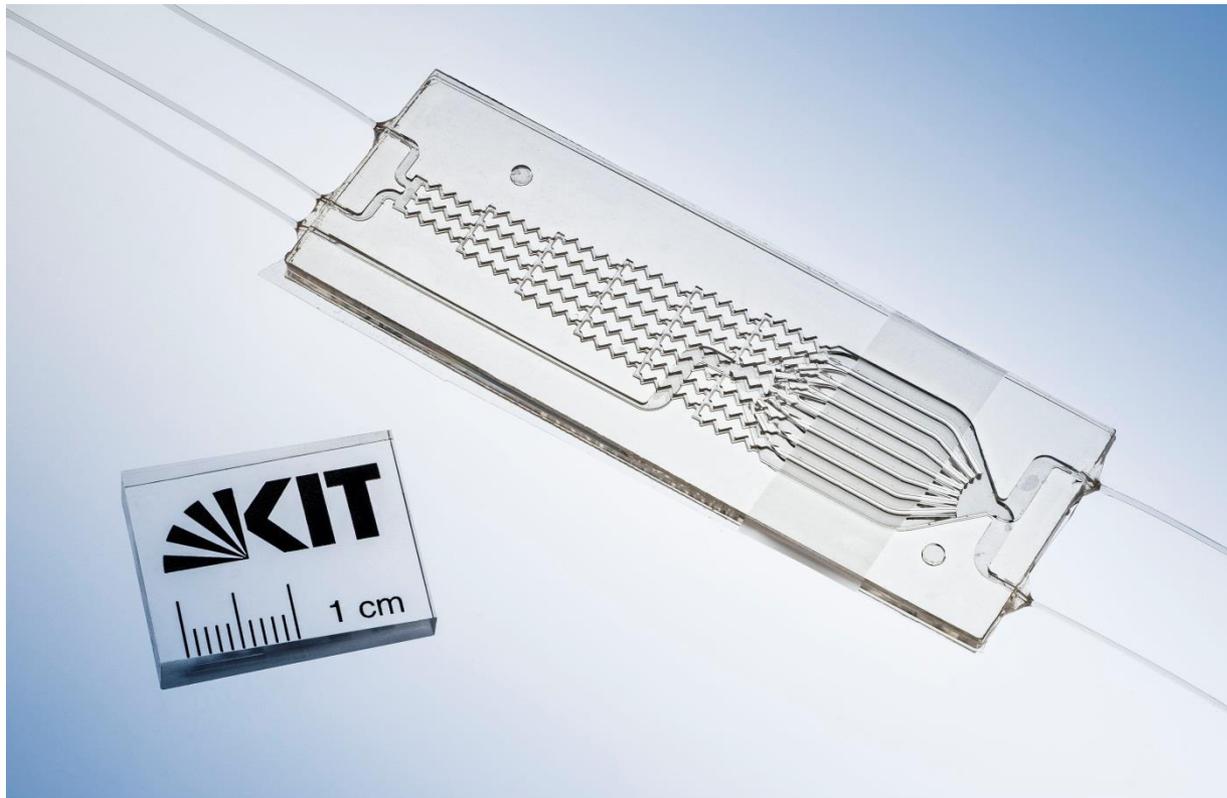


Abb. 2



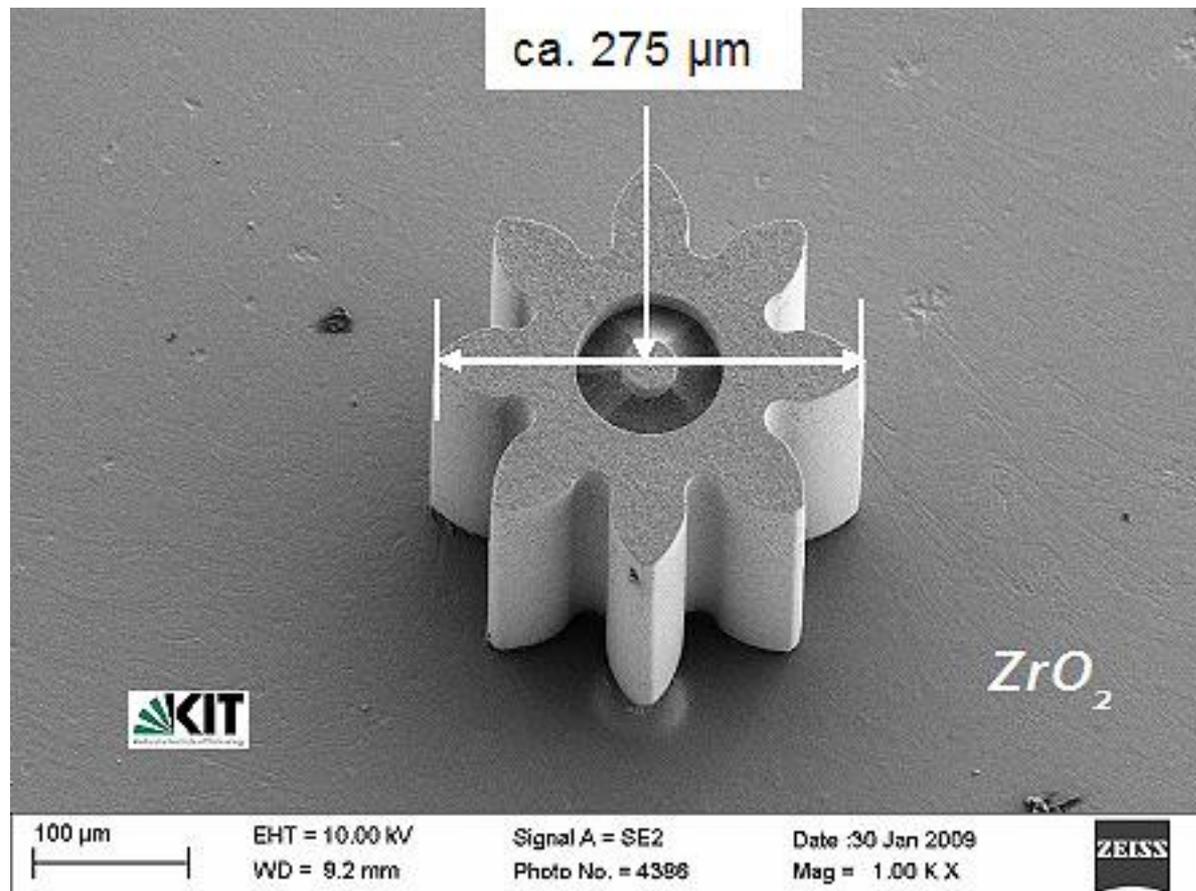
# Parallele Stammzellenuntersuchung

- Mikrofluidikchip mit revolutionärem Design und massenfertigungstauglichem Material ermöglicht Langzeitexperimente in der medizinischen Forschung



# Wirtschaftliche Mikroproduktion

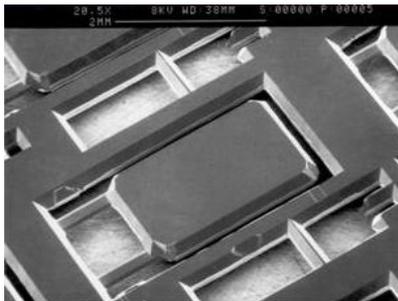
Mikrospritzgießen für keramische, metallische und polymere Bauteile.



# WIEDERHOLUNG

# Definition

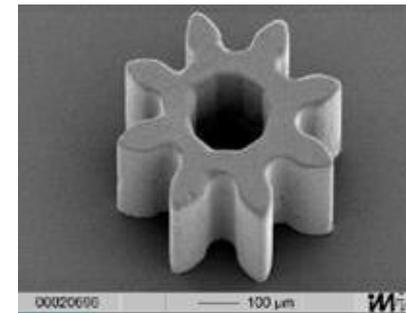
- Mikromechanik: Herstellung von mechanischen Bauelementen in  $\mu\text{m}$  Bereiche
- Werkstoff hauptsächlich Silizium
- Zur Bearbeitung der Wafer werden oft Methoden verwendet, die auch in der Mikroelektronik benutzt werden (Lithographie, Ätzprozesse,...)
- Hauptanwendungsfeld Sensorik und Aktuatorik
- Einsatz in Industrie, Unterhaltungselektronik und vor allem Automobilbau



Bulk-Mikromechanik



Oberflächenmikromechanik



Abformung

Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Prozessfolge Opferschichttechnologie

## ■ Abscheiden der Opferschicht auf der Substratoberfläche

- Prozess je nach Material
- z.B. therm. Oxidation für  $\text{SiO}_2$



## ■ Strukturierung der Opferschicht

- Freilegen der Verankerung zum Substrat
- Strukturierung je nach Anforderung
  - Isotrop: nasschemisch mit HF oder
  - Anisotrop: Trockenätzen

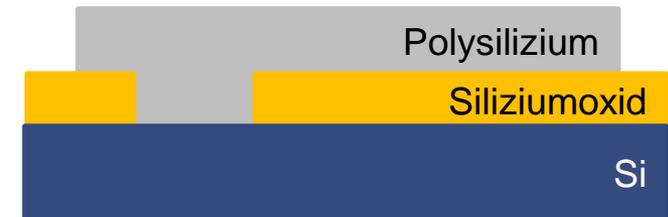


# Prozessfolge Opferschichttechnologie

- Abscheidung der Strukturschicht
  - Prozess je nach Material (z.B. PVD, CVD)
  - Opferschicht wird ganzflächig bedeckt



- Strukturierung der Strukturschicht
  - Prozess je nach abgeschiedenen Material
  - Ätzstop an der Opferschicht

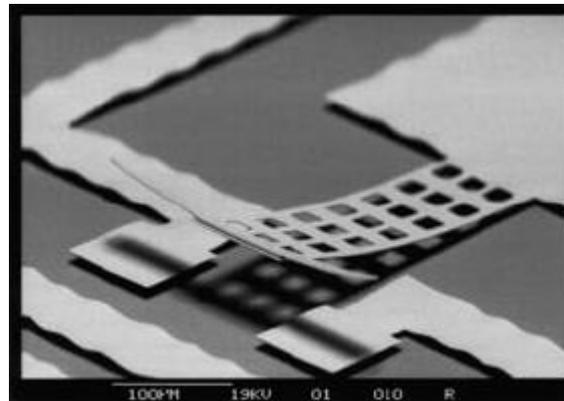


- Entfernen der Opferschicht



# Spannungen im Poly-Silizium

- Reduktion der Spannung
  - Kristall wird getempert, damit Reflow (Restrukturierung der Kristallite) stattfindet
    - Innere Spannungen werden abgebaut
- Ausnutzen der Spannung
  - Gezielt eingesetzt können die Spannungen genutzt werden, um Strukturen vom Wafer abzuheben (z.B. Mikroschalter)



# Sticking (Kleben)

- Typische Prozessfolge:
  - Nasschemisches Ätzen der Opferschicht
  - Spülen mit Wasser oder Isopropanol (entfernt Flusssäure)
  - Trocknen des Substrats

- Offene Bereiche trocknen zuerst

→ Flüssigkeitstropfen bleiben zwischen der Struktur und dem Boden



- Flüssigkeitstropfen werden immer kleiner

→ Oberflächenspannung zieht freigelegte Mikrostruktur zum Substrat



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Verdampfen (Flüssigkeit) ↔ Sublimation (Feststoff)



Flüssigkeit füllt Spalt



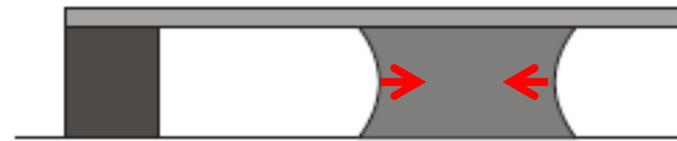
Tropfen wird in 3 Dimensionen kleiner  
→ Adhäsionskräfte ziehen Struktur zu Boden



Nach Verdampfen klebt Struktur am Boden



Flüssigkeit ist erstarrt (Feststoff)



Isotherme Sublimation: Säule wird nur in 2 Dimensionen kleiner  
→ Form bleibt erhalten

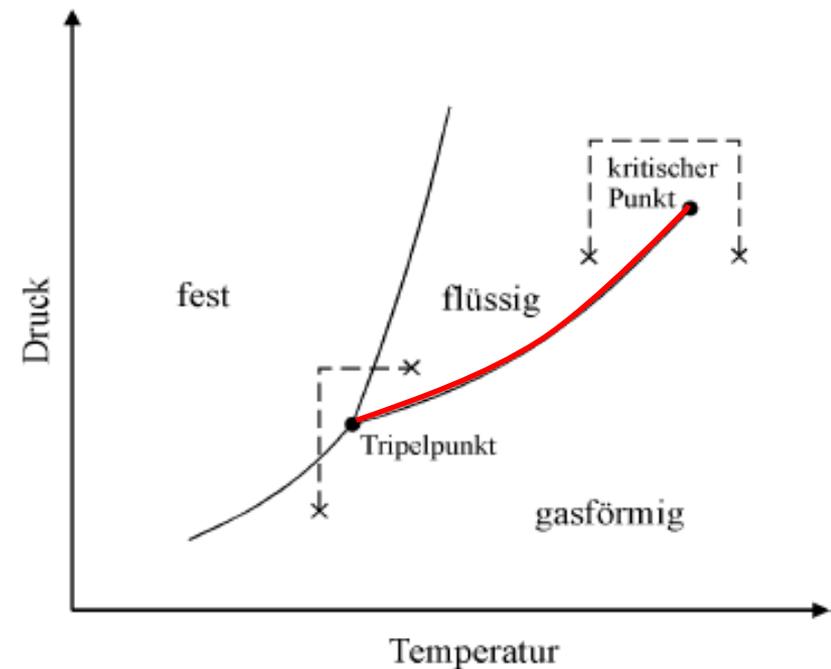


Nach Sublimation → freistehende Struktur, die nicht am Boden klebt

# Allgemein: Maßnahmen gegen Sticking

- Umgehung des Phasenübergangs flüssig / gasförmig
- Sublimieren
  - Dichlorbenzolprozess
  - Veraschen von Photolack im Sauerstoffplasma
  - Ätzen mit gasförmiger HF (Flurwasserstoffsäure, Flusssäure)
- Überkritisches Trocken z.B. mit CO<sub>2</sub>

Qualitatives Phasendiagramm:



# PROBLEME DER OMM

# Weitere Sticking-Situationen

- Sticking während des Betriebs
  - Mikrostruktur kann bei Berührung des Bodens kleben bleiben (z.B. Beschleunigungssensor, der senkrecht zur Detektionsrichtung eine zu starke Beschleunigung erfährt)
  
- Abhilfe: Puffer, „Prellböcke“ (bumper)
  - Großflächiger Kontakt zwischen bewegter und stehender Struktur wird vermieden
  - Adhäsionskräfte wirken nur in dem kleinen Bereich des Puffers  
→ reichen nicht aus um Struktur am Boden festzuhalten
  - Puffer können sowohl auf der bewegten als auch auf der stehenden Struktur integriert werden

# Pufferstrukturen in Poly-Si (bewegte Struktur)

- Vor Abscheiden des Poly-Si werden in die Opferschicht aus  $\text{SiO}_2$  kleine Vertiefungen geätzt
- Die Lage, die Größe und die Anzahl der Vertiefungen wird durch einen zusätzlichen Lithographieschritt festgelegt



# Pufferstrukturen auf dem Substrat (feststehende Struktur)

- Durch Löcher in der bewegten Struktur werden am Boden Puffer erzeugt, die jedoch leicht größer sind als die Löcher
- Die Struktur tritt nur mit dem Randbereich der Puffer in Kontakt



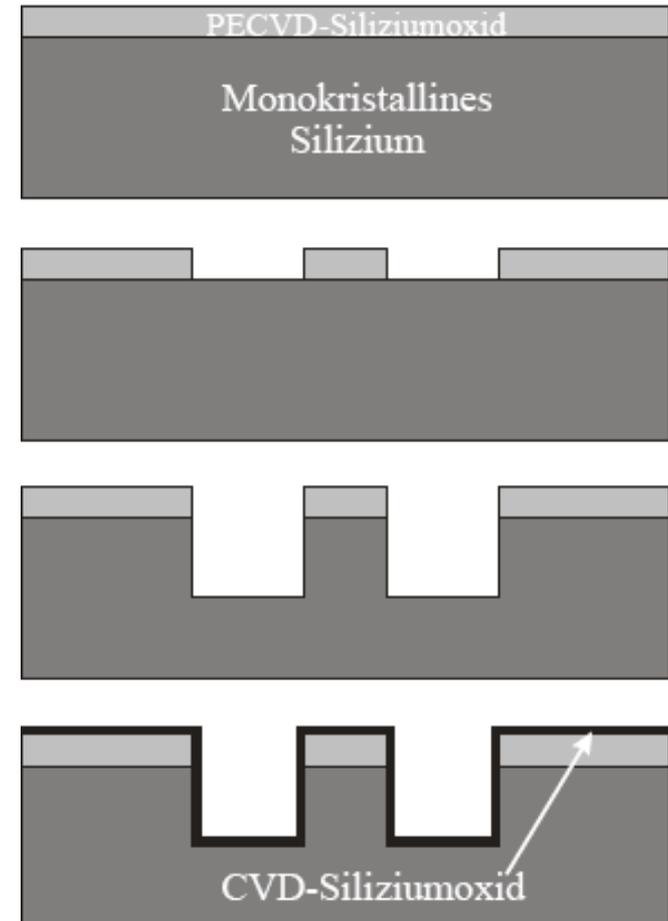
# SONDERFORMEN DER OMM

# SCREAM-Verfahren

- SCREAM: **S**ingle **C**ystal **R**eactive **E**tching **A**nd **M**etallization
- SCREAM ermöglicht die Herstellung von oberflächennahen, beweglichen Mikrostrukturen ohne Opferschichttechnologie
- Die Strukturierung erfolgt durch eine Kombination von physikalisch anisotropen und nasschemisch isotropen Ätzverfahren  
→ Keine Beschränkung aufgrund der Kristallstruktur
- Nur eine Maske wird benötigt, um bewegliche Mikrostrukturen zu erzeugen.

# SCREAM-Verfahren (Prozessablauf)

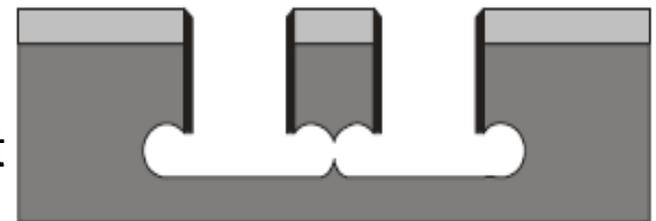
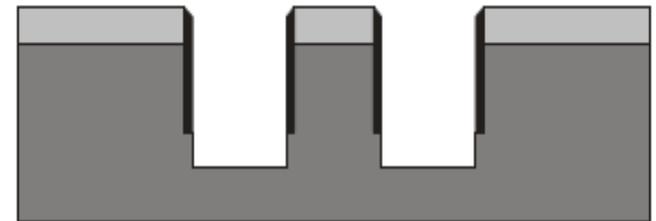
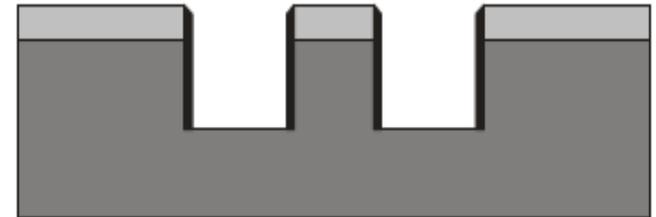
- Abscheiden von SiO<sub>2</sub> mittels PE-CVD
  
- Strukturierung der Maske (Siliziumoxid)
  
- Übertragung der Maskenstruktur in das Silizium mittels RIE (4 bis 20 μm tief)
  
- Isotropes Abscheiden von 300 nm Siliziumoxid mittels CVD zur Seitenwandpassivierung



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

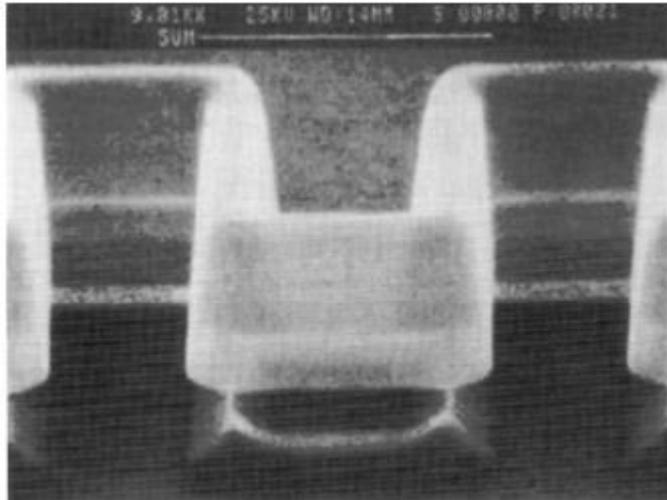
# SCREAM-Verfahren (Prozessablauf)

- Anisotropes Ätzen der Oxidschicht mittels RIE, um die Oxidschicht am Boden zu entfernen
- Weitere Übertragung der Maskenstruktur in den Siliziumwafer mittels RIE
- Isotropes trockenchemisches Ätzen von Silizium, bis der Balken vollständig unterätzt ist (Plasmaätzen mit  $\text{SF}_6$ )

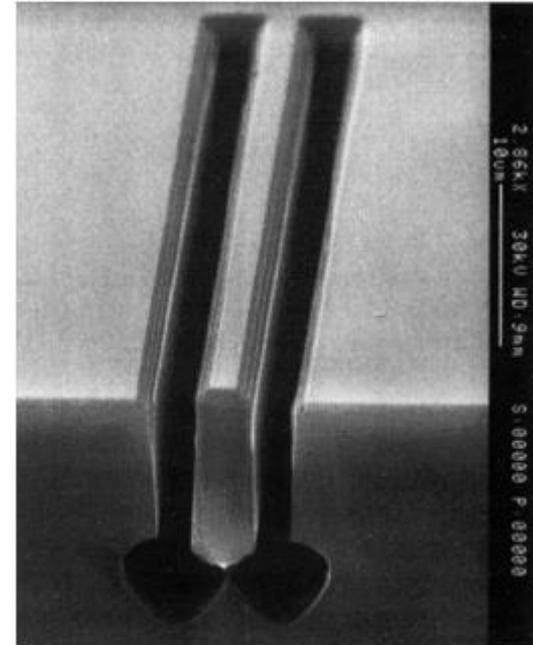


Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Beispiel: SCREAM-Verfahren



Mit dem SCREAM-Verfahren  
hergestelltes Federelement:  
(nach Z. Lisa Zhang et al., Transducers, 1991,  
p.520)



Profil des isotropen Ätzschrittes:  
(Quelle: Zentrum für Mikrotechniken, Technische  
Universität Chemnitz - Zwickau)

# BULK-MIKROMECHANIK

# Bulk-Mikromechanik

- Mikromechanische Strukturen werden aus dem Volumen (Bulk) des Wafermaterials herausgeätzt
- Einkristallines Material
- Die maximale Strukturhöhe ist durch die Waferdicke (typisch  $500\mu\text{m}$ ) limitiert
- Zwei Wafer können miteinander verbunden werden

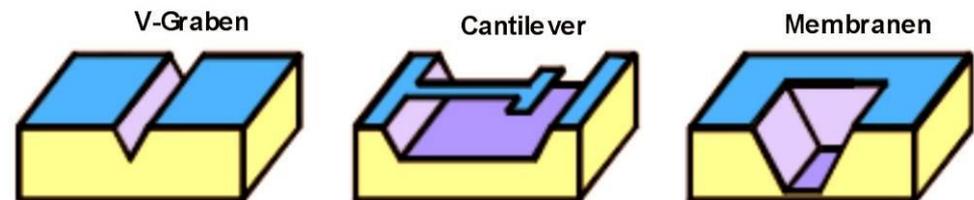
## ■ Ätzmittel:

- Nasschemische KOH-Ätzen
- Trockenätzen

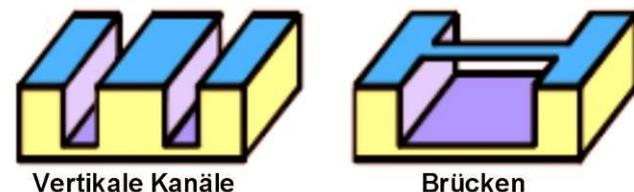
## ■ Grundlegende Ätzformen:

- Gruben und Gräben
- Mesas und Spitzen
- Sprungbretter
- Membranen
- Brücken

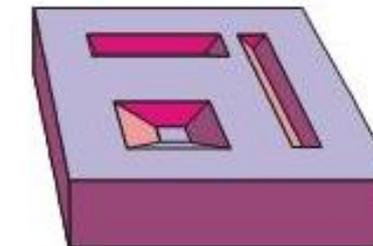
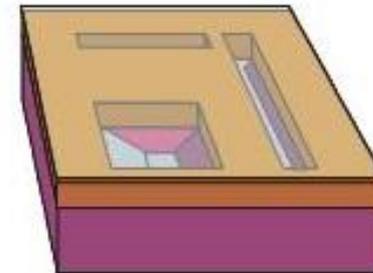
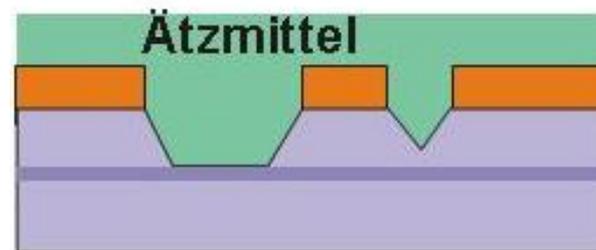
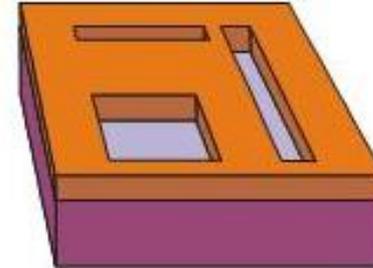
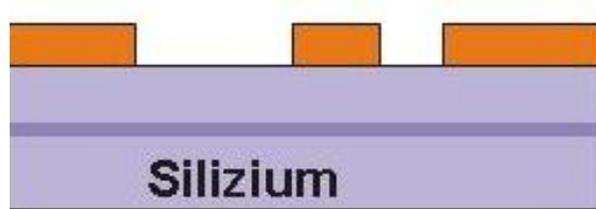
(100)-Siliziumwafer:



(110)-Siliziumwafer:

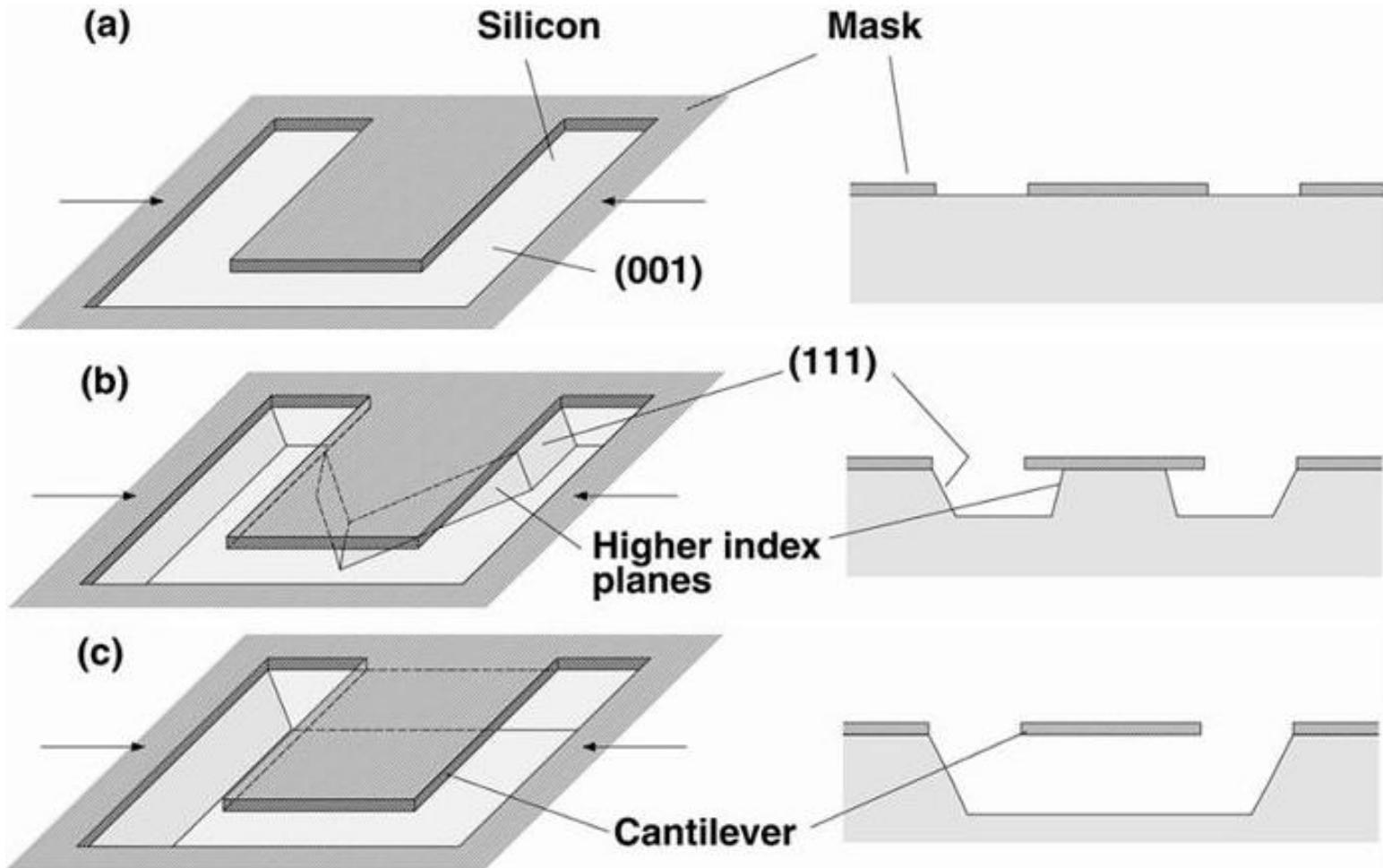


# Bulk-Mikromechanik



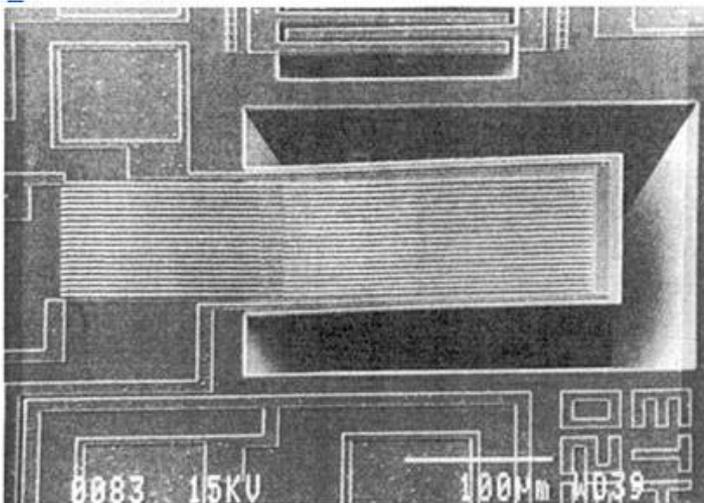
Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Beispiel: Einseitiger Balken in 100 Si



## Beispiel: Einseitiger Balken über V-Grube

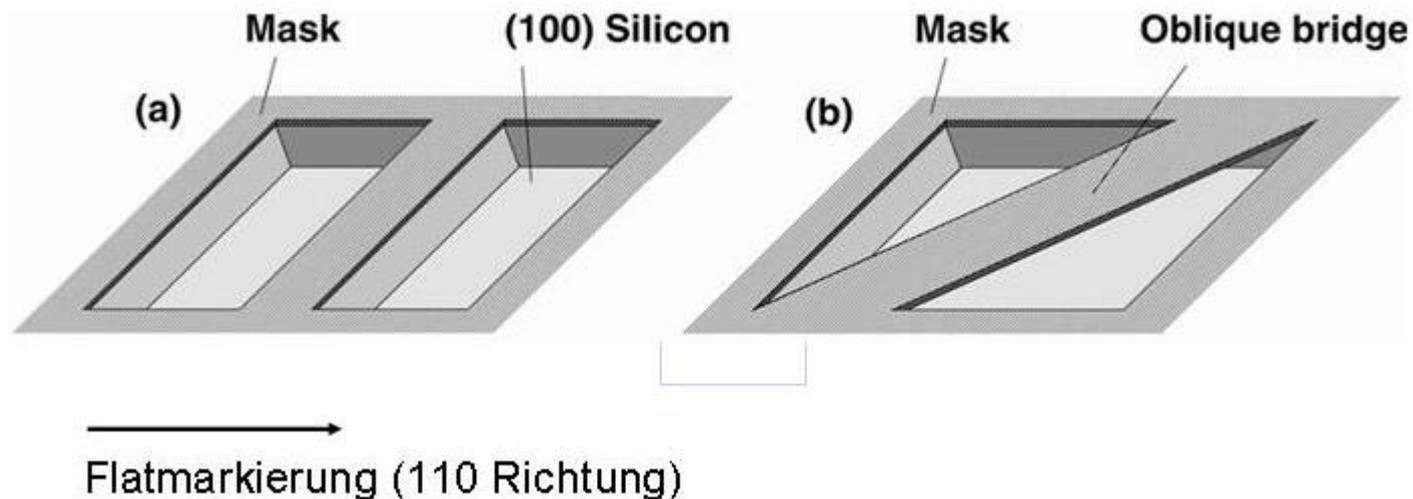
- Durch Unterätzen der Maske können freistehende Strukturen erzeugt werden, ohne dass durch den kompletten Wafer hindurch geätzt werden muss
- Freistehende Zunge besteht aus dünner Ätzmaske  
→ gute thermische Isolation
- Wäre die Zunge mit der anderen Seite verbunden, würden sich zwei getrennte Ätzgruben ergeben



H. Baltes et al., Transducers, Yokohama 1993

# Beispiel: Zweiseitiger Balken über Ätzgrube

- Ausrichtung eines zweiseitig eingespannten Balkens
  - in 110 Richtung erzeugt zwei getrennte Gruben
  - unter 45 Grad zur 110-Richtung erzeugt freistehenden Balken



# ANWENDUNGEN UND BEISPIELE

# Mikromotor 1

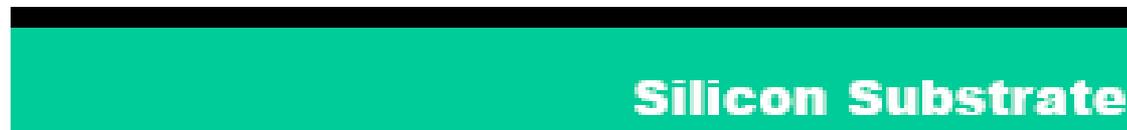
- Substrat:
  - n-Type Silizium-Wafer; 1-2  $\Omega\text{cm}$
  - (100)-Orientierung
  - Starke p-Dotierung durch Diffusion mit Phosphor zur elektrischen Abschirmung des Substrats

**Silicon Substrate**

Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 2

- LPCVD Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) für elektrische Isolation des Substrats
  - Schichtdicke: 600 nm



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 3

- LPCVD Polysilizium („Poly 0“)
  - Schichtdicke: 500 nm
  - für elektrische Kontaktierung



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 4

- Photolithographie Polysilizium (Poly 0)
  - Maskenlevel 1 (Poly 0)



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 5

- Ätzen des Polysiliziums („Poly 0“)



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 6

- Abscheidung „1st Oxide“
  - 2.0  $\mu\text{m}$  LP-CVD-Oxid
  - Erste Opferschicht
  - Annealing (Ausheizen/Ausheilen, 1.050 °C; 1 Stunde in Argon)



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 7

- 1.Strukturierung „1st Oxide“
  - Photolithographie mit Maskenlevel 2 (DIMPLE = „Grübchen“)
  - Deep RIE etching ( $0.7 \mu\text{m}$ )



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 8

- 2. Strukturierung
  - Photolithographie mit Maskenlevel 3 (Anchor 1)
  - Deep RIE etching



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 9

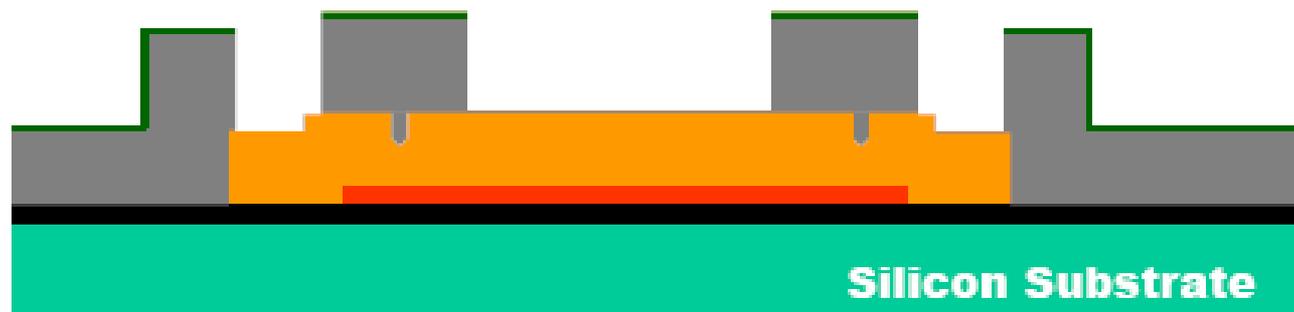
- Abscheidung „Poly 1“
  - 2.0  $\mu\text{m}$  LP-CVD-PolySilizium
  - Erste Funktionsschicht
  
- Abscheidung „Oxidmaske“
  - 200 nm Oxid
  - Annealing



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 10

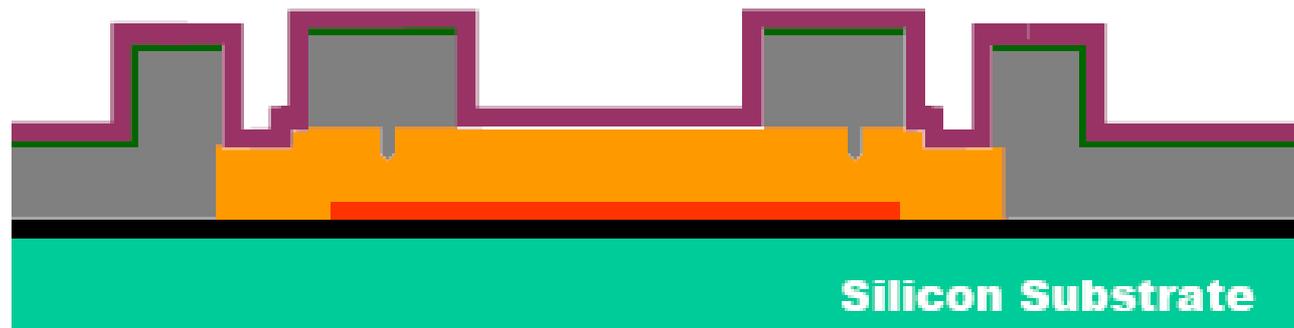
- Strukturierung „Poly 1“
  - Photolithographie mit Maskenlevel 4
  - Deep RIE etching ( $2.0\ \mu\text{m}$ )



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 11

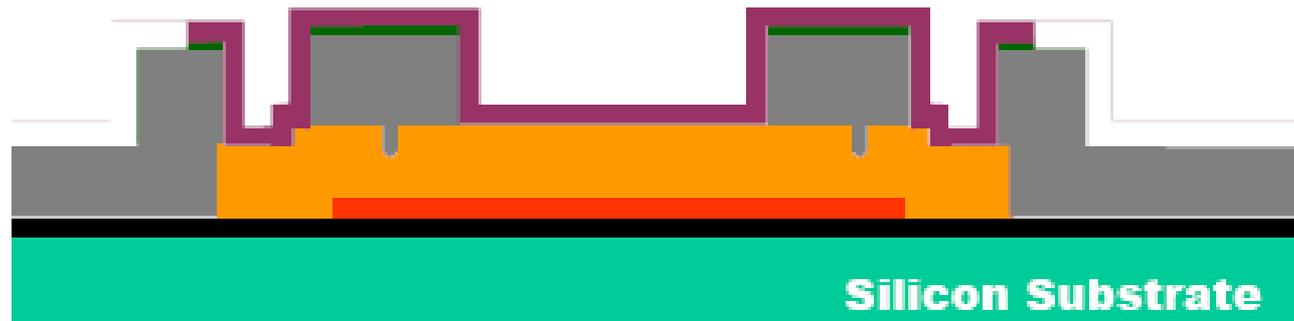
- Abscheidung (2nd Oxide)
  - LP-CVD-Oxid
  - Dicke: 750 nm
  - Zweite Opferschicht
  - Annealing



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 12

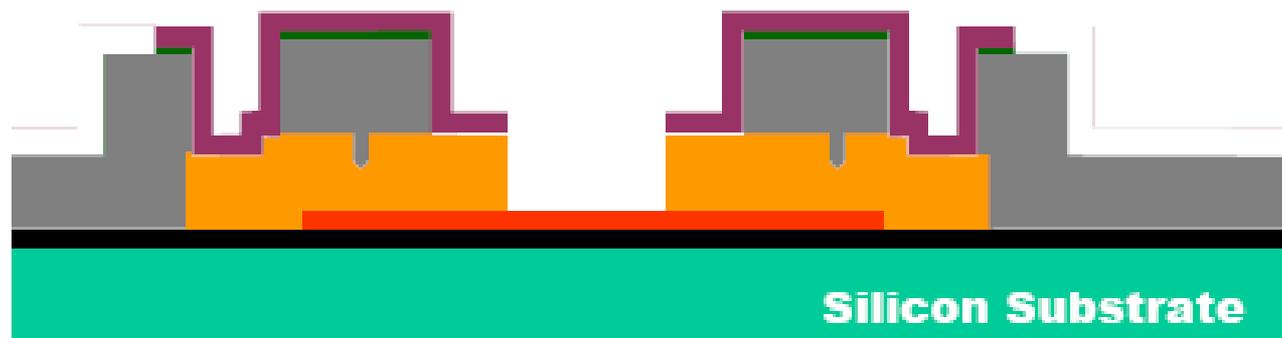
- Strukturierung „Poly 1“
  - Photolithographie mit Maskenlevel 5 (Kontakt zum Poly 1)



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 13

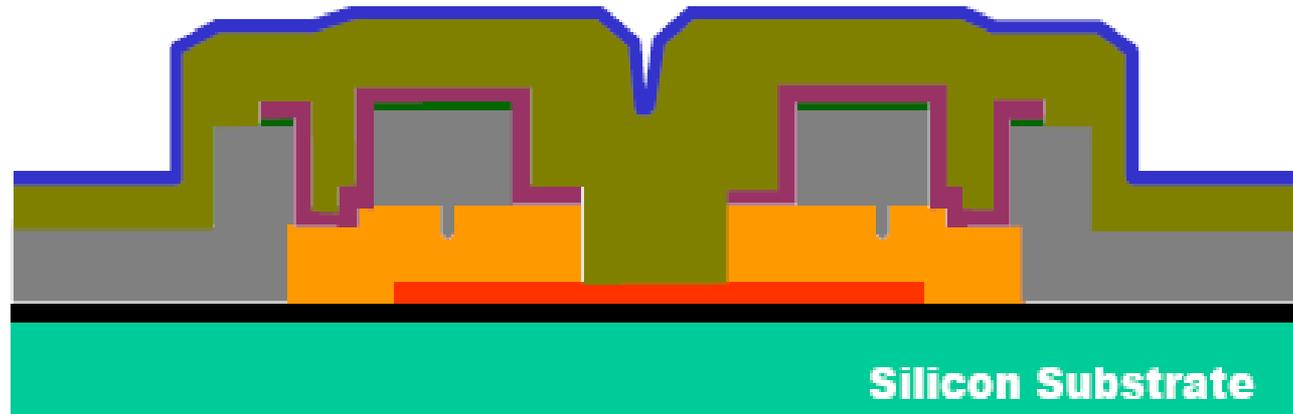
- Strukturierung „1st Oxide“
  - Photolithographie mit Maskenlevel 6 (Kontakt zum Poly 0)



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 14

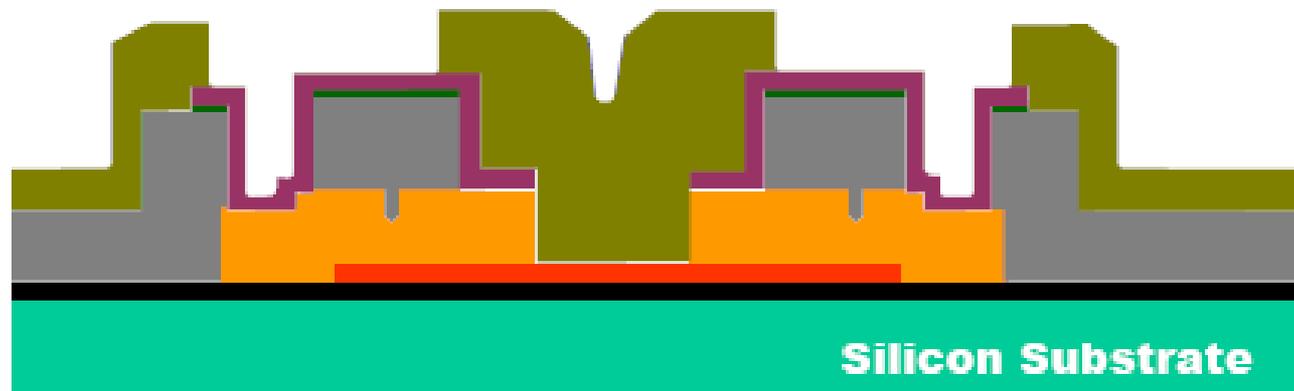
- Abscheidung „Poly 2“
  - Dicke: 1.5  $\mu\text{m}$
  - zweite Funktionschicht
- Abscheidung 200 nm Oxidmaskierung
  - Annealing



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 15

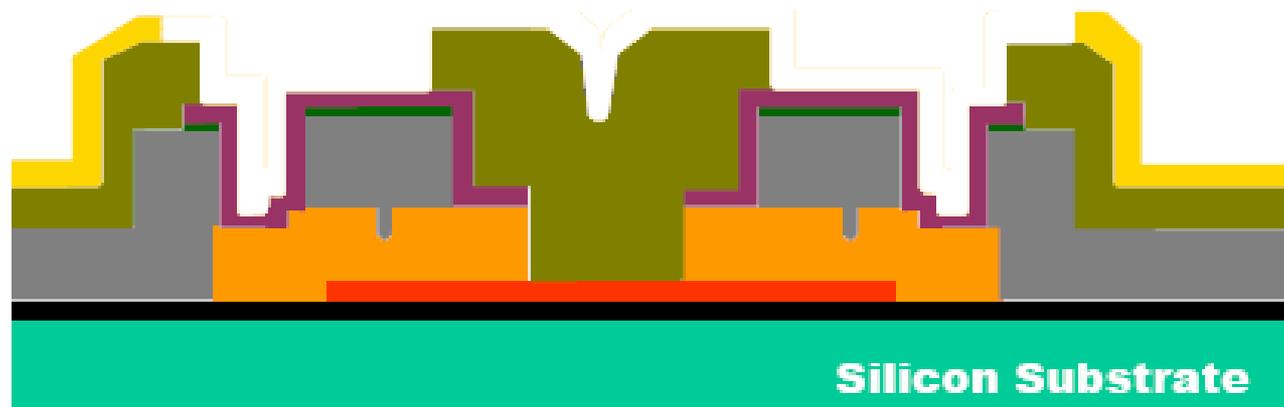
- Strukturierung „Poly 2“
  - Photolithographie mit Maskenlevel 7 (Poly 2)
  - Ätzen des Poly 2
  - Entfernen des Photolacks
  - Entfernen des Oxidmaskierung



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Mikromotor 16

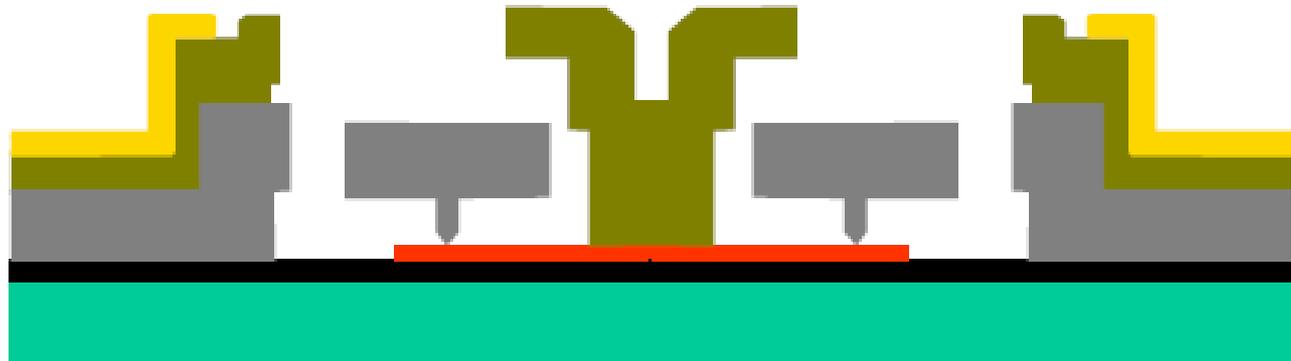
- Abscheidung & Strukturierung „Metal Layer“
  - Photolithographie mit Maskenlevel 8 (Metal) im lift-off-Verfahren
  - Abscheidung Metall (0.5  $\mu\text{m}$ )
  - Entfernen des Photolacks (lift-off des Metalls)



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

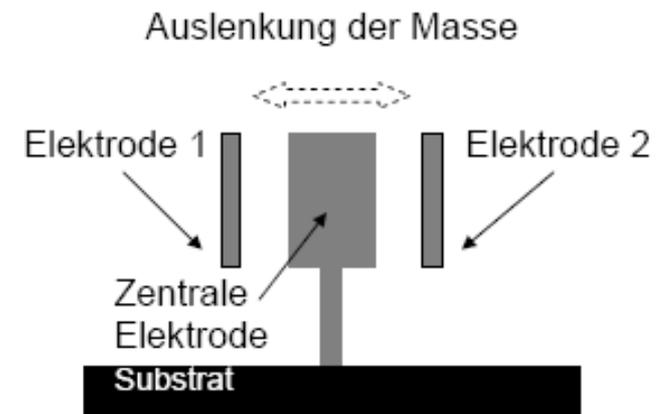
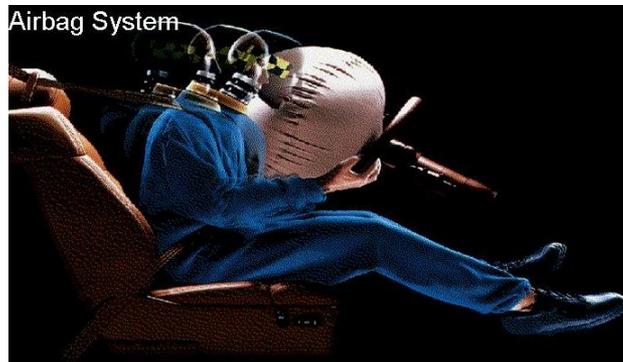
# Mikromotor 17

- Entfernen der Opferschicht
  - 49% HF-Lösung bei Raumtemperatur für 1 – 2 Minuten
  - Nicht verankerte Teile fallen „runter“



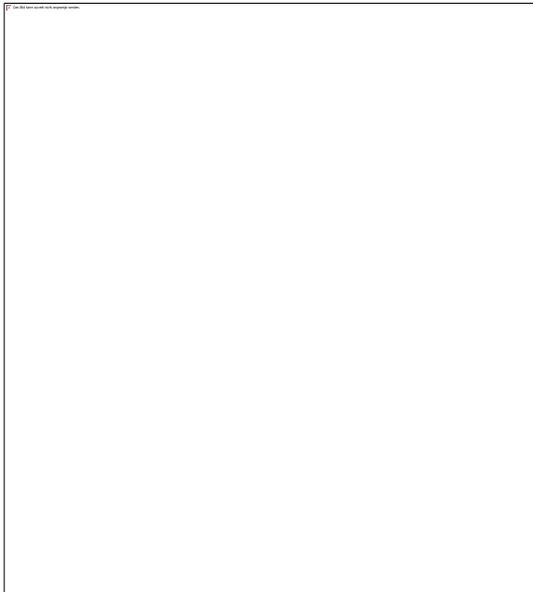
# Beschleunigungssensor

- Misst Geschwindigkeitsänderung pro Zeit
- Die Bewegung einer Probemasse, der so genannten seismischen Masse, wird gemessen
- Die seismische Masse ist mit dem Rest des Chips nur locker verbunden und kann sich frei bewegen
  - Dadurch gehorcht sie der Trägheitskraft
- Anwendungsbeispiel (Automobilindustrie):
  - Löst Airbag aus

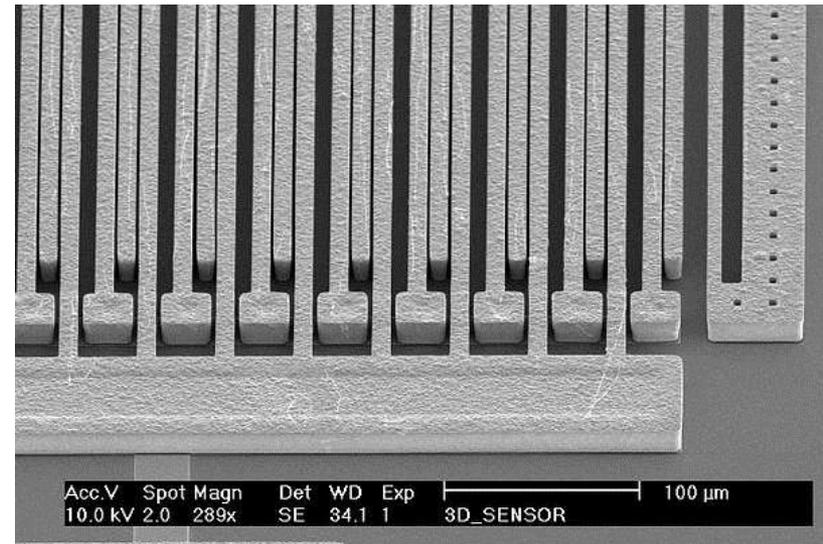


# Beschleunigungssensor

- Die Messung kann durch piezoresistive Widerstände an den Verbindungen oder durch eine kapazitive Auslesung erfolgen



Piezoresistiver  
Beschleunigungssensor

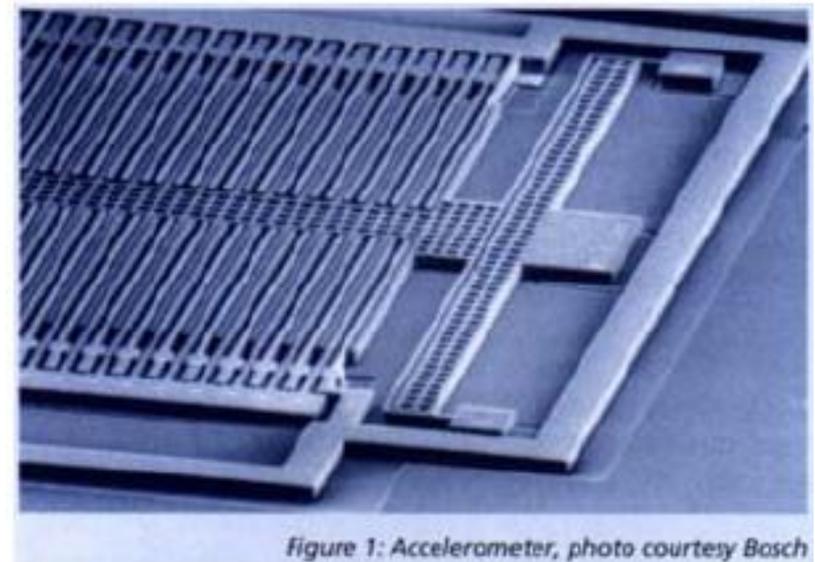
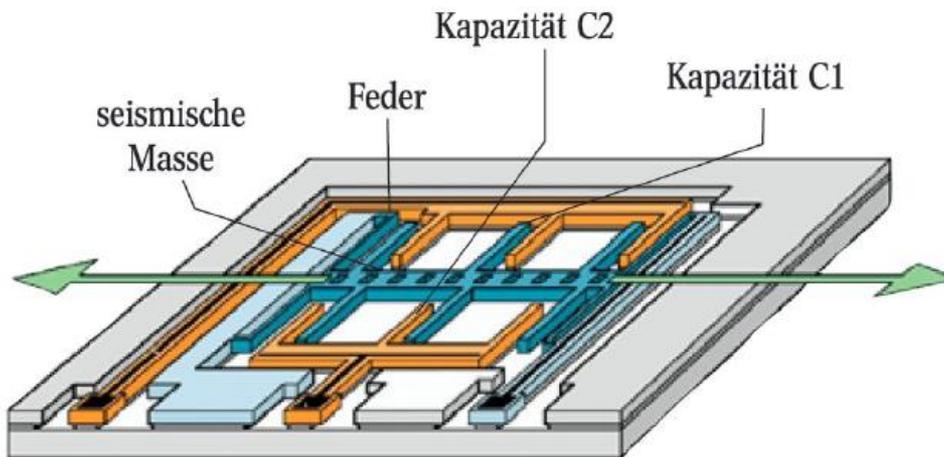


Kapazitiver  
Beschleunigungssensor

# Kapazitiver Beschleunigungssensor

## ■ Messprinzip

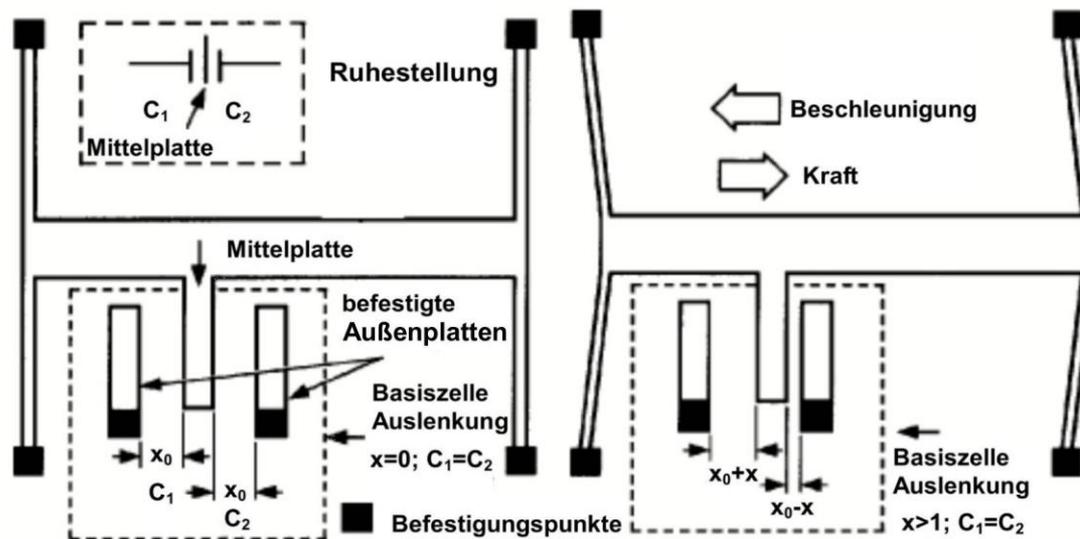
- Die bewegliche seismische Masse bildet mit festen Gegenelektroden einen Plattenkondensator
- Durch äußere Beschleunigung ändert sich der Abstand zwischen den Kondensatorplatten und damit die Kapazität
- Beschleunigung → Positionsänderung der Masse → Kapazitätsänderung → Spannungssignal



# Kapazitiver Beschleunigungssensor

## ■ Messprinzip

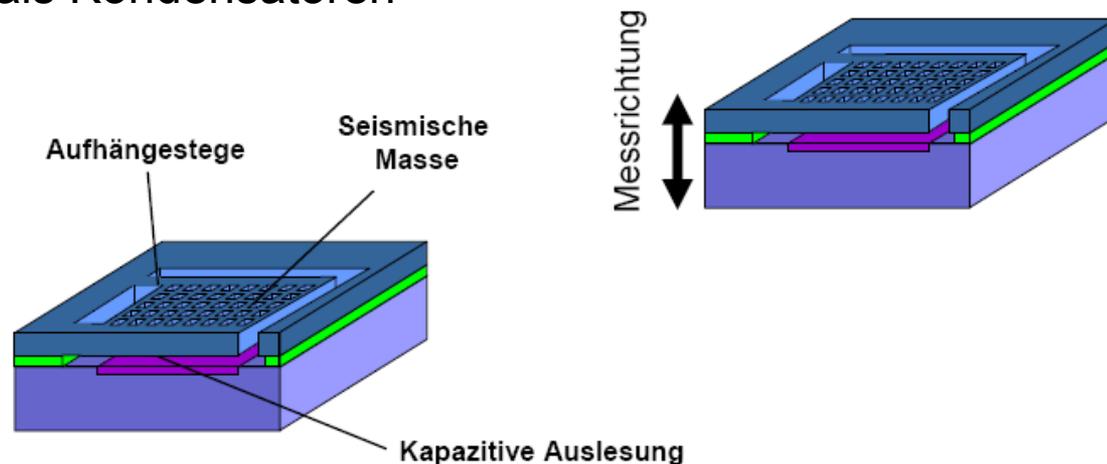
$$\vec{F}_a = m_s \cdot \vec{a}$$



Quelle: Bosch

# Kapazitiver Beschleunigungssensor

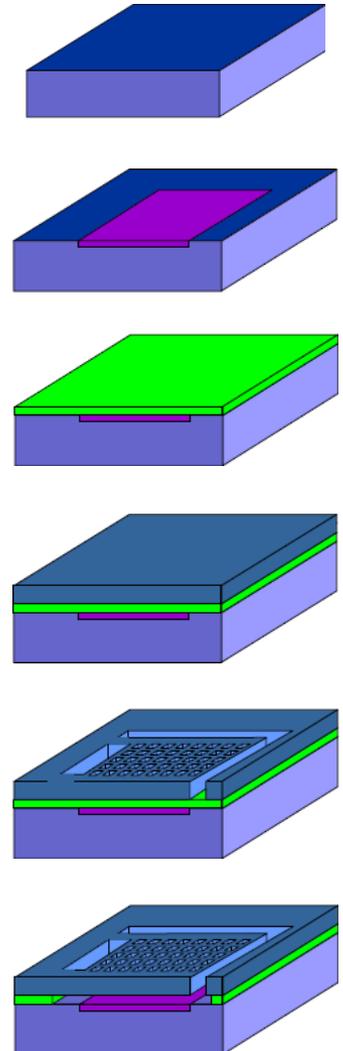
- Herstellung und Funktionsweise:
  - Herstellung z.B. mittels Opferschichtverfahren
  - Elastisch aufgehängte Masse (typ.  $0,7\mu\text{g}$ )
  - Berührungslos verzahnte Struktur von frei beweglichen und befestigten Teilen
  - „Finger“ als Kondensatoren



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

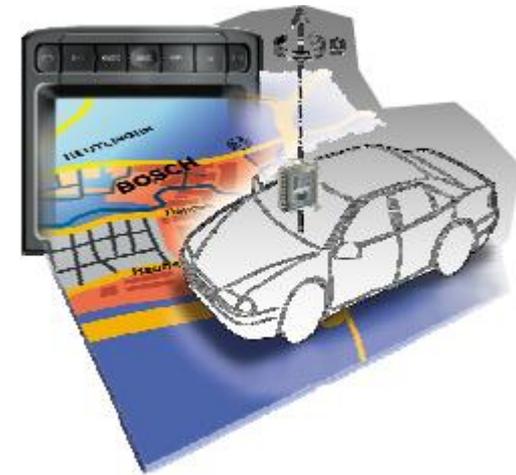
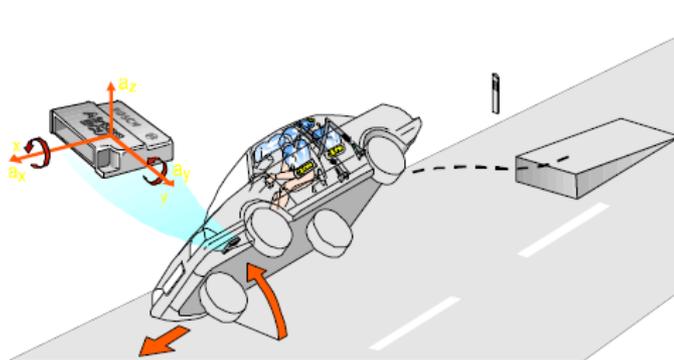
# Kapazitiver Beschleunigungssensor

- **Herstellungsprozess**
  - Wafer-Silizium
  - Diffusion von Elektroden
  - Abscheidung der Opferschicht
  - Abscheidung der aktiven Schicht
  - Strukturierung der aktiven Schicht
  - Selektives Entfernung der Opferschicht



# Drehratensensor

- Misst Winkeländerung pro Zeit ohne externe Referenz
- Drehgeber: misst Winkel in Bezug auf definierte Referenz
- Anwendungsbeispiel (Automobilindustrie)
  - Unterstützt das Navigationssystem
    - Dynamisches Drehen der elektronischen Karte
    - Fahrt in einem Tunnel ohne Satellitenkontakt
  - Roll-Over-Detektion
    - Aktivierung von Gurtspanner und Überrollbügel während der „Flugphase“



Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Drehratensensor

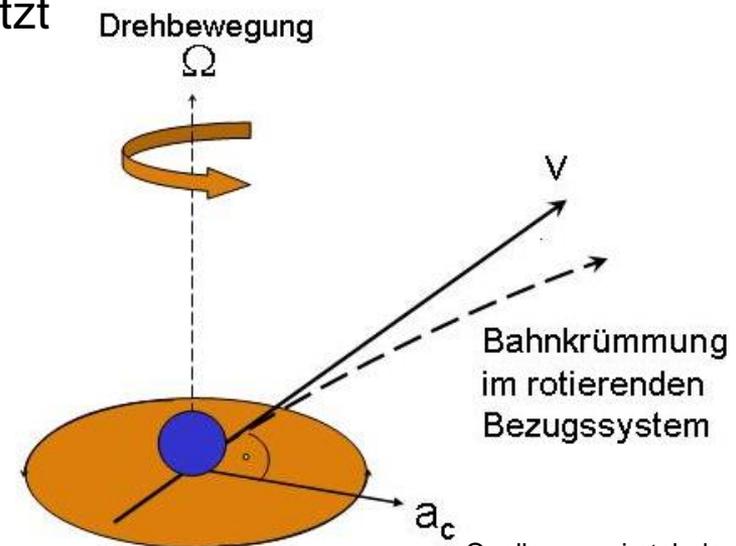
## ■ Messprinzip

- Die Winkelgeschwindigkeiten lassen sich um eine Drehachse parallel zur Detektionsachse messen
- Die Messung erfolgt über Corioliskraft

$$\vec{F}_c = -2 \cdot m_s \cdot \vec{\Omega} \times \vec{v}_p$$

$v_p$ : Geschwindigkeit des Primärschwingers  
 $m_s$ : Masse des Sekundärschwingers  
 • Drehrate

- Dazu wird ein Bauteil in Schwingung versetzt
- Durch die Corioliskraft kommt es bei einer Drehung von außen zu einer Schwingung senkrecht zur Primärschwingung



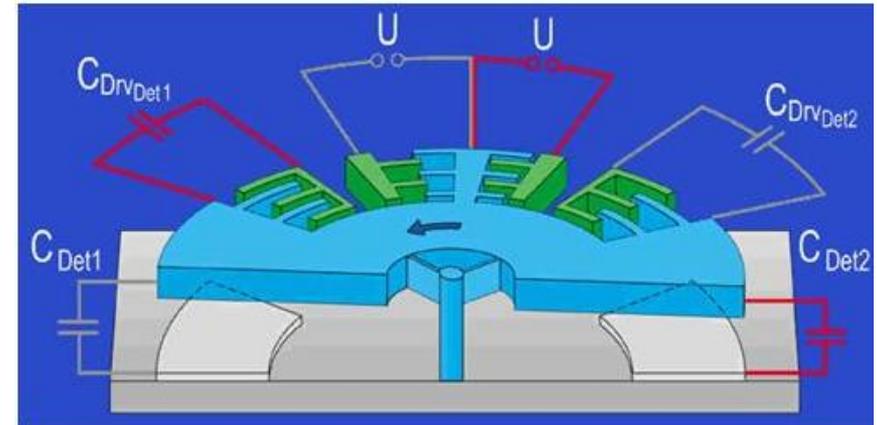
Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Drehratensensor

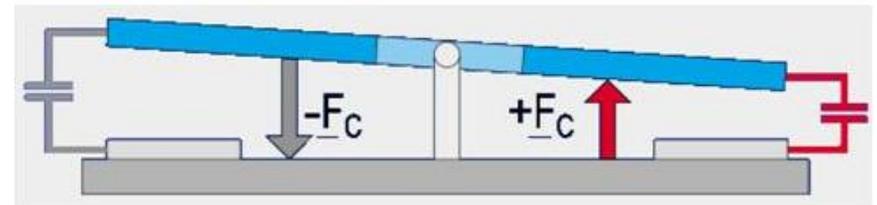
## ■ Funktionsprinzip

- Antrieb: Elektromagnetisch
- Detektion: Corioliskraft

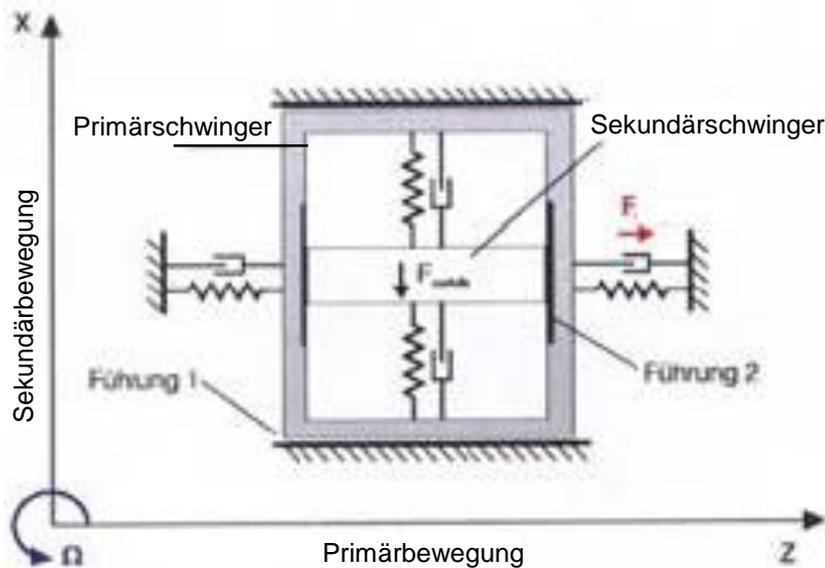
$$F \sim \omega \times v$$



Antriebsmode



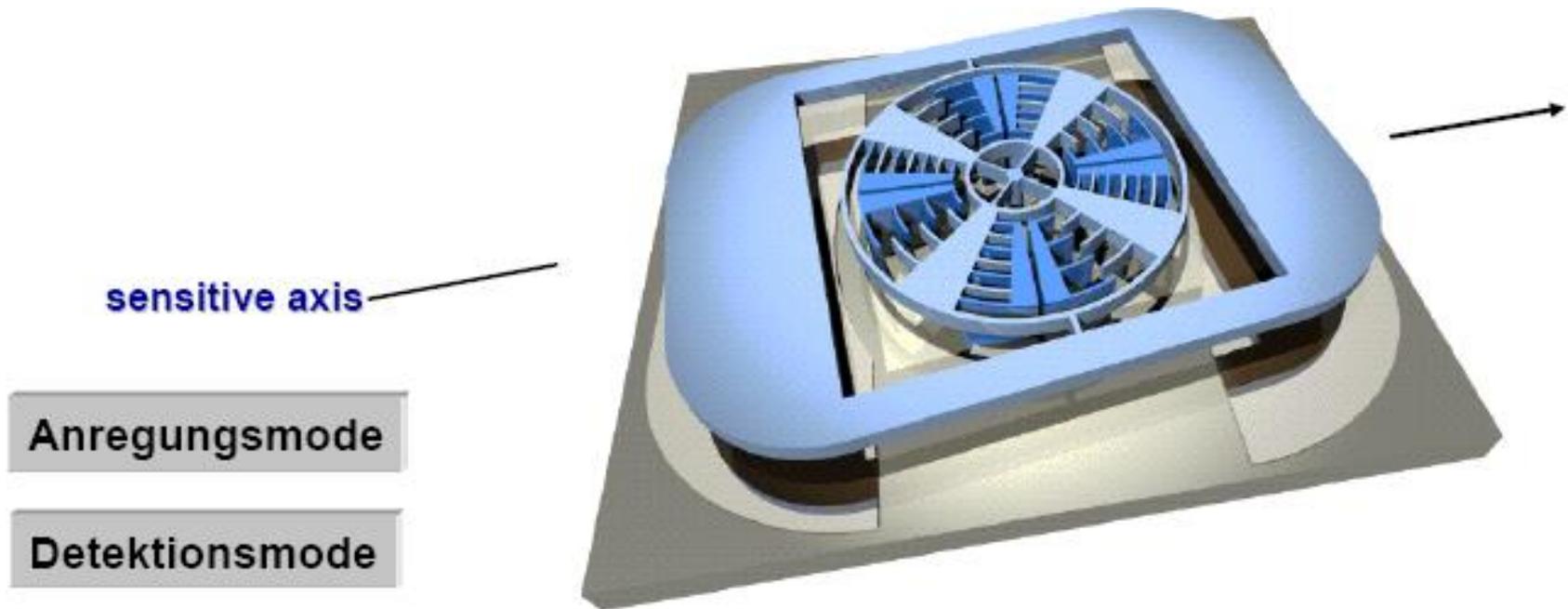
Detektionsmode

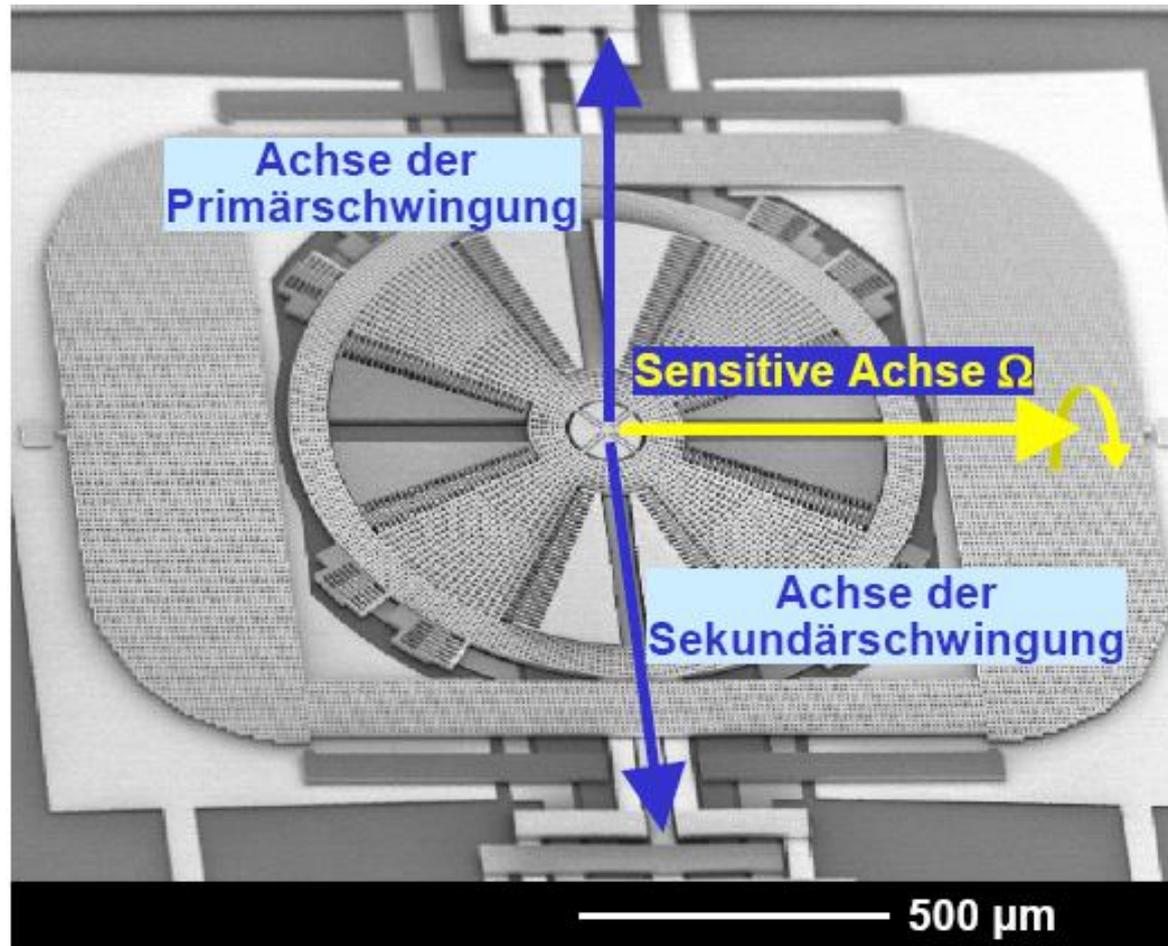


Quelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

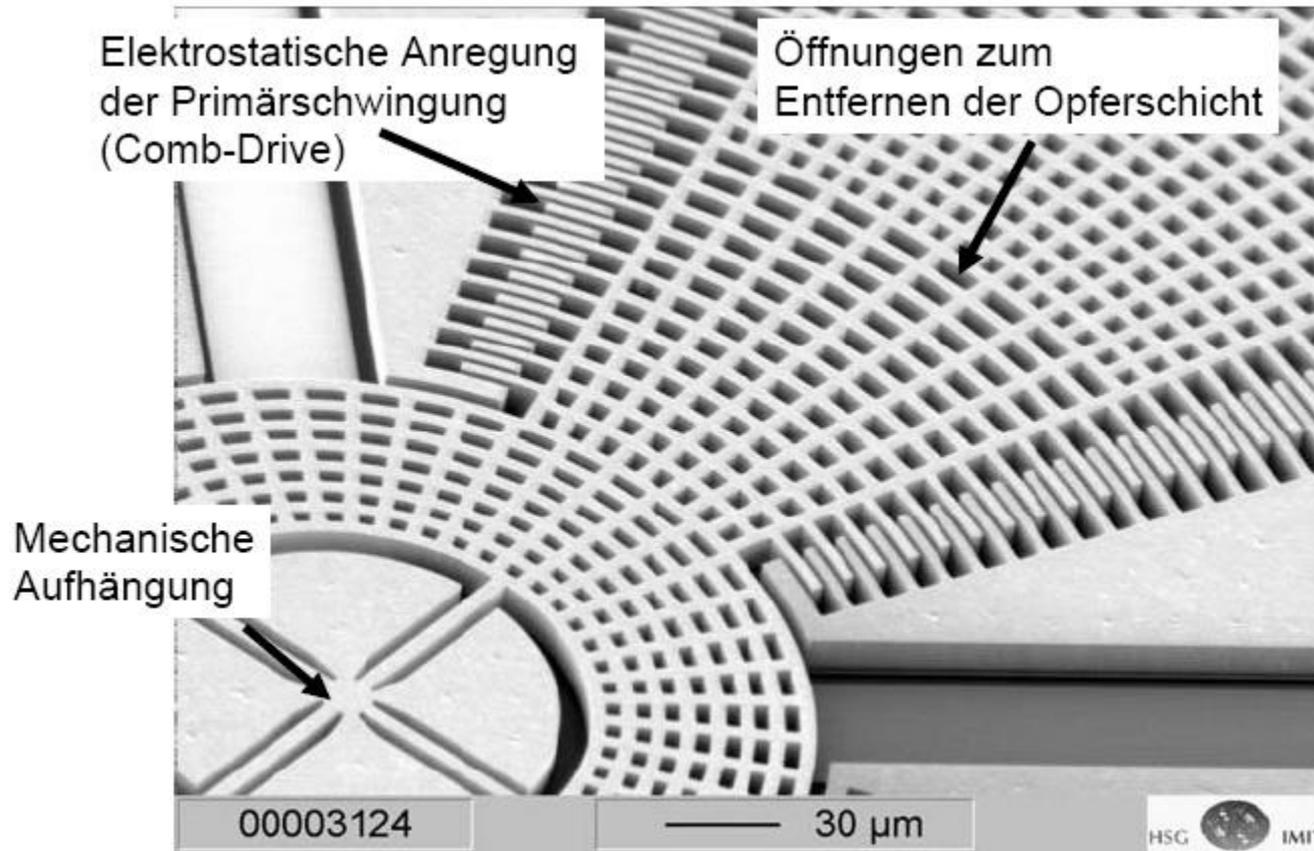
# Drehratensensor

- Mikromechanische Drehratensensor DAVED-RR
  - Decoupled Angular Velocity Detector
  - Resonanzfrequenz: ~ 2-3 kHz
  - Abmessungen: 1.2 mm x 1.6 mm

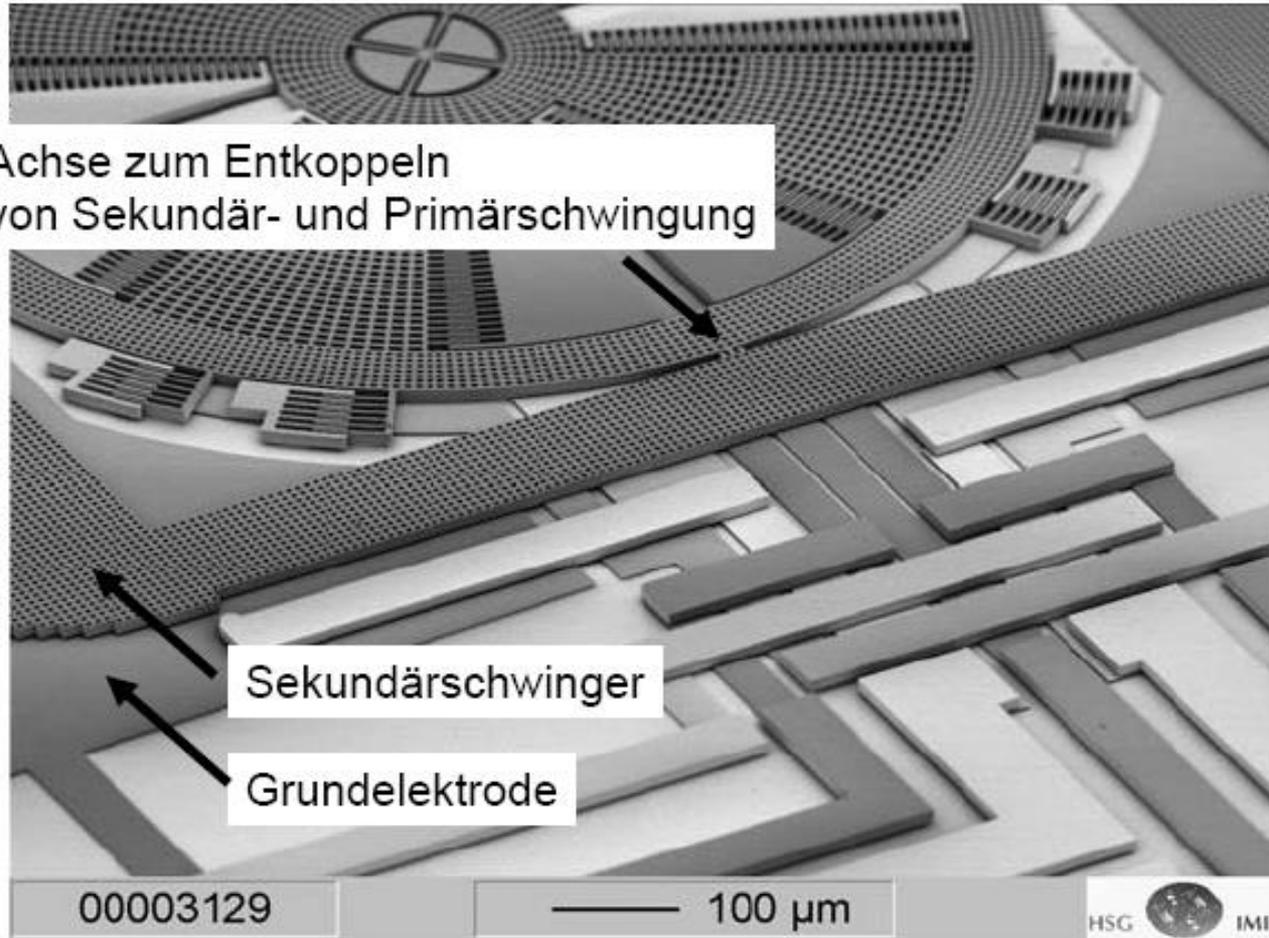




# DAVED-RR



# DAVED-RR



# DAVED-RR Technische Daten



60x50x32 mm<sup>3</sup>

Ambient pressure	4 hPa
Range	$\pm 200$ °/s
Linearity	$< 0.05$ % FSO
RMS Noise @ 50 Hz	0.05 °/s
Resolution	0.005 °/s
Bias Drift (- 30°C...+70°C)	$\pm 50$ °/s
G-Sensitivity	$< 0.3$ °/s/g
Output	10 mV/°/s