

**Verbundforschung  
in der Mikrosystemtechnik**

Projekt

**Einsatz der Mikromechanik  
zur Herstellung frequenzanaloger  
Sensoren**

1989 - 1992

## **Abschlußpräsentation**

### **"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenz-analoger Sensoren"**

**Mittwoch, 31. März 1993 in Villingen-Schwenningen**

10.00 Uhr	Begrüßung Herr Dr. Kulcke, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen Herr Dr. Sturm, VDI/VDE-Informationstechnik GmbH, Berlin
	Einführung Frequenzanaloge Sensoren Herr Prof. Dr. Büttgenbach, Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig
10.30 Uhr	Finite-Elemente-Modellierung resonanter Sensoren Herr Fabula, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen
10.50 Uhr	Silizium-Drucksensoren mit piezoelektrischem Antrieb Herr Dr. Flik, Robert Bosch GmbH, Stuttgart
11.10 Uhr	Resonante Quarz-Drucksensoren Herr Dr. Dagenbach, MotoMeter GmbH, Leonberg
11.30 Uhr	Silizium-Kraftsensoren mit piezoelektrischem Antrieb a) Einfachbalken-Resonatoren Herr Dr. Lärmer, Robert Bosch GmbH, Stuttgart  b) Mehrfachbalken-Resonatoren Herr Dr. Wagner, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen
12.10 Uhr	Thermisch angeregte resonante Silizium-Sensoren mit DMS Herr Dr. Bartuch, GMS mbH, St. Georgen
12.30 Uhr	Anwendung frequenzanaloger Kraftsensoren in der Wägetechnik Herr Dr. Selig, Bizerba GmbH, Balingen
12.50 Uhr	Mittagspause

- 14.00 Uhr            Ausstellung und Vorführung
- Simulationsverfahren
  - Druck- und Strömungssensoren
  - Kraftsensoren
  - Einsatz in der Wägetechnik
- 15.30 Uhr            Transferleistungen für die Industrie  
Herr Dr. Schmidt, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen
- 15.45 Uhr            Abschlußdiskussion  
Leitung: Herr Dr. Sturm, VDI/VDE-IT GmbH, Berlin
- 16.15 Uhr            Besichtigung des Hahn-Schickard-Institutes für Mikro- und Informations-  
technik
- 16.45 Uhr            Ende der Veranstaltung

**Abschlußpräsentation**  
**"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren"**  
**Mittwoch, 31. März 1993 in Villingen-Schwenningen**

Neuer Zeitplan

- |                  |   |
|------------------|---|
| 10.00            | Busfahrt zum Theater am Ring  |
| <del>10.00</del> | Begrüßung   |
| 10.30            | Herr Dr. Kulcke, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen<br>Herr Dr. Sturm, VDI/VDE-Informationstechnik GmbH, Berlin<br>Einführung<br>Herr Prof. Dr. Büttgenbach, Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig |
| <del>10.30</del> | Finite-Elemente-Modellierung resonanter Sensoren  |
| 11.00            | Herr Fabula, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen   |
| <del>10.50</del> | Silizium-Drucksensoren mit piezoelektrischem Antrieb  |
| 11.20            | Herr Dr. Flik, Robert Bosch GmbH, Stuttgart   |
| <del>11.10</del> | Resonante Quarz-Drucksensoren   |
| 11.40            | Herr Dr. Dagenbach, MotoMeter GmbH, Leonberg  |
| <del>11.30</del> | Silizium-Kraftsensoren mit piezoelektrischem Antrieb  |
| 12.00            | a) Einfachbalken Resonatoren<br>Herr Dr. Lärmer, Robert Bosch GmbH, Stuttgart<br>b) Mehrfachbalken-Resonatoren<br>Herr Wagner, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen                                       |
| 12.40            | Mittagspause  |
| <del>12.10</del> | Thermisch angeregte resonante Silizium-Sensoren mit DMS   |
| 13.30            | Herr Dr. Bartuch, GMS mbH, St. Georgen  |
| <del>12.30</del> | Anwendung frequenzanaloger Sensoren in der Wägetechnik  |
| 13.50            | Herr Dr. Selig, Bizerba GmbH, Balingen  |
| <del>15.30</del> | Transferleistungen für die Industrie  |
| 14.10            | Herr Dr. Schmidt, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen  |
| 14.30            | Busfahrt zum Institut   |
| <del>14.00</del> | Ausstellung und Vorführung  |
| 15.00            | Besichtigung des Institutes für Mikro- und Informationstechnik  |
| <del>15.45</del> | 16.30 Abschlußdiskussion im Foyer des Institutes  |
| <del>16.45</del> | 17.00 Ende der Veranstaltung  |

## **Abschlußpräsentation**

### **"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren"**

**Mittwoch, 31. März 1993 in Villingen-Schwenningen**

Erfreulicherweise ist die Einladung der VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik GmbH zur Abschlußpräsentation des obengenannten Verbundprojektes auf starke Resonanz gestoßen.

Weit über 60 Besucher haben sich angemeldet; hinzu kommen die Vertreter der beteiligten Firmen und die Vortragenden.

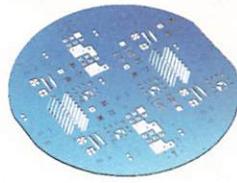
Für einen solchen Personenkreis ist der Seminarraum in unserem Institut zu klein. Wir haben uns deshalb entschlossen, den Vortragsteil der Veranstaltung in das "Theater am Ring" in Villingen zu verlegen. Die technischen Vorführungen finden wie bisher geplant im Institut statt.

Zur Fahrt ins Theater steht Ihnen ein Bus zur Verfügung, der um 10.00 Uhr am Institut abfährt und ca. 14.30 Uhr zurück fährt.

Wer mit dem eigenen PKW fahren will, kann die Strecke den Stadtplankopien entnehmen. Parkmöglichkeit besteht direkt hinter dem Theater.

Leider verschieben sich durch die Fahrt die Anfangstermine der Veranstaltungen etwas. Den neuen Zeitplan finden Sie auf der Rückseite.





## Finite-Elemente-Modellierung resonanter Sensoren

Thomas Fabula

Beim Entwurf von mikromechanischen Bauelementen kommt der Simulation mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) eine wichtige Bedeutung zu, da sie bereits in der Entwurfsphase gestattet, die technologisch zu realisierenden Funktionsprinzipien und die prozeßtechnischen Randbedingungen zu berücksichtigen. Durch Parametervariationen des FE-Modells kann der Einfluß der Schwingergeometrie und der Materialeigenschaften der Dünnschichtsysteme vorab studiert werden.

Der Vortrag geht auf die Untersuchungen und Optimierung von resonanten mikromechanischen Sensoren ein, die durch ihr frequenzanaloges Ausgangssignal für die Präzisionsmessung von Kraft und Druck besonders geeignet sind. Mit Hilfe dynamischer FE-Berechnungen werden die Eigenfrequenzen und Schwingungsformen (Modalanalyse) verschiedener Sensorstrukturen (Einfach-, Mehrfachbalken, Membranen) bestimmt und der Einfluß der zu untersuchenden Meßgröße ermittelt. Die Berechnung der Druck- bzw. Kraftempfindlichkeit erfolgt durch eine nichtlineare, statische FE-Berechnung, mit welcher die durch die Meßgröße hervorgerufene Steifigkeitsänderung des Gesamtsystems bestimmt wird. Die geänderte Struktursteifigkeit wird herangezogen, um die Eigenfrequenzen des Sensors unter Belastung zu ermitteln. Durch einen Vergleich der berechneten Sensorkennlinien mit experimentellen Werten kann auf die innere Spannung der Dünnschichten zurückgeschlossen werden. Bei der Berechnung des Frequenzgangverhaltens wird die Anregung mit Hilfe piezoelektrischer Dünnschichten mit berücksichtigt und das mechanische Amplitudenspektrum und der elektrische Impedanz- und Phasenverlauf ermittelt. Insbesondere wurden das Schichtdickenverhältnis und die Elektrodengeometrie zwecks optimaler Schwingungsanregung untersucht. Ein Vergleich mit Messungen dokumentiert die erreichbaren Modellierungsgenauigkeiten der FE-Berechnungsmethode.



Im Rahmen des BMFT-Verbundprojekts "Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren" wurden bei BOSCH die Grundlagen frequenzanaloger Druck- und Kraftsensoren in Silicium mit Fremdanregung durch piezoelektrisches Zinkoxid erarbeitet. Die Integration des piezoelektrischen Materials in mikromechanische Verfahrensabläufe wurde erreicht und geeignete Batch-Prozesse entwickelt, die in der Folge mehrmals verbessert wurden. Die Integrierbarkeit mit mikroelektronischen Funktionen konnte prinzipiell gezeigt werden; eine für den Sensorantrieb geeignete elektronische Schaltung wurde entwickelt und für einen Demonstrator als Surface Mounted Device (SMD) aufgebaut.

Nach Abschluß der Prozeßentwicklung bei BOSCH stehen zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren zwei Prozeßvarianten standardmäßig zur Verfügung. Dabei erscheint ein Schichtaufbau, bei dem das piezoelektrische ZnO in einer "Metall-Insulator-Semiconductor"-Struktur ("MIS"-Design) eingebettet wird, als besonders vielversprechend.

Die Weiterentwicklung piezoelektrischer ZnO-Schichten bei BOSCH führte zu weiteren Verbesserungen dieses aussichtsreichen Materials. Schichtstruktur, Piezoelektrizität und piezomechanische Kopplung wurden charakterisiert und die so gewonnenen Erkenntnisse in die Prozeßentwicklung rückgekoppelt. Mit optimierten ZnO-Schichten konnten bei BOSCH erstmals deutliche Resonanzeffekte im Impedanzverlauf eines Schwingers festgestellt werden.

Resonante Drucksensoren auf der Basis piezoelektrisch zum Schwingen erregter Siliciummembranen wurden als Funktion von Druck, Lastwechseln, Packaging, Temperatur und Temperaturwechseln untersucht. Dabei gefundene Kriecheffekte konnten durch anodisches Bonden der Drucksensorchips auf Pyrexglas weitgehend beseitigt werden. Erste Ansätze zur Temperaturkompensation ZnO-getriebener Sensoren wurden erarbeitet.

Eine Vielzahl funktionsfähiger batch-gefertigter Kraftsensoren konnte an den Verbundpartner Bizerba Werke Balingen abgegeben werden, wo eine Waage mit frequenzanalogem Kraftaufnehmer als Demonstrator realisiert werden konnte.

Eine mit einer minimalen externen Zusatzbeschaltung integrierbare Elektronik zur Sensorentdämpfung mit Stabilisierung der Resonatoramplitude wurde bei BOSCH entwickelt und als SMD aufgebaut; diese Schaltung garantiert einen stabilen Betrieb des Sensors über den gesamten Arbeitsbereich. Entsprechende Schaltungsvorschläge wurden auch dem Verbundpartner Bizerba übergeben.

## Frequenzanaloge Quarz - Drucksensoren

Die vorteilhaften Eigenschaften von Quarz wie hervorragende Elastizität, sehr gute Langzeitstabilität, chemische Resistenz und vor allem sein piezoelektrisches Verhalten ermöglichen im Batchprozeß die kostengünstige Herstellung von Sensoren. Die Anzahl der notwendigen Prozeßschritte ist wesentlich geringer als bei vergleichbaren Siliziumsensoren.

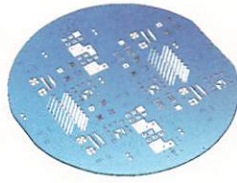
Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden Drucksensormembranen entwickelt, die durch Ätzen von Cr/Au-beschichteten Quarzscheiben im AT-Kristallschnitt derart strukturiert werden, daß bei einer Druckbeaufschlagung der Membran durch Ausnutzen des Kniehebeleffekts hohe mechanische Spannungen und somit ein hohes Nutzsignal entstehen. Die wegen des anisotropen Ätzverhaltens des Quarzes auftretenden Verzerrungen gegenüber dem Layout wurden durch Korrektur der Maske weitestgehend beseitigt. Die elektrische Schwingungsanregung und der Signalabgriff geschehen über beidseitige Cr/Au-Elektroden, die mit einem NdYAG-Laser auf einfache Weise strukturiert und in der Entwicklungsphase leicht modifiziert werden konnten.

Sowohl das mechanische als auch das piezoelektrische Verhalten wurde mit Hilfe der Finite Element Methode (FEM) simuliert und in mehreren Designschleifen optimiert. Die Ergebnisse der Simulation wurden jeweils in Zusammenarbeit mit dem Hahn-Schickard-Institut in Mustersensoren umgesetzt und meßtechnisch überprüft.

Zur Aufbau- und Verbindungstechnik wurden Technologien der Flüssigkristalltechnik (LCD) genutzt. Dort werden Gläser mit einer elektrisch leitfähigen und photolithografisch einfach strukturierbaren Indium-Zinnoxid-(ITO)Beschichtung benutzt. Zur Verbindung zweier Gläser werden Kleberahmen mit eingelagerten Distanzhaltern (Spacern) verwendet. Beide Techniken wurden eingesetzt, um zum einen die dem Medium zugewandten Elektrodenflächen zu kontaktieren und zu anderen um den Quarzsensor auf einem Glasträger zu befestigen. Durch die im Kleberahmen eingelagerten Spacer kann darüberhinaus auf einfache Weise eine Überlastsicherung realisiert werden.

Die zum Projektabschluß vorliegenden Sensoren zeigen bei einem Nenndruck von ca. 2 bar eine Empfindlichkeit von 2500 Hz/bar sowie eine Linearitätsabweichung von 1,8 %. Die Nennfrequenz beträgt 36 kHz. Durch die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Dimensionierungsgrundlagen können Gestaltungsregeln für andere Druckbereiche rasch aufgestellt werden.





## Silizium-Kraftsensoren mit piezoelektrischem Antrieb Mehrfachbalken-Resonatoren

Hans-Joachim Wagner

Frequenzanaloge Kraftsensoren in Silizium mit quasi-digitalem Frequenz Ausgang werden vorgestellt. Der kraftempfindliche Resonator wird durch eine membranartige Dreifachbalkenstruktur (Dicke = 25  $\mu\text{m}$ ) realisiert.

Die Anregung der Resonanzschwingungen des im antisymmetrischen Grundmode (äußere Balken gegenphasig zum inneren Balken) schwingenden Kraftsensors erfolgt durch piezoelektrische dünne Schichten (Dicke = 3  $\mu\text{m}$ ). Die ZnO-Dünnschichten werden durch HF-Magnetron-Sputtern hergestellt. Die für den transversalen piezoelektrischen Effekt vorteilhafte Vorzugsorientierung der Kristallite (c-Achse senkrecht zur Substratoberfläche) kann in komplexer Weise durch die Sputterparameter beeinflusst werden.

Mehrfachbalken-Resonatoren haben den Vorteil, daß bei geeignetem Entkoppelbereich und gegenphasiger Anregung eine Momenten-Kompensation der Balkenschwingungen im Einspannbereich erreicht werden kann, d.h. die Schwingungsenergie dissipiert nicht ins Bulkmaterial. Dadurch sind im Vergleich zu Einfachbalken-Strukturen höhere Resonatorgüten erreichbar.

FEM-Berechnungen und Messungen zeigen, daß bei größer werdendem Entkoppelbereich eine hohe Modenaufspaltung erfolgt. Dadurch ergibt sich eine gute Unimodalität für das "Einlocken" einer Oszillatorschaltung.

Die prozeßtechnische Realisierung der Dreifachbalken-Kraftsensoren erfolgt durch eine p<sup>+</sup>-Dotierung von n-Silizium für den Grundelektrodenbereich, Abscheiden und Strukturieren der ZnO-Anregungsbereiche und Abscheiden von Aluminium für die obere Elektrode. Anschließend wird die Passivierung, das rückseitige anisotrope Tiefenätzen zur Festlegung der Balkendicke und das Freilegen der Balken von der Vorderseite durch Plasmaätzen durchgeführt.

Durch einfaches Ändern (prozeßtechnisch nur eine Maske) des Entkoppelbereichs können durch FEM-Simulation und korrelierte Messungen die Momenten-Kompensation und die Modenentkopplung untersucht werden.

Kraft/Frequenz-Messungen zeigen, daß der antisymmetrische Grundmode die höchste Kraftempfindlichkeit und die höchste Güte hat. Diese Messungen zeigen auch, daß möglichst stressfreie ZnO-Dünnschichten für Sensor-Anwendungen gefordert sind.

## Abschlußpräsentation " Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren"

### **Resonante Silizium-Sensoren mit elektrothermischer Anregung und DMS in Metaldünnschichttechnologie**

Dr. H. Bartuch

Gesellschaft für Mikrotechnik und Sensorik mbH, Industriestraße 7, 7742 St. Georgen

#### **Zusammenfassung:**

Es wurden Silizium-Balken (Dicke: ca. 50  $\mu\text{m}$ , Breite: 1 mm) unterschiedlicher Länge (3 - 10 mm) mittels anisotroper Ätztechnik in thermisch oxidierten (100)-Si-Wafern hergestellt und mit an den Balkenenden positionierten NiCr-Mikroheizern versehen. Auf dem Balken befinden sich weiterhin vier zu einer Vollbrücke verschaltete Meßwiderstände. Infolge einer impulsartigen Beheizung wird der Balken zu Eigenschwingungen angeregt. Die periodische Dehnung bzw. Stauchung der Meßwiderstände führt zu einem frequenzanalogen Brückensignal, das sehr gut geeignet ist, um Veränderungen im Resonanzverhalten nachzuweisen. Die Möglichkeiten dieses Sensorprinzips zum Nachweis von Kraft, Temperatur und Gasströmung werden anhand von Messungen dargestellt. Bei der Realisierung von frequenzanalogen Sensoren ergibt sich ein Kostenvorteil dadurch, daß das Meßsignal quasidigital vorliegt, sodaß eine A/D-Wandlung entfällt.

Die Umsetzung des elektrischen Layouts einschließlich der bond- und/oder lötbaren Außenanschlüsse erfolgte durchgängig in Metaldünnschichttechnologie. Die Schichtsysteme NiCr/TiPdAu (Lötvariante) bzw. NiCr/TiAu/galv.Au (Bondvariante) wurden mittels PVD-Verfahren abgeschieden und zur Strukturierung den üblichen photolithographischen und naßchemischen Prozesseschritten unterzogen. Durch die verfahrenstechnischen Arbeiten wurde eine optimale Verbindung der Silizium-Ätztechnologie mit der Herstellung der elektrischen Komponenten der Sensoren erreicht, was letztendlich zu hoher Ausbeute und niedrigen Kosten führen wird. Die hohe thermische Stabilität des Metallschichtsystems (bei unbelasteten Kontakten bis 225°C) stellt einen Hochtemperatureinsatz solcher Sensoren in Aussicht.

Durch umfangreiche statische und dynamische FEM-Berechnungen konnte gestützt durch experimentelle Ergebnisse bei Fremdanregung und elektrothermischer Anregung gezeigt werden, daß das Resonanzverhalten der Sensoren durch die direkt applizierte DMS-Brücke nicht signifikant beeinflusst wird. Weitere numerische Berechnungen (u.a. Strömungssimulation) bildeten darüberhinaus den Ausgangspunkt für erste Optimierungen der Sensorempfindlichkeit und wurden zur Interpretation der experimentellen Ergebnisse herangezogen.

## ANWENDUNGEN FREQUENZANALOGER KRAFTSENSOREN IN DER WÄGETECHNIK

Kurzfassung des Vortrags anlässlich der Abschlusspräsentation des Projektes 'Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren' im Rahmen des BMFT Förderungsschwerpunktes Mikrosystemtechnik.

Klaus Peter Selig, Dieter Fischle, BIZERBA Werke Balingen, 1993

---

Die heute bekannten Methoden der Mikromechanik gestatten die Herstellung von Resonatoren, die als Sensorelemente für eine Vielzahl unterschiedlicher Aufnehmer dienen können.

Eine mögliche Anwendung solcher Sensorelemente liegt in der Entwicklung von Kraftaufnehmern für die Wägetechnik.

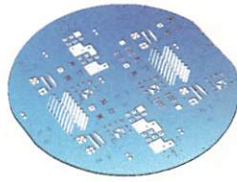
Es zeigt sich, dass solche Aufnehmer eine Reihe von Vorteilen besitzen, die durch die bisher bekannten Verfahren der Wägetechnik in dieser Kombination nicht abgedeckt werden.

Zu diesen Vorteilen gehören

- Ausgangsgrösse mit sehr guter Weiterverarbeitbarkeit
- Optimierung der Schnittstelle Sensorelement-Aufnehmer
- Sehr gute Materialeigenschaften der verwendeten kristallinen Werkstoffe der Sensorelemente

Die Entwicklung einer für diese Sensorelemente angepassten Aufnehmerumgebung sowie die Entwicklung einer angepassten Signalverarbeitung ermöglichte die Realisierung von Kraftaufnehmerprototypen mit hoher Auflösung bei geringer Messzeit.

Die bei den Prototypen ermittelten messtechnischen Eigenschaften zeigen, dass Kraftaufnehmer dieser Bauart vorteilhaft den Bereich zwischen den geringer auflösenden DMS-Aufnehmern und den hochauflösenden Aufnehmern nach dem Prinzip der magnetischen Kraftkompensation abdecken.



## Transferleistungen

- ♦ Simulation und Optimierung frequenz-analoger Sensoren in Silizium und Quarz
- ♦ Entwicklung und Herstellung piezoelektrisch angeregter Silizium-Resonatoren  
(Membranschwinger, Balkenschwinger)
- ♦ Entwicklung und Herstellung von Quarz-Resonatoren  
(Membranschwinger, Balkenschwinger)
- ♦ Dienstleistungen im Bereich der Prozeß-technologie
- ♦ Meßtechnik zur Charakterisierung von Resonatoren
- ♦ Aufbau- und Verbindungstechnik für resonante Sensoren  
(Anodisches Bonden, Die-Bonden, Drahtbonden, Lasermikromaterial-Bearbeitung)

# **Mikromechanische Sensorelemente**

## **Transferleistungen**

1. Erkenntnisse auf dem Gebiet physikalischer Eigenschaften von Silizium und Quarz
2. Erfahrungen auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung
3. Mechanische Verbindungstechnik für Mikromechanische Sensorelemente



**BOSCH****ZWD****BMFT-Verbundprojekt****"Einsatz der Mikromechanik zur  
Herstellung frequenzanaloger Sensoren"**

03/93

**Transferleistungen der Firma BOSCH an mittelständische Partner:**

- **Lieferung von Halbzeugen (im Reutlinger Werk vorprozessierte Wafer)**
- **Erbringen von Dienstleistungen (z.B. Abscheidung von Maskierschichten auf unprozessierten Wafern, Durchführung von Photolithographieschritten, Fenster öffnen, Erzeugen lokaler Dotierungen, einfache Ätzprozesse etc.)**

**(jeweils gegen Entgelt)**

- **Know-how Transfer aus BMFT-Projekt**



## Transferleistungen der Fa. GMS mbH

- Applikation von Dünnschicht -DMS auf Metallträger mit isolierender Zwischenschicht

*Merkmale:*

max. Prozeßtemperatur	320°C
hervorragende Langzeit- und Kriecheigenschaften	
integrierbare Temperaturkompensation	
elektr. Spannungsfestigkeit	> 500 VAC

- Layoutentwicklung und isotropes/anisotropes Ätzen von einfachen mikromechanischen Elementen in Silizium (Brücken, Zungen, Balken, Membranen)
- Applikation von elektrischen Dünnschichtanordnungen auf mikromechanische Elemente zur Signalgewinnung (Mikroheizer, DMS, Temperaturfühler) und AVT (löt- und bondbares Kontaktsystem) für z.B. frequenzanaloge Sensoren, Drucksensoren, schnelle Temperatursensoren u.ä.

**Technische Beratung zu folgenden Themenbereichen:**

- \* Simulation des Schwingungsverhaltens von Quarzmembranen mittels Finite Element Methode**
- \* Ätzverhalten von Quarz**
- \* Strukturierung von Quarzmembranen (Geometrie)**
- \* Laserstrukturieren von Elektrodenflächen**
- \* Elektrische Kontaktierung mit Technologien aus der Flüssigkristalltechnik**
- \* Elektrische Anregung von Quarzmembranen; Signalauswertung**