

Zwischenbericht zum Verbundvorhaben

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

Laufzeit: 1.7.1989 - 30.6.1992

Berichtszeitraum: 1.7.1990 - 31.12.1990

Verbundpartner: Bizerba-Werke, Balingen
Bosch GmbH, Stuttgart
Moto Meter AG, Leonberg
Gebr. Staiger, St. Georgen
Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und
Informationstechnik, Villingen-Schwenningen

Ziel des Vorhabens ist die Erarbeitung von Technologien zur Herstellung miniaturisierter Resonatoren aus Quarz und Silizium und die Untersuchung ihrer Eignung als frequenzanaloge Sensoren. Über die im Zeitraum 1.7.1990 - 31.12.1990 durchgeführten Arbeiten haben die Verbundpartner auf dem Statusseminar am 23.1.1991 in Leonberg ausführlich berichtet (siehe die schriftlichen Einzeldarstellungen).

In einer Projektleiterbesprechung am 15.2.1991 in Villingen-Schwenningen wurde versucht, die bisher erreichten Ergebnisse kritisch zu würdigen, und es wurde ein aktualisierter Arbeitsplan für die zweite Hälfte der Laufzeit des Vorhabens erarbeitet. Dieser sieht eine Konzentration der Aktivitäten auf drei erfolgversprechende Schwerpunkte vor. Die Arbeiten sollen in intensivierter Zusammenarbeit zwischen den Verbundpartnern durchgeführt werden.

Die wichtigsten Resultate dieser Bestandsaufnahme und der Plan für das weitere Vorgehen werden im folgenden zusammengefaßt.

1. Erreichter Stand bei "Halbzeit" des Vorhabens

1.1 Festlegung der Entwicklungsziele

Auf der Grundlage umfangreicher Patent- und Literaturrecherchen und entsprechend den von den Verbundpartnern in Aussicht genommenen Applikationen wurde die Erarbeitung der Technologien zur Herstellung folgender Sensorstrukturen als Entwicklungsziel des Vorhabens festgelegt:

- Kraftsensoren in "Multi-String"-Anordnung auf der Basis von Silizium. Piezoelektrische Anregung der Schwingungen mittels Zinkoxid-Schichten.
- Drucksensoren auf der Basis resonanter Membranen aus Silizium, Siliziumnitrid und Quarz.

Für diese Sensoren wurden Pflichtenhefte erarbeitet.

1.2 Funktionsprinzipien und theoretische Grundlagen

Die Optimierung der mikromechanischen Resonatoren bezüglich des gewünschten Sensoreffektes erfordert im allgemeinen Simulationen mit Hilfe dynamischer Finite-Elemente-Rechnungen. Hierzu wurde das Programmpaket ANSYS ausgewählt. Zur Einarbeitung in die Methode wurden zunächst Simulationsrechnungen für einen kommerziell erhältlichen Kraftsensor in Form einer Quarz-Doppelstimmgabel durchgeführt. Die sich daran anschließende Simulation diverser Resonatorgeometrien hatte folgende Ergebnisse:

- Die Frequenzänderungen resonanter, nichtstrukturierter Quarz-Membranen bei Einwirkung eines äußeren Druckes scheinen zu gering zur Realisierung eines Drucksensors mit der gewünschten Empfindlichkeit zu sein. Statt dessen können strukturierte Membranen verwendet werden. Die Geometrie von Silizium- und Quarzmembranen wurde bezüglich der Druckempfindlichkeit optimiert.

- "Design-Regeln" für die Auslegung von Kraftsensoren in "Multi-String"-Anordnung wurden hergeleitet.
- Dreifachbalkenstrukturen aus Silizium erscheinen aufgrund der hohen Schwingungsgüte und Kraftermpfindlichkeit im antisymmetrischen Schwingungsmodus für Sensoranwendungen besonders interessant.

1.3 Experimentelle und technologische Arbeiten

(a) Quarz-Technologie

Es wurde ein Prozeß zum naßchemischen Ätzen von einkristallinem Quarz entwickelt. Dieser Prozeß wurde optimiert bezüglich der Herstellung von Quarzmembranen mit sehr geringer Oberflächenrauigkeit. Zur Herstellung von Balkenstrukturen kann dieser Prozeß ebenfalls eingesetzt werden, für diese Anwendung ist allerdings noch eine Optimierung bezüglich der beidseitigen Justiergenauigkeit und der Konstanz der Ätzparameter erforderlich.

Als mögliches Verfahren zur Strukturierung der Elektroden wurde eine Laser-Methode entwickelt, die es erlaubt, in einem Arbeitsgang maskenlos die vorder- und rückseitigen Cr/Au-Schichten auf dem Quarzsubstrat zu strukturieren.

Zur Tiefenstrukturierung von Quarz mit Hilfe eines Trockenätzprozesses wurden Vorversuche durchgeführt, bei denen sich zeigte, daß noch grundlegende Prozeßentwicklungen notwendig sind. Diese werden zur Zeit mit einer im Rahmen des Projekts angeschafften RIE-Anlage durchgeführt, die seit Januar 1991 betriebsbereit ist.

Da sich bei Versuchen mit Quarzdoppelstimmgabeln herausstellte, daß die Schockfestigkeit für den Einsatz in Ladentischwaagen zu niedrig ist und die FEM-Rechnungen für unstrukturierte Quarzmembranen eine zu geringe Druckempfindlichkeit ergaben, wurde die weitere Entwicklung der Quarztechnologie im Anschluß an das Statusseminar am 4.7.1990 in Balingen zunächst zurückgestellt.

(b) Siliziumnitrid-Technologie

Mit Hilfe eines PECVD-Prozesses wurden dünne Membranen und freitragende Brücken aus Siliziumnitrid als resonante Strukturen hergestellt. Bisher konnte jedoch eine Reproduzierbarkeit der Eigenschaften der Siliziumnitridschichten nicht erreicht werden. Zur Erforschung der Ursachen wurden die inneren Spannungen in den Siliziumnitridschichten untersucht. Dabei wurde ein starker Gradient der inneren Spannungen in der benutzten PECVD-Anlage festgestellt. Als Konsequenz dieses Ergebnisses soll ein neuer Plasmareaktor für 13,56 MHz installiert werden.

(c) Silizium-Technologie

Zur Technologie mikromechanischer Resonatoren auf Silizium-Basis wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Entwicklung von Verfahren zur Messung der Ätztiefe. Die erreichbare Genauigkeit liegt bei einem optischen Verfahren bei einer Standardabweichung von $s=2,5 \mu\text{m}$ bei Ätztiefen bis über $500 \mu\text{m}$.
- Laserbearbeitung von Silizium. Mit Nd:YAG- und Excimer-Lasern wurden Vorversuche zur Mikrostrukturierung von Silizium durchgeführt. Mit dem Laser konnten Justierlöcher für die beidseitige Lithographie erzeugt werden, allerdings konnte die Justiergenauigkeit von Vorder- zu Rückseite nicht unter $15 \mu\text{m}$ gedrückt werden. Weitere Untersuchungen wurden bezüglich des Schneidens von Siliziumwafern und Zungen zur Erzeugung schwingungsfähiger Mikrostrukturen durchgeführt.
- Entwicklung eines Justierverfahrens zur beidseitigen Lithographie mit Hilfe anisotrop geätzter Justiermarken.
- Entwicklung eines Prozesses zur Herstellung dünner Siliziummembranen und deren Strukturierung zur Herstellung schwingungsfähiger Strukturen.
- Entwicklung eines Prozesses zur Herstellung von Silizium-Biegebalken als resonante Kraftsensoren. Beschichtung mit $5 \mu\text{m}$ Zinkoxid und $0,5 \mu\text{m}$ Aluminium als Elektrodenmaterial. In ersten Versuchen gelang es noch nicht, die Biegebalken zu Schwingungen anzuregen, da parasitäre Schichtkurzschlüsse auftraten.

1.4 Aufbau- und Verbindungstechnik

Es wurde ein Arbeitsplatz zum Anodischen Bonden von strukturierten Silizium-Wafern auf Pyrexglas aufgebaut. Zur Prüfung der Dichtigkeit der Bondverbindungen wurde ein Verfahren auf der Basis der Helium-Lecktest-Methode entwickelt.

1.5 Nachweis von Sensoreffekten

- Unter Verwendung eines Impedanz/Gain-Phase-Analysators wurde ein Meßplatz zur Charakterisierung piezoelektrisch angeregter Resonatoren aufgebaut. Erste Messungen wurden an Quarz-Doppelstimmgabeln durchgeführt.
- Unter Verwendung eines Laserstylus wurde ein Meßplatz zur optischen Untersuchung von Resonatoren aufgebaut. Die Anregung erfolgt photothermisch mit einer Laserdiode. An Hand von Untersuchungen an Membranen, Balken und Zungen wurde die Anwendbarkeit dieser Methode demonstriert.
- Mit Hilfe einer Michelson-Interferometer-Meßeinheit an einem Inspektionsmikroskop wurde eine Methode zur experimentellen Bestimmung der Eigenfrequenzen von Siliziumbalken entwickelt. Die Balken werden akustisch zu Schwingungen angeregt.

1.6 Einleitung der Meßgrößen

Es wurde in Anlehnung an handelsübliche Wägezellen ein System zur Einleitung der Kraft in einen stimmungsförmigen Kraftsensor gebaut und getestet. Bei Versuchen zur Schockbelastung zeigte sich, daß bei diesem System so hohe Kräfte auf den Sensor einwirken, daß die eingesetzten Quarzdoppelstimmgabeln zerstört werden. Für die Anwendung von mikromechanischen Strukturen als Kraftsensoren ist daher die Entwicklung eines Krafteinleitungssystems mit Dämpfung erforderlich, oder es müssen Sensorelemente mit erhöhter Belastbarkeit eingesetzt werden.

1.7 Maßnahmen zur Kompensation von Störeinflüssen und zur Kennlinienlinearisierung

Unter Verwendung einer Quarzdoppelstimmgabel wurde eine Wägezelle aufgebaut. Der Linearitätsfehler beträgt ca. 1%. Durch Approximation der Kennlinie mit Hilfe von Tschebyscheff-Polynomen gelang es, den Linearitätsfehler um mehr als zwei Größenordnungen zu reduzieren, so daß die Wägemeßzelle prinzipiell in eichfähigen Waagen, bei denen der maximal zulässige Linearitätsfehler bei 100 ppm liegt, eingesetzt werden kann. Auch der Temperatureinfluß konnte im Bereich von -10 °C bis +40 °C durch Approximation so kompensiert werden, daß der Wägefehler kleiner als 100 ppm bleibt.

2. Meilensteine

Folgende Meilensteine, die zu kritischer Bewertung der erreichten Ziele Anlaß geben sollten (nach 1 bzw. 1,5 Jahren), wurden definiert:

M1: Dynamische FEM-Rechnungen

Dynamische FEM-Rechnungen werden beherrscht und dienen zur Bewertung und Optimierung von Resonatorgeometrien.

M2: Naßchemisch geätzte Quarzstrukturen

Naßchemisch geätzte Quarzstrukturen wurden hergestellt, im Falle von Balkenstrukturen ist noch eine Prozeßoptimierung notwendig.

M3: Krafteinleitung für Kraftsensor

Die entwickelte Krafteinleitung für Kraftsensoren ist prinzipiell geeignet, für Quarzsensoren ohne weitere Dämpfungsmaßnahmen jedoch nicht einsetzbar.

M4: Piezoelektrische Schichten auf Silizium

Zinkoxid-Schichten wurden bei BOSCH auf dünnen Siliziumbalken abgeschieden, eine Anregung jedoch aufgrund von parasitären Strompfaden in der Schicht noch nicht erreicht.

Zur Bewertung der Projektaktivitäten des Hahn-Schickard-Instituts für Mikro- und Informationstechnik bezüglich des Meilensteins M4 muß berücksichtigt werden, daß der bei

Antragstellung vorgesehene Termin für die Inbetriebnahme der technologischen Infrastruktur des Instituts - Ende 1989 - infolge der kommunalpolitischen Vorgänge in Villingen-Schwenningen nicht realisiert werden konnte. Als Übergangslösung bis zur Fertigstellung des Institutsneubaus am neuen Standort hat das Institut eine Reinraumfläche im Forschungszentrum der Siemens AG in Erlangen angemietet. Die dort installierte Mikro-mechanik-Prozeßlinie ist seit Anfang 1991 betriebsbereit, so daß die technologischen Arbeiten nun auf breiter Ebene angegangen werden können.

3. Weiteres Vorgehen

Für das weitere Vorgehen wurden in der Projektleiterbesprechung am 15.2.1991 die folgenden drei Schwerpunkte gesetzt:

■ Silizium-Technologie

Ziel: Piezoelektrisch angeregte Resonatoren in Silizium

Zusammenarbeit: BOSCH, Hahn-Schickard-Institut

Arbeitsschritte:

- Weiterentwicklung des ZnO-Prozesses mit dem Ziel der Kompatibilität mit den Prozessen der Silizium-Mikromechanik und Halbleitertechnologie
- Strukturierung von ZnO mittels photolithographischer Ätztechnik
- Passivierung der ZnO-Schichten
- Herstellung von Strukturen in Silizium mittels naßchemischer und Trockenätztechnik
- FEM-Rechnungen von Si+ZnO-Strukturen
- Charakterisierung der piezoelektrischen Eigenschaften der ZnO-Schichten und Messung der Eigenschwingungen der Resonatoren
- Prüfung der Schockfestigkeit von Siliziumstrukturen als Kraftsensoren (BIZERBA)

■ Quarz-Technologie

Ziel: Herstellung strukturierter Quarzmembranen. Schwingungsanregung von Quarzmembranen.

Zusammenarbeit: MOTO METER, STAIGER, Hahn-Schickard-Institut

■ Andere Anregungsmechanismen

Ziel: Elektromagnetisch oder elektrothermisch angeregte Kraftsensoren

Zusammenarbeit: BIZERBA, STAIGER, Hahn-Schickard-Institut

Sollte eine Realisierung von Kraftsensoren für Ladentischwaagen auch in Silizium wegen unzureichender Schockfestigkeit nicht möglich sein, so will BIZERBA langfri-

stig auf Resonator-Strukturen auf metallischer Basis ausweichen; Geometrie, Abmessungen und Fertigungstechniken sind ähnlich wie bei den bisher verfolgten Quarzstrukturen. Zur Anregung einer solchen Struktur - aber auch zur Anregung von Siliziumstrukturen - kommen neben dem piezoelektrischen Effekt die elektromagnetische oder elektrothermische Anregung in Betracht. Diese Möglichkeiten sollen sowohl theoretisch wie auch praktisch auf ihre Anwendbarkeit untersucht werden. Zusätzlich sollen in einer theoretischen Studie weitere Anregungs- und Sensorprinzipien evaluiert werden.

Villingen-Schwenningen, den 28.3.1991

S. Büttgenbach

Dr.S.Büttgenbach
Projekt-Koordinator