

**Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.**

**Zwischenbericht**

**über die Durchführung und den Stand des Verbundvorhabens**

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

**- Förderungskennzeichen: 13 AS 0114 -**

**Berichtszeitraum: 1.7.1989 - 31.12.1989**

**Projektleiter: Dipl.-Phys. H.-J. Wagner**

**Zwischenbericht**  
**über die Durchführung und den Stand des Verbundvorhabens**  
**"Einsatz der Mikromechanik**  
**zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren"**  
**-Förderungskennzeichen: 13 AS 0114-**

(Berichtszeitraum 1.7.89 - 31.12.89)

Für den Berichtszeitraum sind folgende Arbeitsschwerpunkte gesetzt worden:

**a) Patent- und Literaturrecherche**

Eine ausführliche Literaturrecherche mit den Suchbegriffen "Ätzen von Quarz" sowie "Mikromechanik" (allg.) wurde durchgeführt. Im Rahmen der Dokumentation und Literaturerfassung des Instituts für Mikrotechnik in Villingen-Schwenningen wurden Literaturrecherchen zum Thema "frequenzanaloge Sensoren" in den relevanten Zeitschriften durchgeführt. Eine gezielte Patentrecherche im Landesgewerbeamt Stuttgart zum Suchbegriff "Resonator-Kraftsensor" ermittelte die auf diesem Gebiet bestehenden Patentanmeldungen. Die Recherchen werden laufend aktualisiert und ergänzt.

**b) Festlegung der Entwicklungsziele und Erarbeitung der Funktionsprinzipien**

Die Entwicklungsziele des Instituts sind:

- Kraftsensor in "Multi-string"-Anordnung auf der Basis von Silizium. Zur Resonatoranregung ist eine Beschichtung mit piezoelektrischen ZnO- Schichten vorgesehen. Der Sputterprozeß zur Erzeugung dieser ZnO- Schichten wird im Rahmen des Vorhabens entwickelt.
- Drucksensor auf der Basis von einkristallinen Quarzmembranen. Entwicklung von Bondtechnologien für Membranen. Dreidimensionale Tiefenstrukturierung der Quarzform durch Trockenätzprozesse.

Die Funktionsprinzipien werden durch analytische Berechnungen und FEM- Berechnungen bzw. durch FEM- Simulationen ermittelt.

**c) An experimentellen Vorarbeiten wurden im Berichtszeitraum folgende Arbeiten durchgeführt:**

f) Aufbau- und Verbindungstechnik

Durchgeführt wurde:

- Anodisches Bonden von strukturierten Silizium-Wafern auf Pyrexglas.

Eine Untersuchung der Dichtigkeit von Anodischen Bondverbindungen mittels der Helium-Lecktest- Methode ist Gegenstand der laufenden Untersuchungen.

Zur kritischen Betrachtung des aktuellen Stands des Verbundvorhabens und der erreichten Zwischenziele stehen am 1.7.90 als "Meilensteine" an:

- 1.) Dynamische FEM- Berechnungen
- 2.) Naßchemisch geätzte Quarzstrukturen.

2/90 Wa

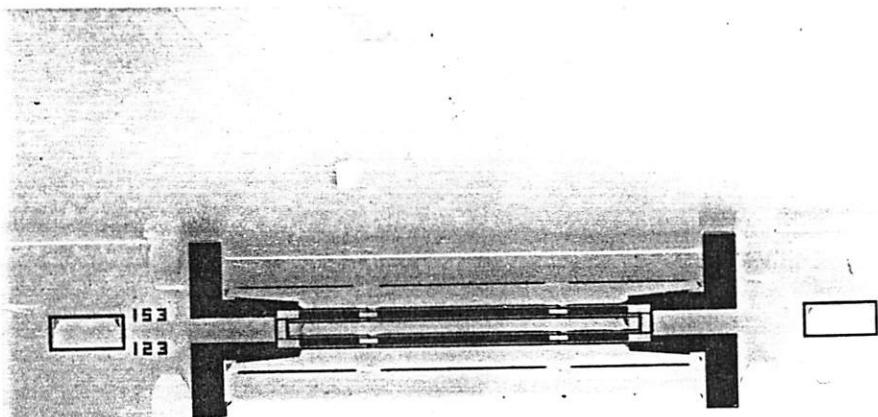


Abb. 1: Doppelstimmgabel-Kraftsensor mit Verstärkungsstegen  
der Fa. ETA, Grenchen/Schweiz

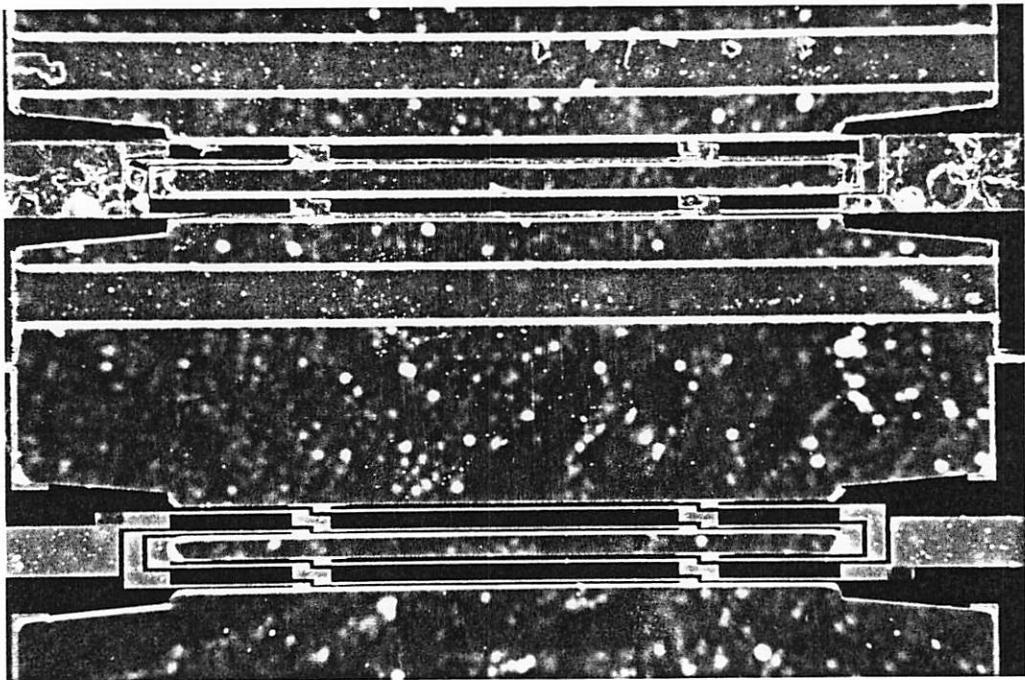


Abb. 2: Im Rahmen des Projekts hergestellte Doppelstimmgabel  
(im Bild oben). Zum Vergleich ist im Bild unten eine  
Doppelstimmgabel der Fa. ETA abgebildet.

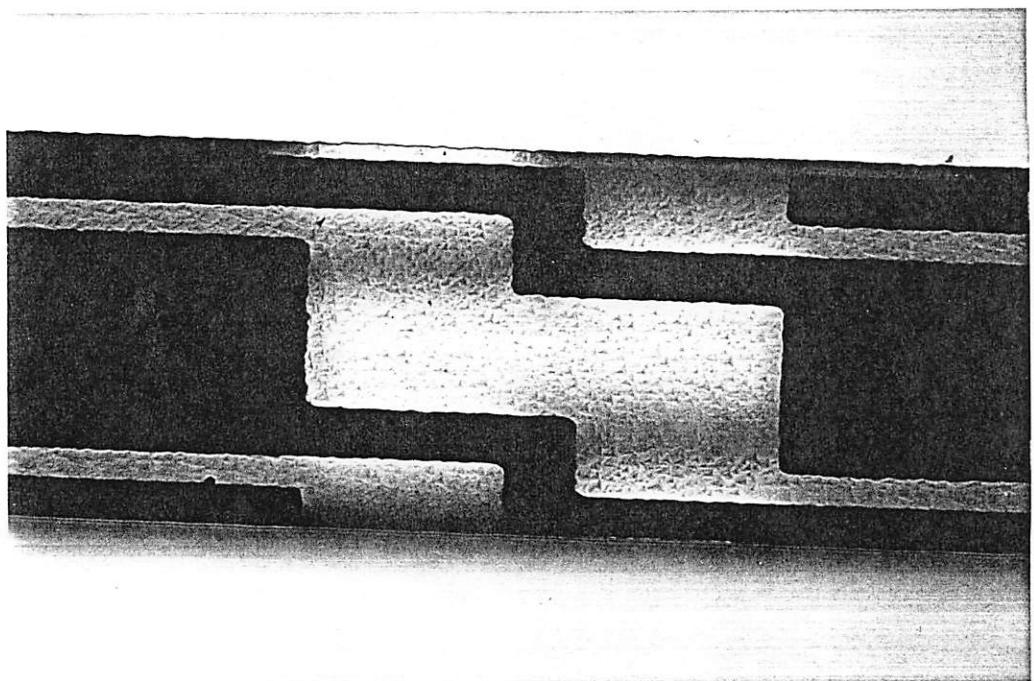


Abb. 3 a): Elektrodenkonfiguration auf den Quarzresonatorstegen.  
Fokussiert wurde hier auf die obenliegende  
Chrom/Gold- Metallisierungsschicht auf dem  
Resonatorsteg.

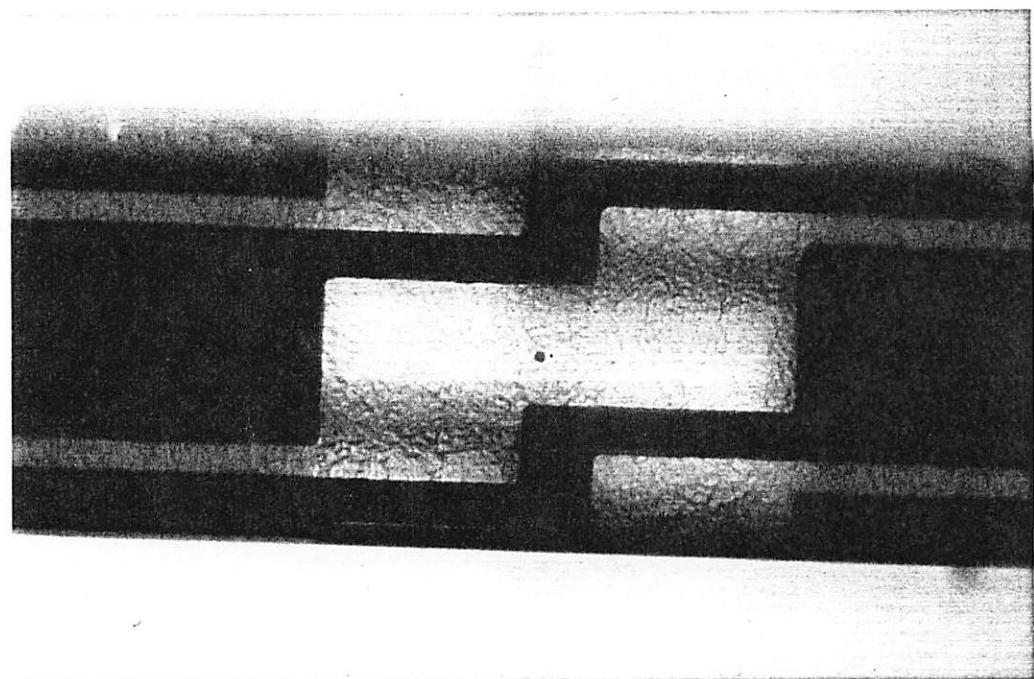


Abb. 3 b): Elektrodenkonfiguration auf den Quarzresonatorstegen.  
Fokussiert wurde hier auf die untenliegende  
Chrom/Gold- Metallisierungsschicht auf dem  
Resonatorsteg

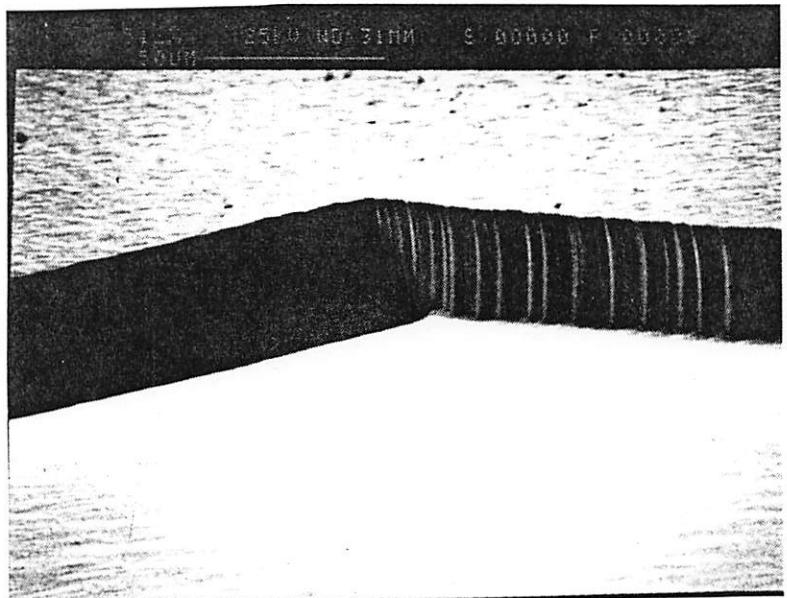


Abb. 4: REM- Aufnahme einer Quarzmembran.  
Der Bildausschnitt zeigt eine Ecke des quadratischen  
Rahmens mit anisotrop geätzten Seitenwänden.

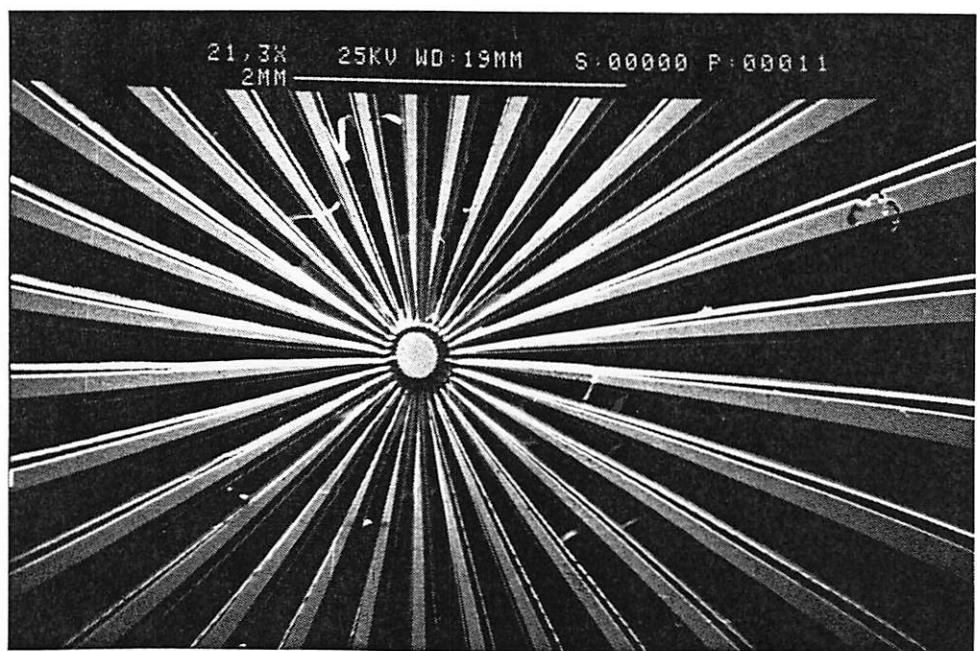


Abb. 5: Wagon Wheel- Ätzstruktur in einkristallinem Quarz.  
Die Anisotropie der richtungsabhängigen Ätzraten ist  
in der Bildmitte zu sehen.

## SILIZIUMSTRUKTUREN ALS FREQUENZANALOGE SENSOREN

### **Stand der geleisteten technologischen Untersuchungen.**

Zur Strukturierung von (001)-orientierten Siliziumscheiben mittels anisotropem Tiefenätzen in KOH-Lösungen wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:

- \* Herstellung von V-Gruben
- \* Herstellung von dünnen Silizium-Membranen ohne die Verwendung von Ätzstoppverfahren
- \* Aufbau einer Apparatur zum elektrochemischen Ätzstopp und erste Untersuchungen
- \* Versuche zur beidseitigen Lithographie
- \* Herstellung von Gräben mit senkrechten Wänden
- \* Herstellung von einfachen Sensorstrukturen

Des weiteren wurden erste Erfahrungen im anodischen Bonden von Silizium auf Borosilikatglas gewonnen.

Es folgt eine Beschreibung unserer Versuche zur beidseitigen Lithographie, der Herstellung von Gräben mit senkrechten Wänden, sowie aus deren Kombination die Verwirklichung von einfachen schwingfähigen Grundstrukturen für frequenzanaloge Siliziumsensoren, wie Membranen oder Balken.

### **Versuche zur beidseitigen Lithographie.**

Zur Realisierung von freistehenden Siliziumstrukturen ist die beidseitige Lithographie zur deckungsgleichen Strukturierung von beiden Waferseiten aus unerlässlich. Ein zu diesem Zweck eingerichteter Maskaligner steht uns derzeit noch nicht zur Verfügung, so daß auf provisorische Hilfsmaßnahmen zurückgegriffen werden muß, die erste Untersuchungen zur beidseitigen Strukturierung ermöglichen. Jedoch müssen Einbußen in der IC-Kompatibilität sowie in der Deckungsgleichheit der beiden Masken in Kauf genommen werden.

Der Prozeß der beidseitigen Lithographie wird in zwei Schritten durchgeführt:

- a) Herstellung von geeigneten Justiermarken in der Nähe des Waferrandes, die von beiden Waferseiten aus zu erkennen sind.
- b) Ausrichten der die eigentlichen Sensorstrukturen enthaltenden Masken mit Hilfe der Justiermarken.

Im folgenden wird ein Verfahren zur Herstellung von Justiermarken beschrieben.

Als Justiermarken dienen durchgehende Löcher, deren Herstellung anhand von Abb. 1 veranschaulicht werden soll. Parallel bzw. senkrecht zur (110)-Richtung (Waferflat) werden in der SiO<sub>2</sub>-Maskierschicht auf beiden Waferseiten Fenster geöffnet, so daß beim anschließenden anisotropen Ätzen mit wässriger KOH-Lösung V-Gräben entstehen, deren Tiefe etwas mehr als die halbe Waferdicke betragen muß. Die V-Gräben der Vorder- und Rückseite sind gegeneinander um 90° versetzt angeordnet, so daß an deren Kreuzungspunkt eine quadratische Öffnung entsteht. Die Abb. 2 zeigt in einer mikroskopischen Aufnahme einen geätzten V-Grab mit einer Breite von 290 µm an der Oberseite und einer quadratischen Öffnung mit einer Kantenlänge von 30 µm. Die Tiefe des Grabens beträgt 190 µm.

Mit Hilfe der Masken nach Abb. 3a und 3b werden insgesamt acht durchgehende Löcher in der oben beschriebenen Weise erzeugt. Die Position der Löcher läßt sich durch Übereinanderlegen der Masken nach Abb. 3c erkennen. Die am Waferrand zusätzlich angebrachten Justiermarken dienen der exakten Ausrichtung der Justiermasken zum Waferflat. Dies ist besonders für die Justiermaske 2 erforderlich, da diese die Information der Flatorientierung enthält.

Das oben beschriebene Verfahren der Herstellung von Justiermarken zur beidseitigen Lithographie besitzt die folgenden Eigenschaften:

- a) Die Genauigkeit der Position der quadratischen Öffnungen wird durch die Genauigkeiten des Lithographieprozesses und des Ätzprozesses bestimmt. Während die Genauigkeit des Lithographieprozesses bei wenigen Mikrometern liegt, kann davon ausgegangen werden, daß die Genauigkeit des Ätzprozesses im selben Bereich liegt, da hier ausschließlich gut definierte (111)- bzw. (100)-Ebenen die Berandung der quadratischen Öffnung bilden. Fehlerhafte Justiermarken verraten sich durch zu groß geratene Öffnungen.
- b) Die auf diese Weise erzeugten Justiergruben werden nach genügend großer Ätzdauer nur noch von langsam ätzenden (111)-Ebenen begrenzt, so daß beim Ätzen der Sensorstrukturen keine Beeinträchtigung dieser Strukturen durch die Justiergruben auftritt.

#### Herstellung von Gräben mit senkrechten Wänden.

In (001)-Siliziumscheiben lassen sich mit Hilfe von KOH-Ätzlösungen Gräben herstellen, die durch senkrecht zur Scheibenoberfläche stehende Wände begrenzt sind. Dazu ist es erforderlich, die Maske parallel zur (100)-Richtung, d.h. 45° zum (110)-Waferflat auszurichten. In Abb. 4 ist eine derartige Maske sowie die entstehende Ätzgrube schematisch dargestellt. Die seitlich begrenzenden Wände und der Grubenboden sind (100)-Ebenen bzw. kristallografisch gleichwertige Ebenen mit entsprechend identischen Ätzraten. Dies hat zur Folge, daß die Unterätzung der Maske mit der Tiefe der Ätzgrube übereinstimmt. Das bedeutet, daß sich die entstehenden Ätzgruben mindestens doppelt so breit wie tief ausbilden. Mit bestimmten Ätzparametern lassen sich auf diese Weise Ätzgruben mit außergewöhnlich glatten Oberflächen erzielen. Die Abb. 5 zeigt

eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Teststruktur, bei der sich senkrecht stehende (100)-Wände ausbildeten. Die SiO<sub>2</sub>-Maskierschicht wurde bei dieser Aufnahme entfernt.

### Grundstrukturen für frequenzanaloge Siliziumsensoren.

In Anwendung der oben angegebenen Methode sind in Abb. 6a bzw. 6b zwei mögliche mikromechanische Grundstrukturen skizziert, die sich in Kombination der Herstellung von Gräben mit senkrechten Wänden und der beidseitigen Lithographie ausbilden.

Gemäß Abb. 6a wurden Membranen mit einer Dicke von etwa 20 µm ohne die Zuhilfenahme von Ätzstopptechniken hergestellt. Die Abb. 7 zeigt eine mikroskopische Aufnahme einer Membran, die von zwei Seiten von (100)-Ebenen begrenzt wird (im Bild senkrecht stehend), und die mittels beidseitiger Lithographie hergestellt wurde. Durch rückseitige Beleuchtung wird die optische Transparenz des Siliziums sichtbar. Die Abb. 8 zeigt ebenfalls eine dünne Siliziummembran mit einer Dicke von etwa 20 µm, die allerdings von (111)-Wänden begrenzt wird und ebenfalls von beiden Waferseiten aus geätzt wurde. Die Oberflächenqualität der geätzten Membran nach Abb. 8 kann anhand der Abb. 9 qualitativ beurteilt werden. Die Aufnahme wurde mit Hilfe eines Michelson-Interferometers bei Beleuchtung mit einer breitbandigen Lichtquelle (Glühlampe) hergestellt. Der Abstand zweier Linien entspricht hierbei einer Höhendifferenz von der halben Lichtwellenlänge, so daß die Oberflächenrauhigkeit bzw. Gleichmäßigkeit der Membrandicke (auch am Membranrand) im der Größenordnung von 100 nm liegen. Die Ätztiefe beträgt 180 µm.

### Zukünftige Untersuchungen.

Die zukünftigen Arbeiten liegen in der Weiterentwicklung der Technik des elektrochemischen Ätzstopps. Dies beinhaltet die Herstellung von pn-Schichten mittels Diffusion, sowie die Fertigung von einfachen schwingfähigen Siliziummembranstrukturen wie Balken, Zungen oder Stimmgabeln. Weiterhin wird die Entwicklung von piezoelektrischen Zinkoxydschichten vorangetrieben. Erste Untersuchungen zum Silicon-Direct-Bonding werden folgen.

A. Schumacher 02/90

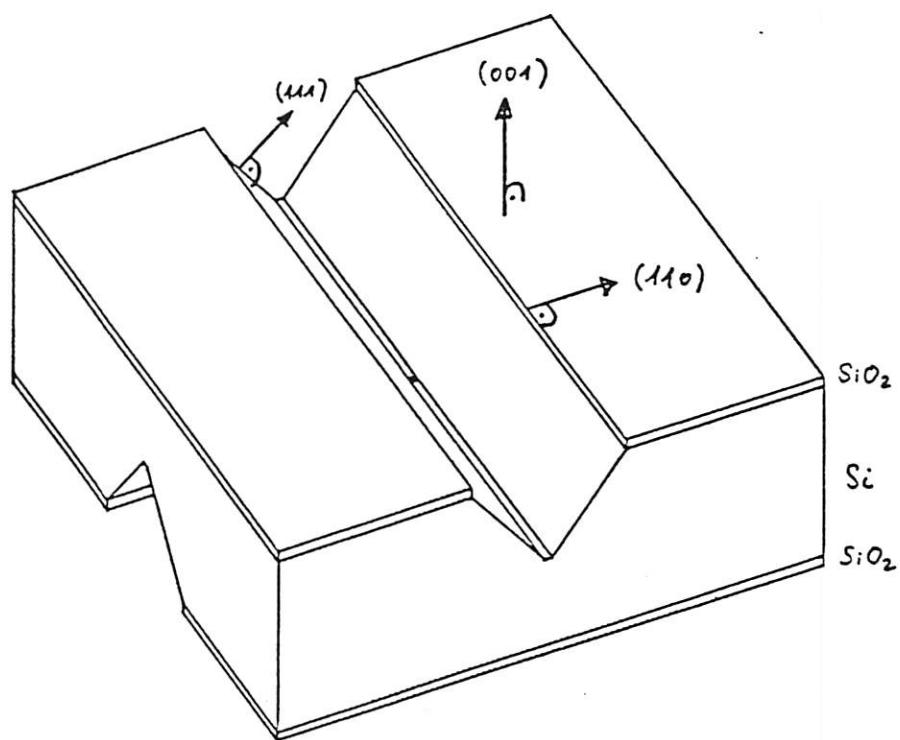


Abb. 1: Herstellungsprinzip eines quadratischen Lochs in (001)-Silizium mittels anisotrop geätzten V-Gräben als Justierhilfe bei der beidseitigen Lithographie.

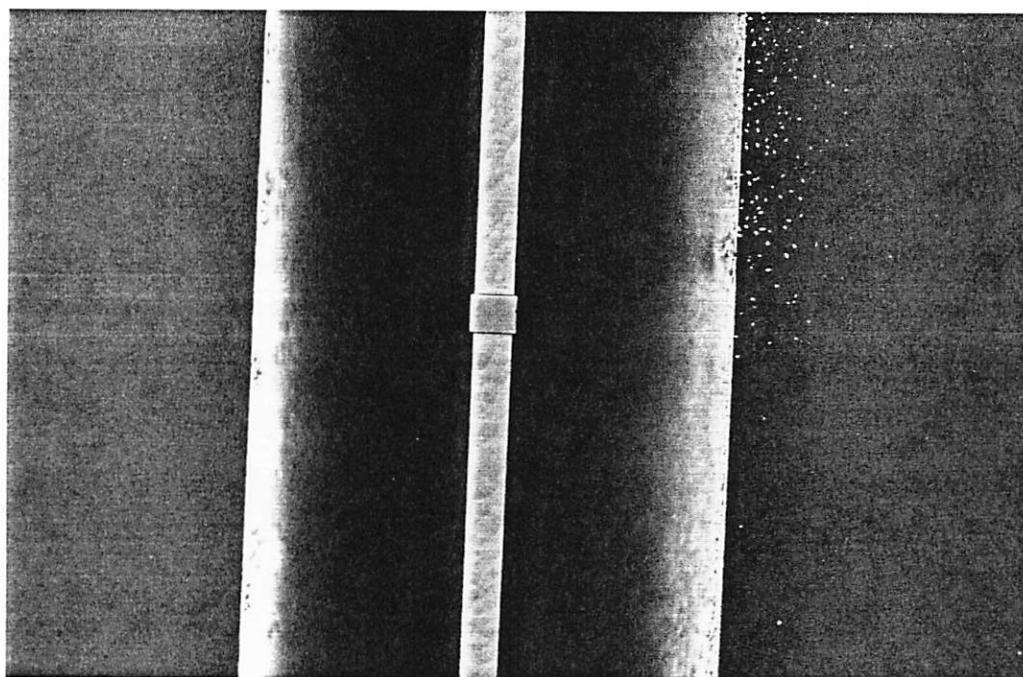


Abb. 2: Mikroskopische Aufnahme eines quadratischen Lochs in (001)-Silizium (Bildmitte), hergestellt nach dem Prinzip von Abb. 1. Die Breite des V-Grabens an der Oberseite beträgt 290  $\mu\text{m}$ , die Kantenlänge des Lochs 30  $\mu\text{m}$ .

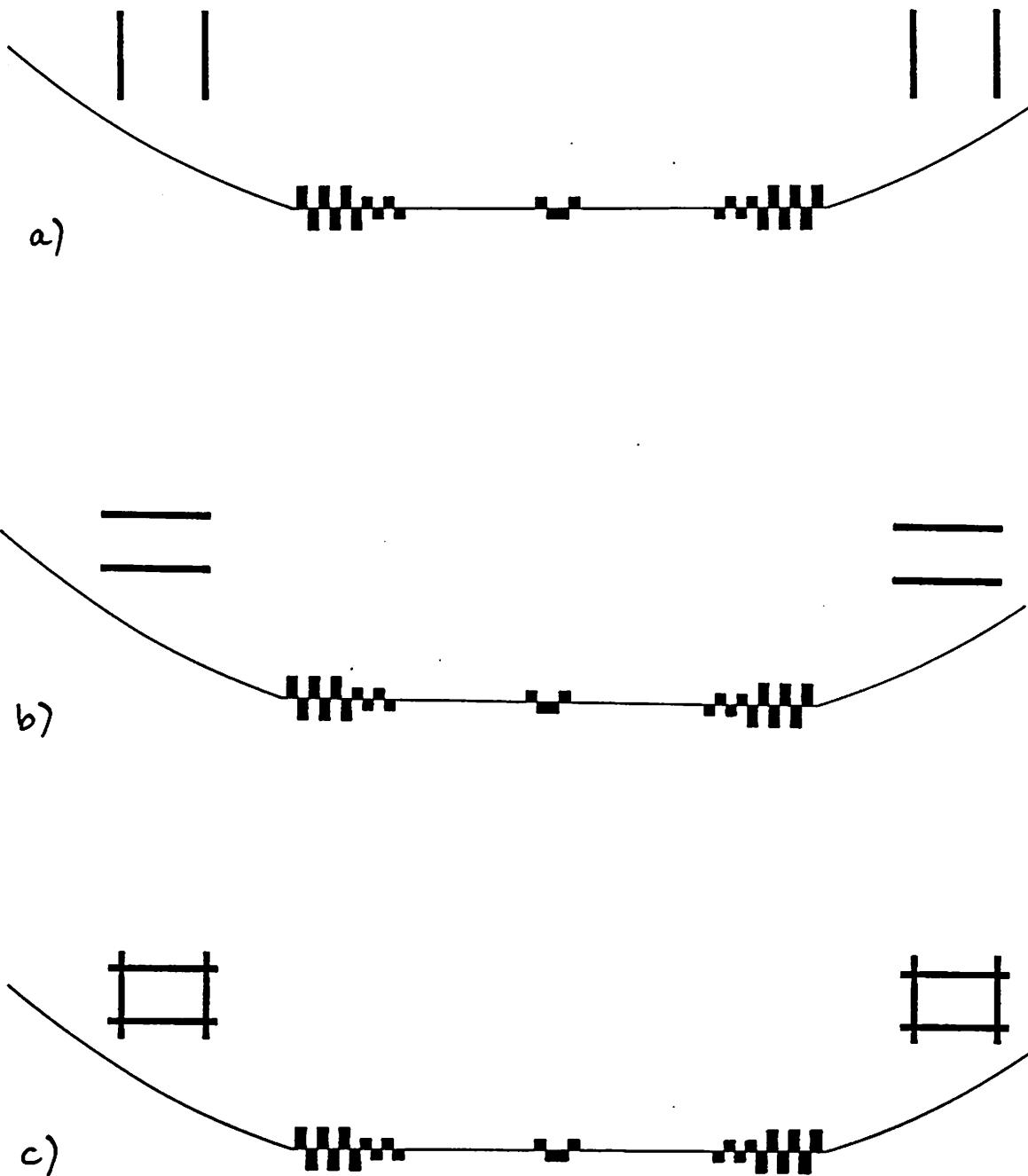


Abb. 3: Masken zur Herstellung von V-Gräben.  
a) Maske 1 (Vorderseite),  
b) Maske 2 (Rückseite),  
c) Überlagerung der Masken 1 + 2 und Position der  
entstehenden acht Löcher (Kreuzungspunkte der V-Gräben).  
Ein Teil des Waferrandes und der Waferflat sind skizziert.

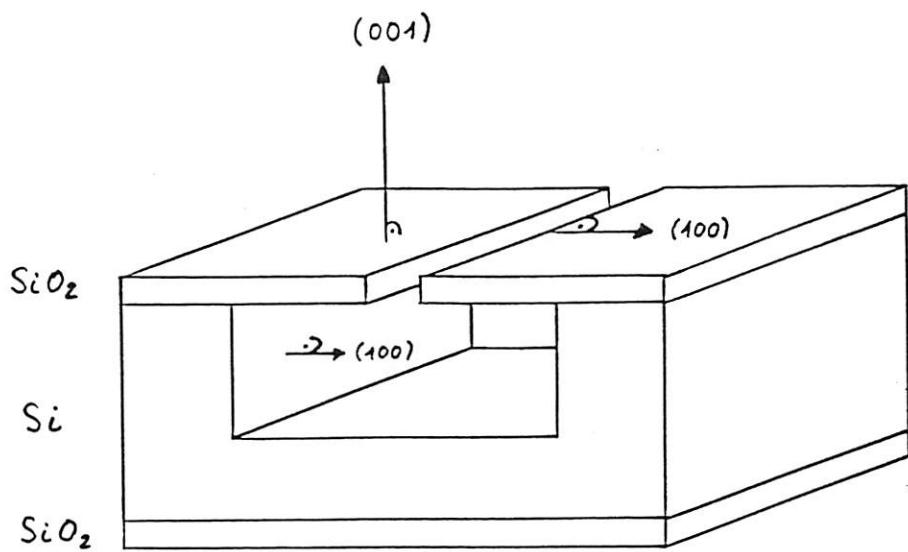


Abb. 4: Herstellungsprinzip einer anisotrop geätzten Grube mit senkrechten Wänden.

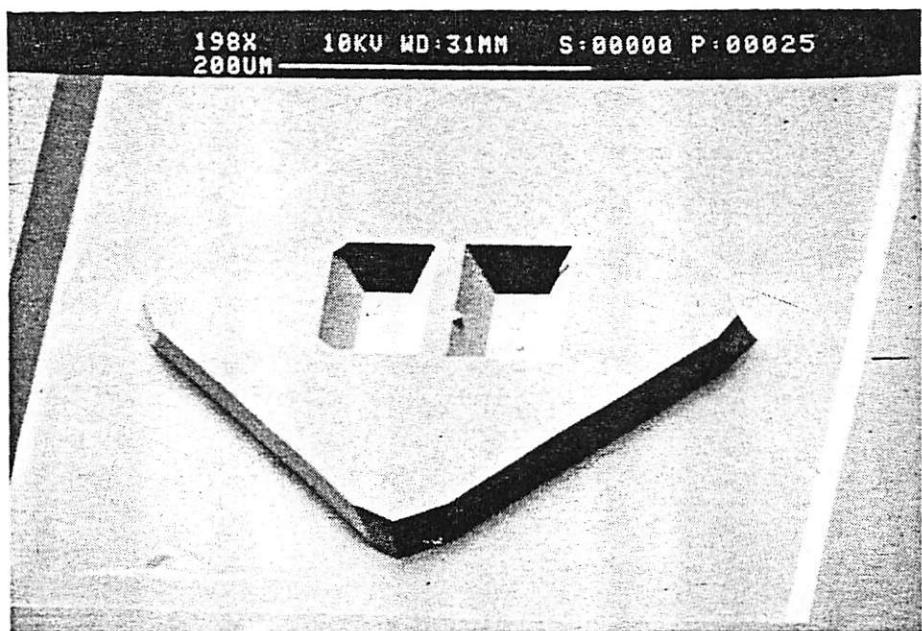
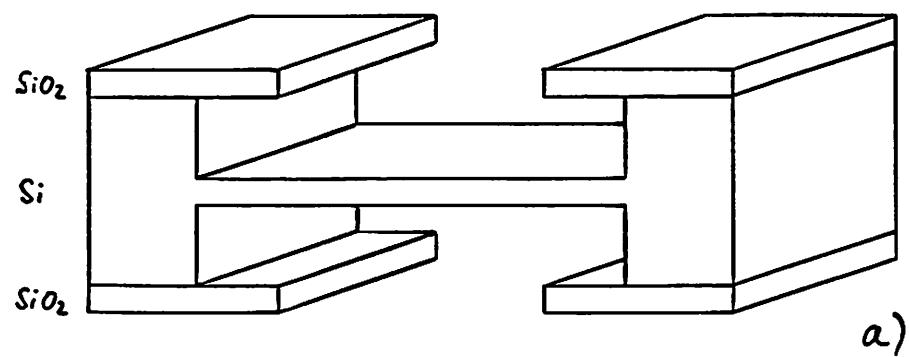
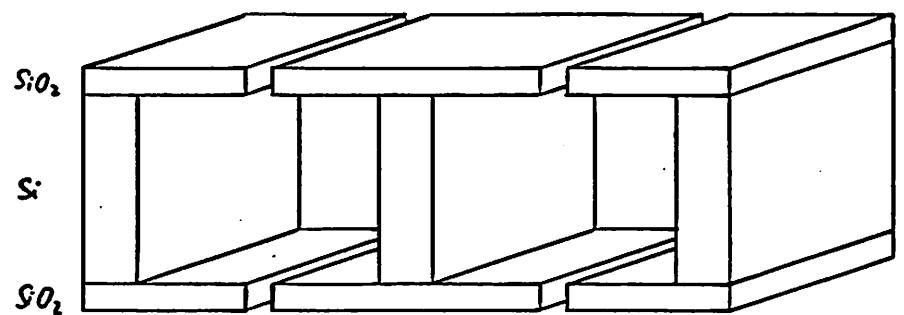


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Teststruktur mit senkrecht zur Waferoberfläche stehenden Wänden. Die SiO<sub>2</sub>-Maskierschicht wurde vor der Aufnahme entfernt.



a)



b)

Abb. 6: Beispiele für mögliche Sensorstrukturen unter Verwendung von Ätzgruben mit senkrechten Wänden:  
a) Membranstrukturen,  
b) Balkenstrukturen.

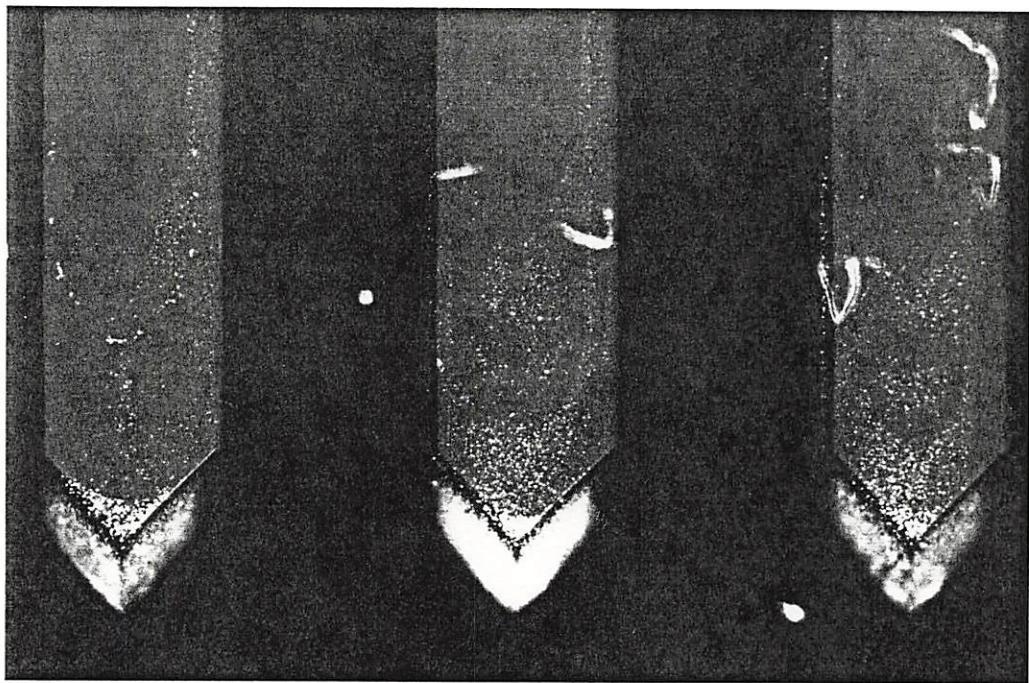


Abb. 7: Siliziummembran, hergestellt mittels beidseitiger Lithographie und senkrechten Wänden (im Bild senkrecht stehend). Durch rückwärtige Beleuchtung wird die Transparenz der Membran sichtbar. Die Membrandicke beträgt 20 µm, ihre Breite 460 µm.

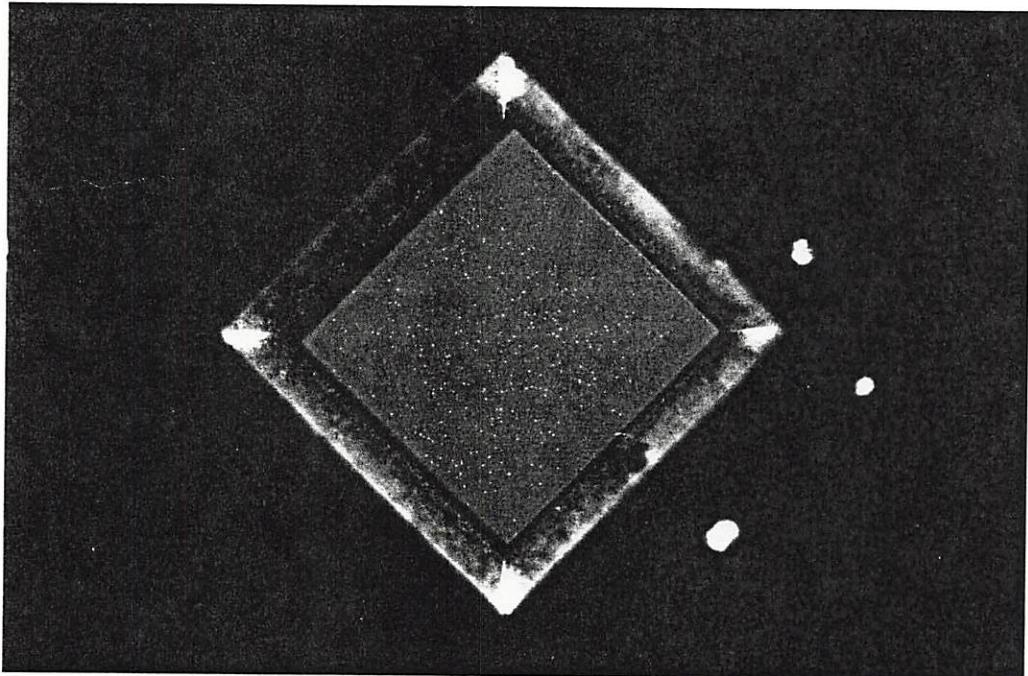


Abb. 8: Siliziummembran, hergestellt mittels beidseitiger Lithographie. Die seitlich begrenzenden Ebenen liegen in (111)-Richtung. Die Beleuchtung und Membrandicke sind wie bei Abb. 7. Die Kantenlänge der Membran beträgt 740 µm.

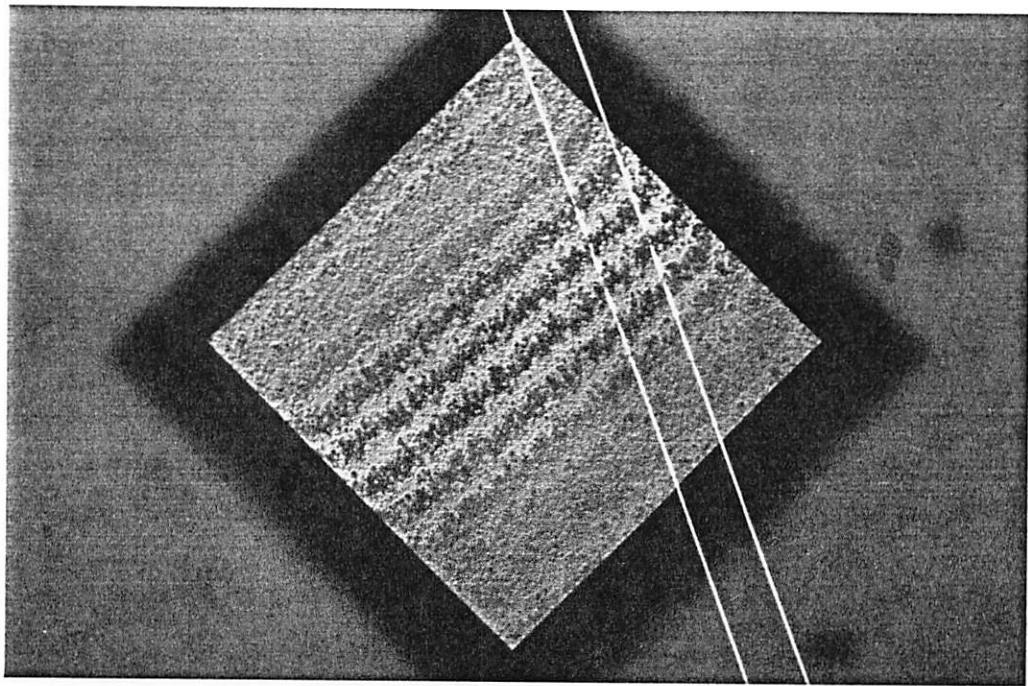


Abb. 9: Aufnahme der Membran in Abb. 8 mit Hilfe eines Michelson-  
Interferometers.

## Finite-Elemente Berechnungen für frequenzanaloge Sensoren

### **Patent- und Literaturrecherche: (Arbeitspunkt a.)**

Im Berichtszeitraum wurden mehrere Literaturrecherchen durchgeführt und die gefundenen Veröffentlichungen (114 Stk.) in einer Datenbank zusammengefaßt und ausgewertet. Bei den Recherchen wurden folgende Suchbegriffe verwendet:

- Finite-Elemente Berechnungen an Sensoren
- Dynamische FEM-Berechnungen an resonanten Systemen  
(Stimmgabeln, Doppelstimmgabeln, Membranen)
- Resonante, frequenzanaloge Sensorsysteme
- Piezoelektrische FEM-Simulationsrechnungen
- Materialdaten: Quarz, Silizium, Zinkoxid

Die zur Modellierung der Sensoren benötigten Materialdaten (Elastizitätskoeffizienten, piezoelektrische Konstanten, etc.) wurden zusammengetragen und in einer EDV-gestützten Datenbank zur späteren Kopplung mit dem Finite-Elemente Programm abgelegt.

### **Theoretische Grundlagen: (Arbeitspunkt e.)**

Die Modellierung der Eigenschaften der zu entwickelnden frequenzanalogen Sensoren soll mit Hilfe der Finite-Elemente Methode erfolgen. Hierzu wurde das kommerzielle FEM-Programmpaket ANSYS ausgewählt, das es gestattet, neben statischen und dynamischen Strukturberechnungen auch die Kopplung verschiedener Felder (Piezoelektrizität, Wärme-Struktur, Elektro-Magnetismus) mit zu berücksichtigen.

Zur Einarbeitung in das Programm einerseits und zum Kennenlernen der Methode der Finiten Elemente andererseits wurde ein bereits bekanntes Problem ausgewählt, sodaß eine Verifikation der Ergebnisse möglich war. Es handelt sich hierbei um den kommerziell

erhältlichen Quarz-Kraftsensor der Fa. ETA-ASULAB S.A. in Grenchen/CH auf der Basis einer Doppelstimmgabel. Neben den Sensorspezifikationen des Herstellers standen die Ergebnisse eigener Messungen, die bei der Fa. BIZERBA durchgeführt wurden, zur Verfügung. Es wurden verschiedene FEM-Berechnungen durchgeführt und die Ergebnisse mit den theoretischen und experimentellen Angaben verglichen.

Ziel war es im ersten Schritt, mit Hilfe dynamischer Rechnungen (Modalanalyse) die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen des Kraftsensors zu berechnen. Im zweiten Schritt sollte die Kraft-Frequenz-Kennlinie (Kraftempfindlichkeit) des Sensors verifiziert werden. Hierzu wurden verschieden komplexe FE-Modelle erstellt, in denen die Elementvernetzung, die Randbedingungen (Einspannung) und die Materialparameter variiert wurden, um den Einfluß der Modellparameter zu studieren. Zur Vereinfachung der Rechnungen und Einsparung von Rechenzeit wurde ein zweidimensionales Modell mit isotropem Materialverhalten gewählt.

Abhängig von der Geometrie des Kraftsensors, Doppelstimmgabel mit (DETF4, siehe Bild 1) bzw. ohne Verstärkungsstege (DETF2, siehe Bild 2), ergaben sich wie erwartet verschiedene Eigenschwingungsformen. Im Eigenschwingungsmodus, in dem die Doppelstimmgabel als Kraftsensor betrieben wird, schwingen die Stimmgabelstege gegeneinander, sodaß keine Momente auf die Befestigungen übertragen werden. Dieses entspricht dem 2. Eigenmode bzw. dem 4. Eigenmode der jeweiligen Stimmgabelgeometrie (DETF2 bzw. DETF4) und ist aus den Bildern 3 und 4 im Anhang gut ersichtlich. Farbig sind die Verschiebungen UY der Stimmgabeln in vertikaler Richtung dargestellt. In der untersten Darstellung in Bild 4, dieses entspricht der 5. Eigenschwingungsform der DETF2-Stimmgabel, sind die Verschiebungen UX in horizontaler Richtung dargestellt. Man sieht hier deutlich, wie bei höheren Schwingungsmoden zunehmend Momente auf die Stimmgabelbefestigungen übertragen werden, was zu einer erhöhten Dämpfung dieser Schwingungsmoden führt.

Bei der Ermittlung der Eigenfrequenzen des Kraftsensors konnte

trotz der Einfachheit des FE-Modells eine gute Übereinstimmung mit den veröffentlichten (ETA-ASULAB S.A.) und den gemessenen Werten (Fa. BIZERBA) erzielt werden. Die Eigenfrequenz des zweiten Schwingungsmodes betrug bei der DETF2-Stimmgabelgeometrie 47.9 kHz, was einer Abweichung von ca. 2% entspricht. In Bild 5 ist die Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von der Wahl des FE-Modells dargestellt. Mit zunehmender Verfeinerung des Elementnetzes (Reduzierung der Elementgröße, Verwendung von Elementen mit mehreren Knoten) konvergieren die Eigenfrequenzen infolge der Abnahme der Gesamtstruktursteifigkeit wie erwartet von oben gegen die wahren Werte.

Bei der Berechnung der Kraft-Frequenz-Kennlinie wurde der Sensor gemäß seiner Spezifikation (max. 10 N) mit einer Zugkraft in x-Richtung beaufschlagt. Die Rechnungen wurden in Schrittweiten von 1 N durchgeführt. Die gemittelten Spannungszustände im Sensor sind für die maximale Belastung von 10 N in Bild 6 und vergrößert in Bild 7 dargestellt. Die Spannungen SX in x-Richtung sind entlang der beiden Stimmgabelstege, die in y-Richtung SY sind an der Stelle der rechten Befestigung maximal. Die maximalen Verschiebungen (UX, UY) in x- bzw. y-Richtung infolge der Krafteinwirkung sind in Bild 8 dargestellt und betragen ca. 2  $\mu\text{m}$  bzw. 0.12  $\mu\text{m}$ .

Der lineare Verlauf der Eigenfrequenzerhöhung (Bild 9) konnte gezeigt werden. Abhängig von der Wahl des FE-Modells (Anzahl der Knoten und Elemente, Art der Krafteinleitung) konnte die Kraftempfindlichkeit zu 0.178 - 0.180 %/N berechnet werden. Die experimentellen Messungen ergaben 0.142, die theoretischen Werte lagen bei 0.137 %/N.

Die durchgeführten Rechnungen zeigen, daß der Kraftsensor unter den stark vereinfachten Annahmen qualitativ gut beschrieben wird und die Methode der Finiten-Elemente zu seiner Berechnung gut geeignet erscheint. Sollen die Eigenschaften des Sensors jedoch quantitativ erfaßt werden, so wird ein entsprechend größerer Modellieraufwand notwendig. Dieses soll Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein.

**Zukünftige Arbeiten:**

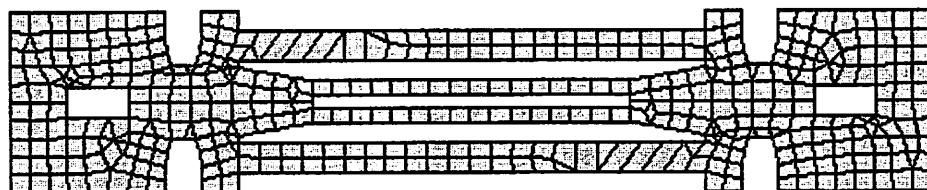
- Verfeinerung der Finite-Elemente Modelle:
  - \* dreidimensionale Modellierung
  - \* Berücksichtigung der Materialanisotropie
  - \* Verwendung piezoelektrischer Elemente
- Variieren der Geometrieverhältnisse und Untersuchung verschiedener Quarzsprungertypen
- Modellierung frequenzanaloger Kraftsensoren auf Silizium-Basis mit piezoelektrischer Anregung durch dünne ZnO-Schichten
- Optimierung von Strukturgeometrie und Elektrodenformen der Silizium-Schwinger

Anlagen: Bildschirmausdrucke der FE-Rechnungen

**ANHANG:**

- Bild 1:** Vernetzte Doppelstimmgabelstruktur mit Verstärkungsstegen (DETF4) und FE-Modellparameter
- Bild 2:** Vernetzte Doppelstimmgabelstruktur ohne Verstärkungsstege (DETF2) und FE-Modellparameter
- Bild 3:** Die fünf ersten Eigenschwingungsformen der DETF4-Doppelstimmgabelstruktur
- Bild 4:** Die fünf ersten Eigenschwingungsformen der DETF2-Doppelstimmgabelstruktur
- Bild 5:** Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von der Wahl des FE-Modells
- Bild 6:** Spannungszustände ( $S_x$ ,  $S_y$ ) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel
- Bild 7:** Vergrößerte Darstellung der Spannungszustände  $S_x$  und  $S_y$
- Bild 8:** Verschiebungen ( $U_x$ ,  $U_y$ ) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel
- Bild 9:** Kraft-Frequenz-Kennlinie der Doppelstimmgabel DETF2

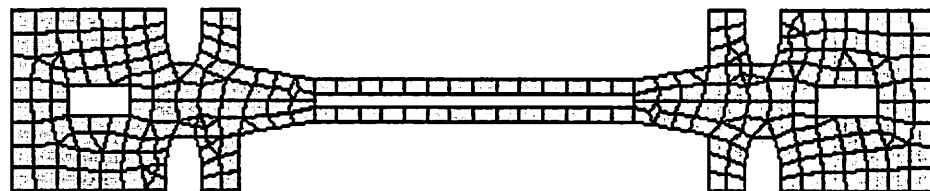
**Bild 1:** Vernetzte Doppelstimmgabelstruktur mit Verstärkungsstegen (DETF4) und FE-Modellparameter



**FE-Modellparameter:**

Modell:	DETF4	
Material:	Quarz	
Dichte:	2.65 [g/cm <sup>3</sup> ]	
E-Modul:	0.89*10 <sup>11</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	
Poissonzahl:	0.123	(Querkontraktion)
Abmessungen:	15.000 [mm]	(Gesamtlänge)
	2.878 [mm]	(Gesamtbreite)
	0.125 [mm]	(Strukturdicke)
Stimmgabel:	0.480 [mm]	(Breite der Verstärkung)
	0.240 [mm]	(Breite der Schwinger)
Element:	isoparametrisches 2D-Plattenelement mit 4 Knoten (STIF42), bzw. 8 Knoten (STIF82)	
Elementgröße:	0.35 [mm]	
Elemente:	420	
Knoten:	544	
Freih.-grade:	218	(MDOF=Master Degrees of Freedom)

**Bild 2:** Vernetzte Doppelstimmgabelstruktur ohne Verstärkungsstege (DETF2) und FE-Modellparameter



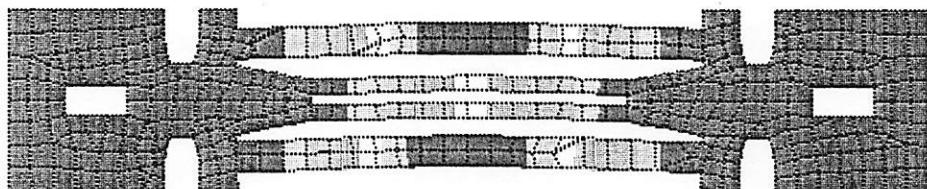
**FE-Modellparameter:**

Modell: DETF2  
Material: Quarz  
Dichte: 2.65 [g/cm<sup>3</sup>]  
E-Modul: 0.89\*10<sup>11</sup> [N/mm<sup>2</sup>]  
Poissonzahl: 0.123 (Querkontraktion)  
  
Abmessungen: 15.000 [mm] (Gesamtlänge)  
              2.878 [mm] (Gesamtbreite)  
              0.125 [mm] (Strukturdicke)  
Stimmgabel: 0.240 [mm] (Breite der Schwinger)  
  
Element: isoparametrisches 2D-Plattenelement mit 4 Knoten (STIF42), bzw. 8 Knoten (STIF82)  
Elementgröße: 0.4 [mm]  
Elemente: 276  
Knoten: 356  
Freih.-grade: 194 (MDOF=Master Degrees of Freedom)

Bild 3: Die fünf ersten Eigenschwingungsformen der DETF4-Doppelstimmgabelstruktur

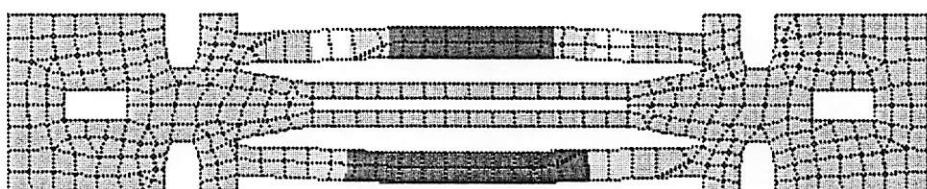
[kHz]

1.



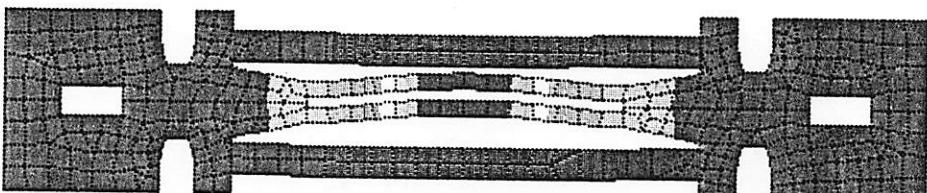
40.4

2.



41.8

3.



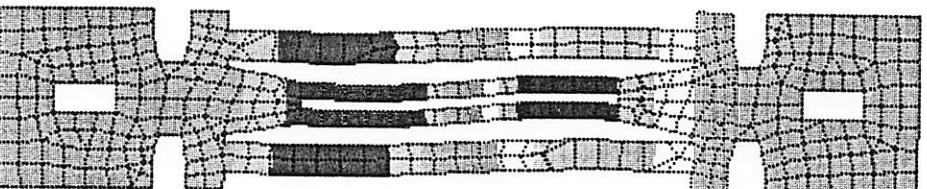
44.7

4.



47.8

5.



89.7

Bild 4: Die fünf ersten Eigenschwingungsformen der DETF2-Doppelstimmgabelstruktur

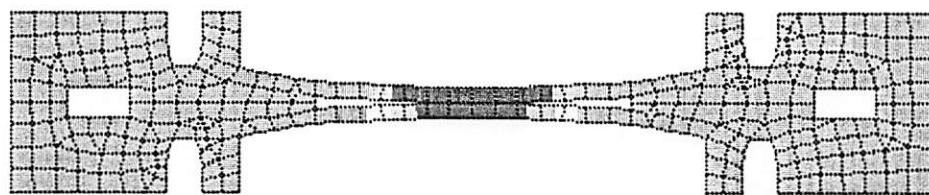
[kHz]

1.



43.3

2.



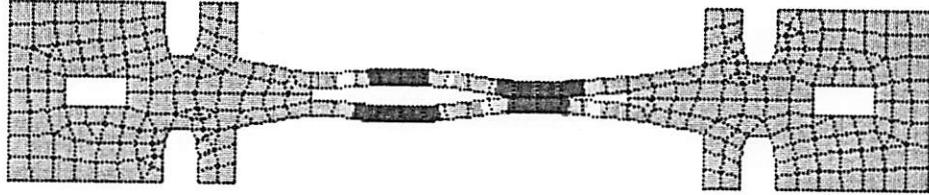
47.9

3.



99.0

4.



130.2

5.



149.6

**Bild 5:** Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von der Wahl des FE-Modells

Modell	1	2	3	4
Elementanzahl:	88	158	354	352
Knotenzahl:	116	212	430	1204
Elementgrößen:	1.0	0.5	0.35	0.35 [mm]
Freih.-grade:	78	130	102	266

**Eigenfrequenzen [Hz]:**

EF1	49037	44788	43838	43362
EF2	54738	50513	49131	47879 <---
EF3	113272	100436	98950	99001
EF4	158921	141869	136034	130205
EF5	172472	147216	147030	149632

Bemerkung: 4. Modell mit 8-knotigen Element,  
Der Sensor wird im Eigenmode EF2 betrieben

**Experimentelle Bestimmung von EF2:**

- 46786 [Hz] : Lieferant Fa. UNVERDROSS (2.3 %)
- 47025 [Hz] : Messungen bei BIZERBA (1.8 %)
- 48385 [Hz] : Hersteller ETA-ASULAB S.A. (1.0 %)

Bild 6: Spannungszustände ( $S_x$ ,  $S_y$ ) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel. Alle Spannungswerte sind in der Einheit [ $N/mm^2$ ] angegeben.

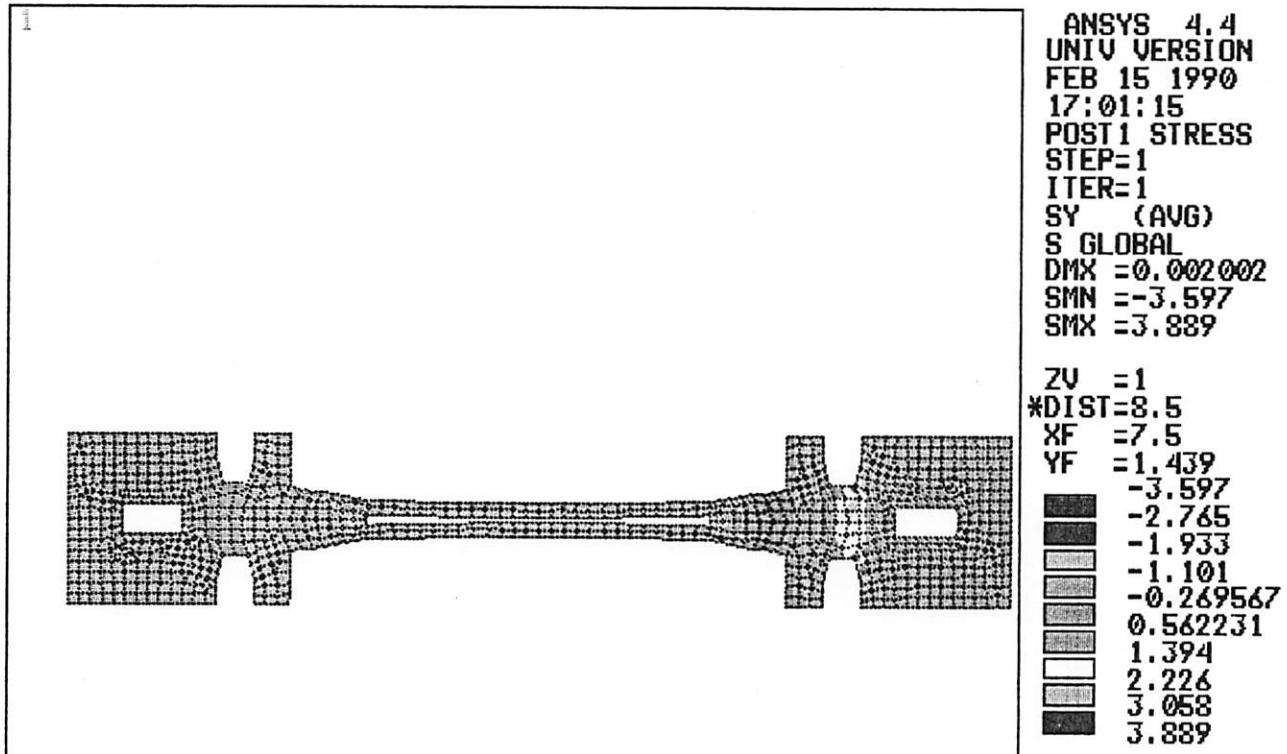
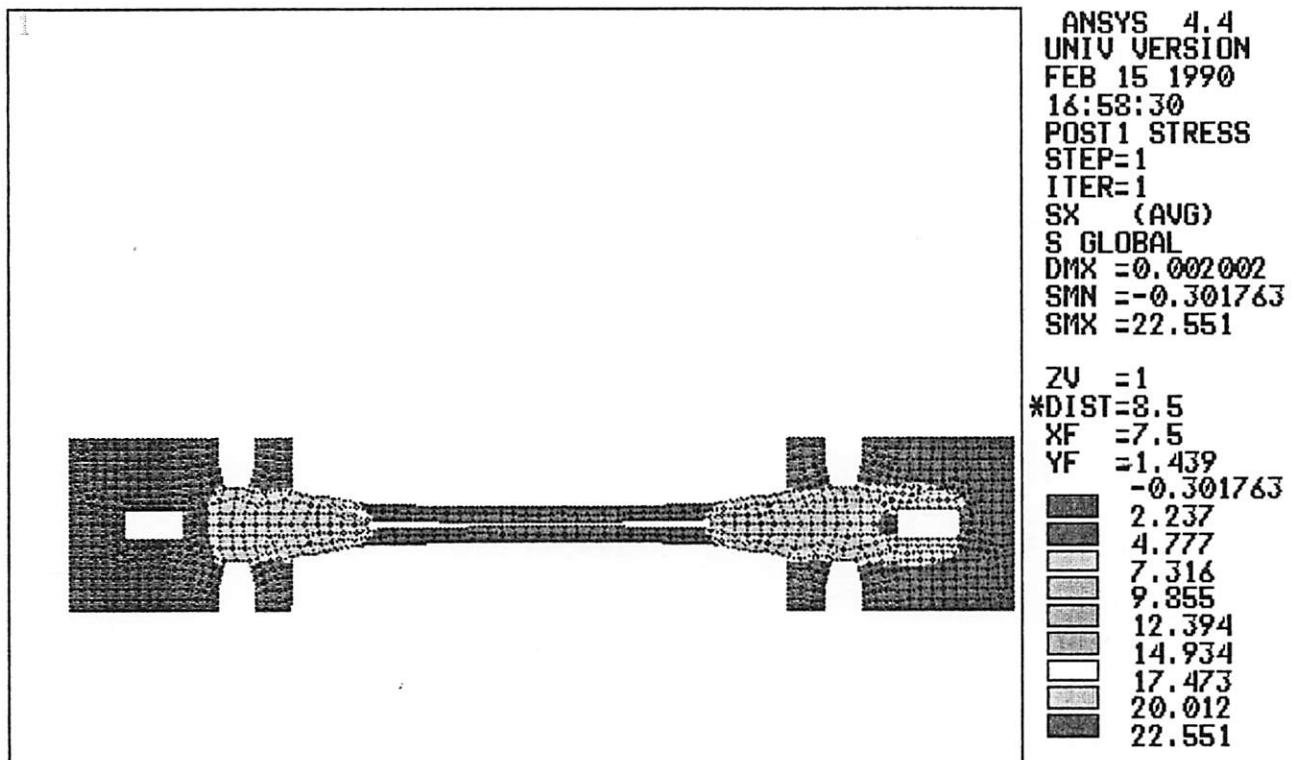


Bild 7: Vergrößerte Darstellung der Spannungszustände SX und SY. Alle Spannungswerte sind in der Einheit [N/mm<sup>2</sup>] angegeben.

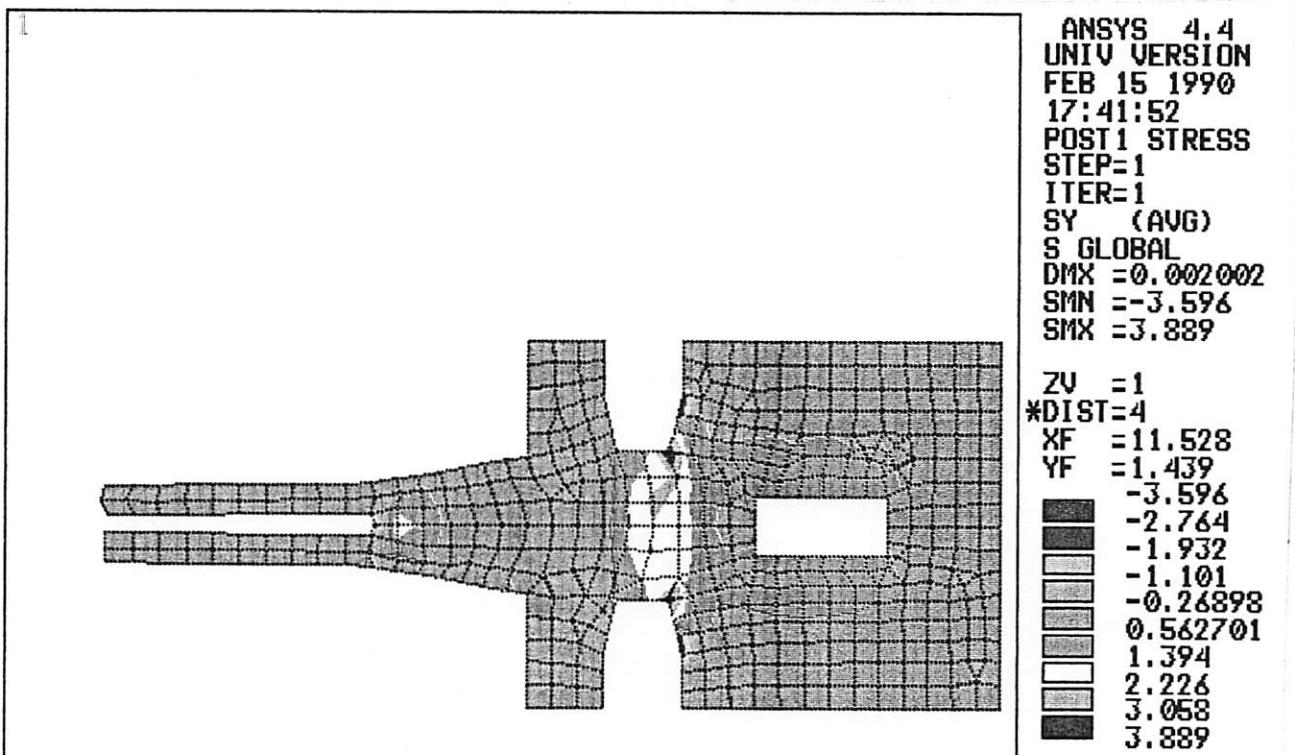
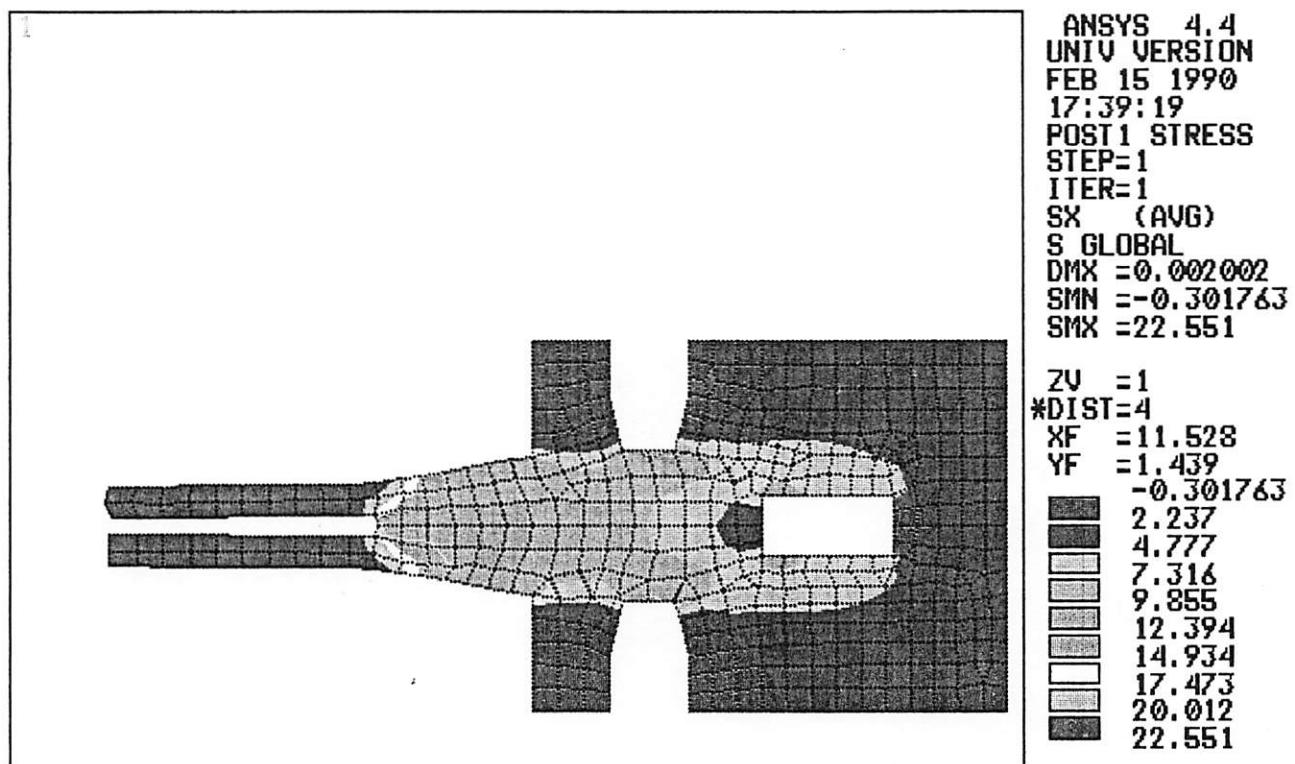


Bild 8: Verschiebungen ( $UX$ ,  $UY$ ) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel. Die Verschiebungen sind in der Einheit [mm] angegeben.

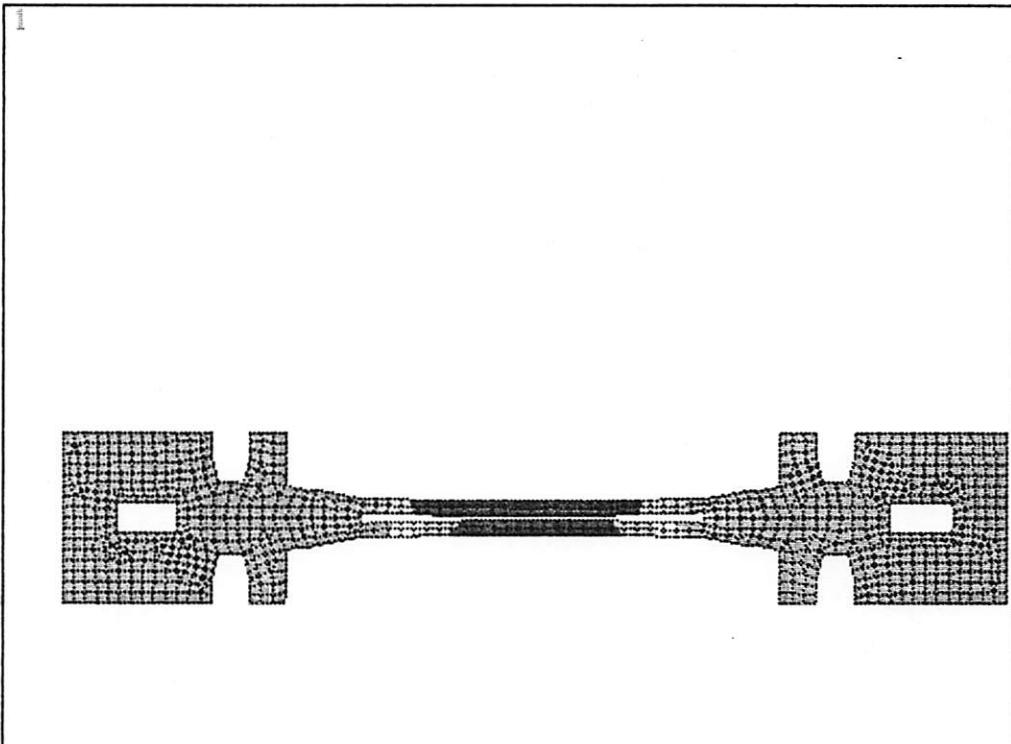
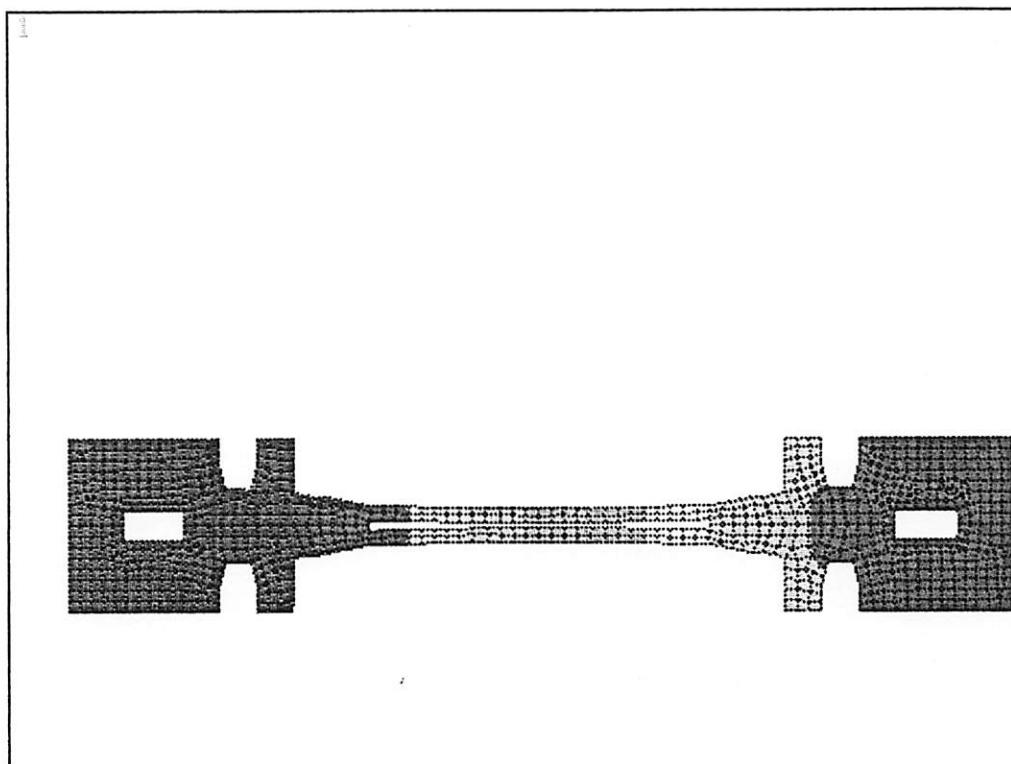


Bild 9: Kraft-Frequenz-Kennlinie der Doppelstimmgabel DETF2

