

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

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. Eigenmodus bzw. dem 4. Eigenmodus 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 μm bzw. 0.12 μm .

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:

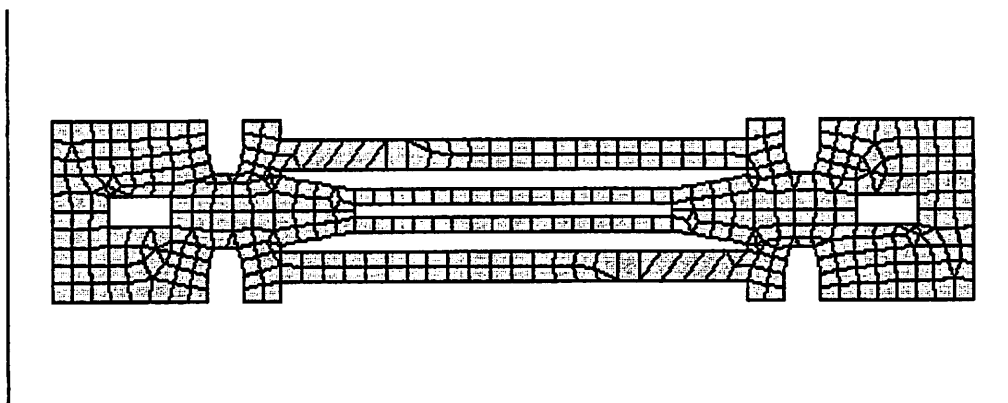
- Verfeinerung der Finite-Elemente Modelle:
 - * dreidimensionale Modellierung
 - * Berücksichtigung der Materialanisotropie
 - * Verwendung piezoelektrischer Elemente
- Variieren der Geometrieverhältnisse und Untersuchung verschiedener Quarzschwingertypen
- Modellierung frequenzanaloger Kraftsensoren 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 (SX, SY) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel
- Bild 7:** Vergrößerte Darstellung der Spannungszustände SX und SY
- Bild 8:** Verschiebungen (UX, UY) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel
- Bild 9:** Kraft-Frequenz-Kennlinie der Doppelstimmgabel DETF2

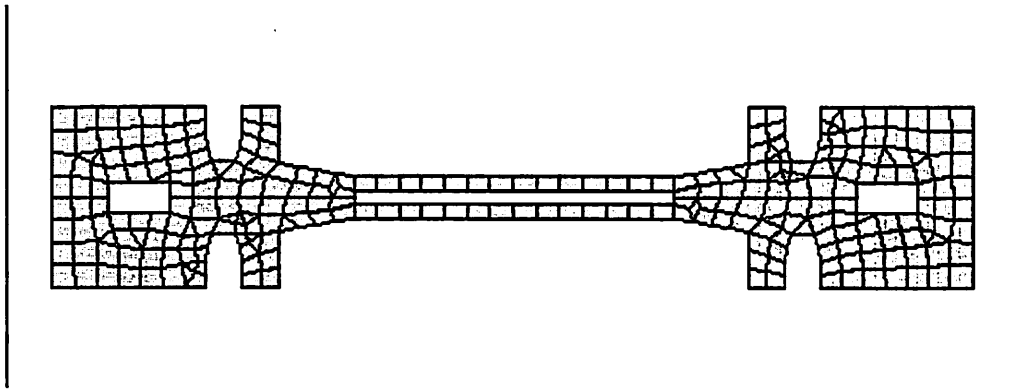
Bild 1: Vernetzte Doppelstimmgabelstruktur mit Verstärkungsstegen (DETF4) und FE-Modellparameter



FE-Modellparameter:

Modell:	DETF4	
Material:	Quarz	
Dichte:	2.65 [g/cm ³]	
E-Modul:	0.89*10 ¹¹ [N/mm ²]	
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 ³]	
E-Modul:	0.89*10 ¹¹ [N/mm ²]	
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

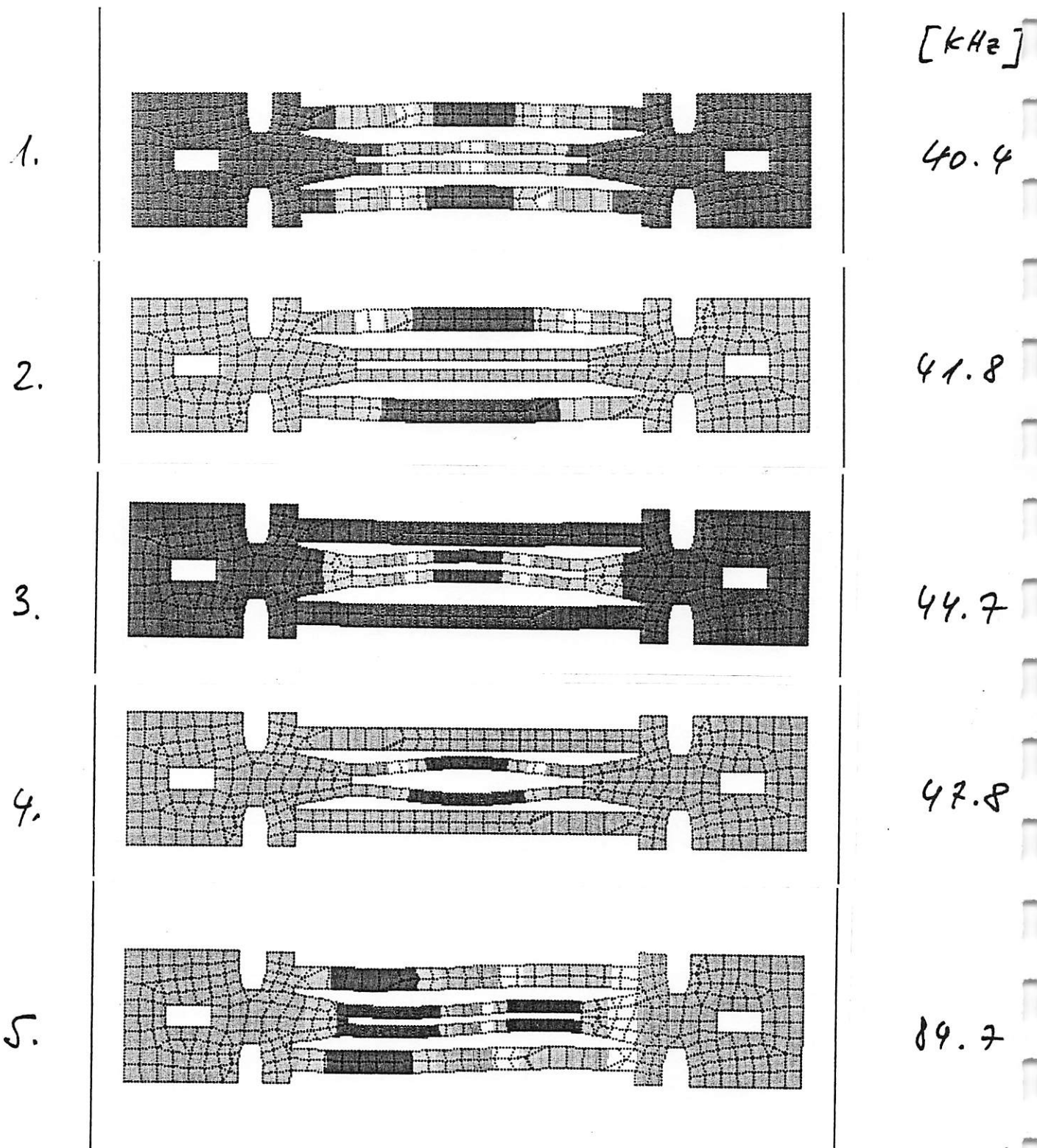


Bild 4: Die fünf ersten Eigenschwingungsformen der DETF2-Doppelstimmgabelstruktur

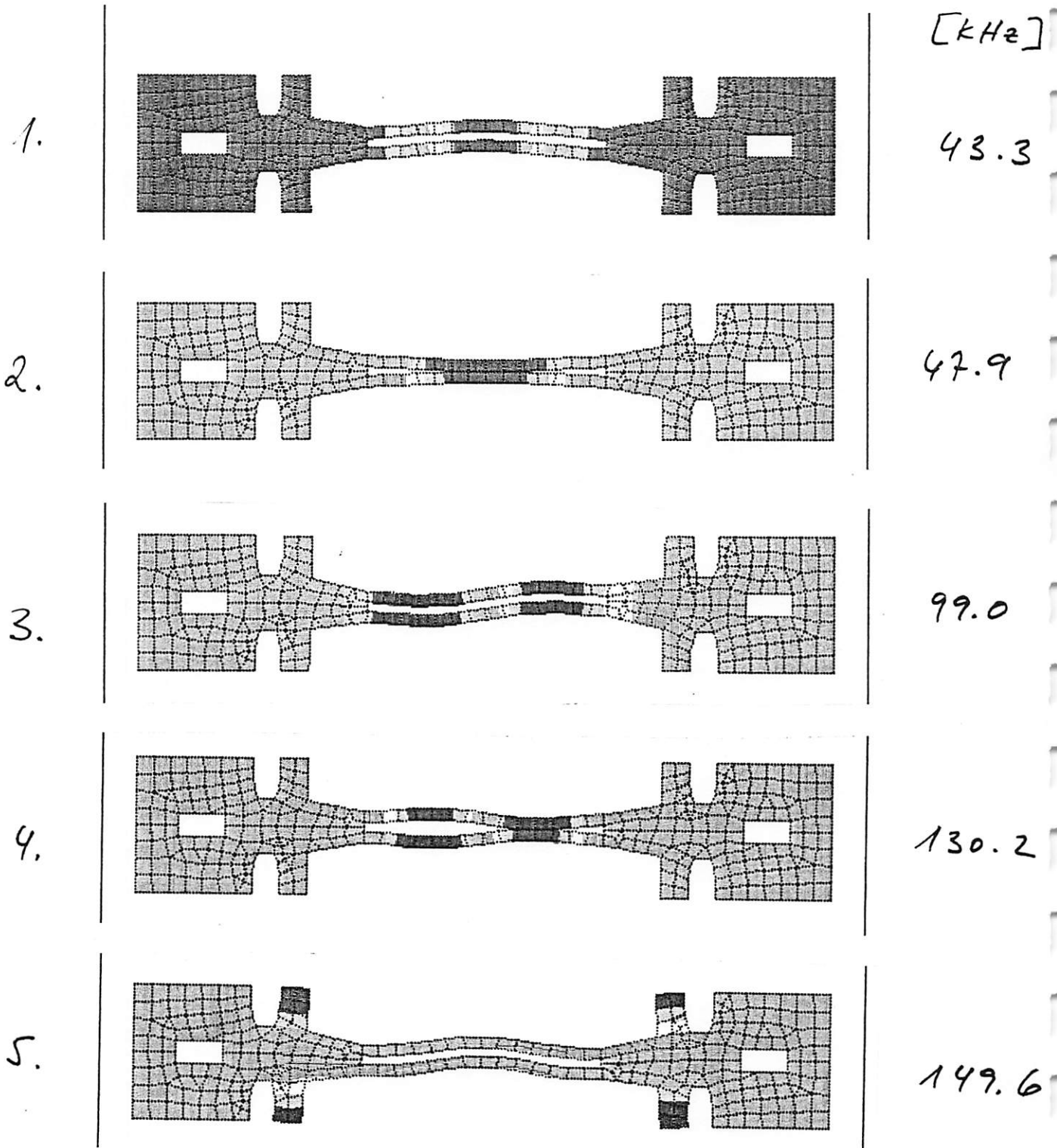


Bild 5: Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von der Wahl des FE-Modells

Modell	1	2	3	4
Elementanzahl:	88	158	354	352
Knotenanzahl:	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 (SX, SY) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel. Alle Spannungswerte sind in der Einheit [N/mm²] angegeben.

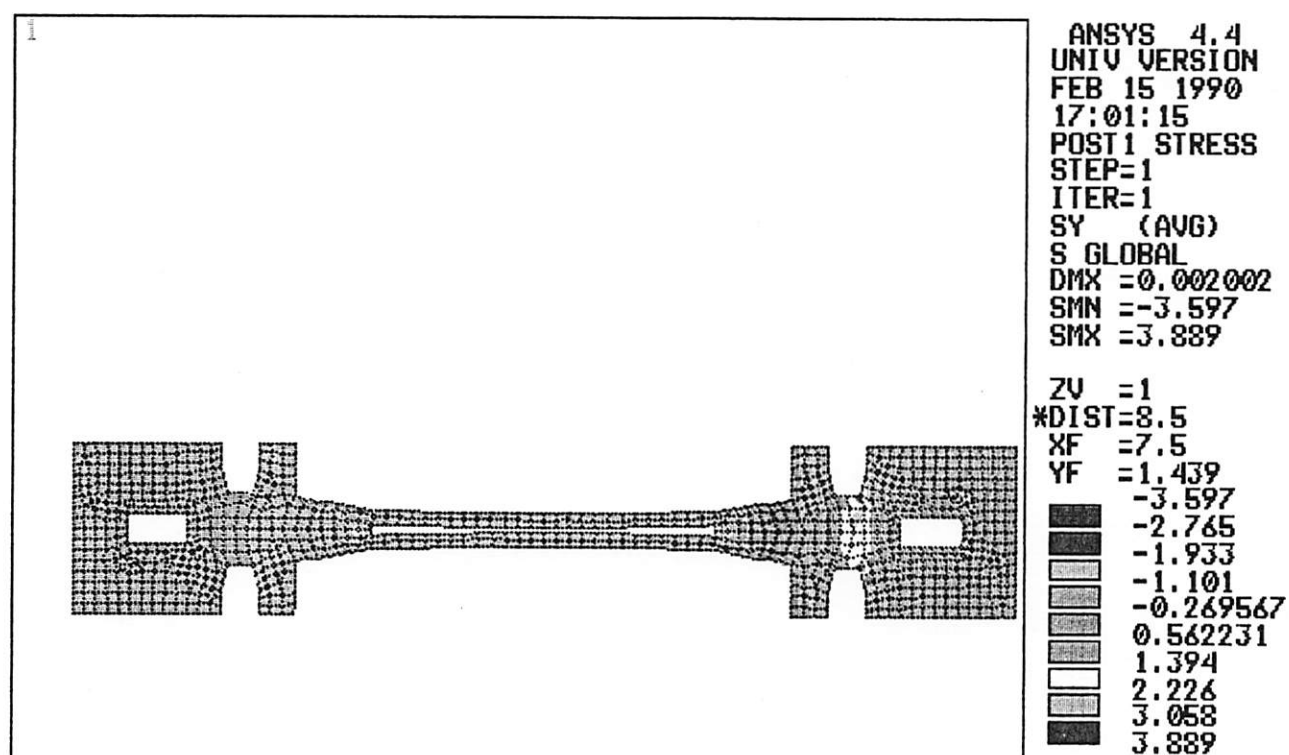
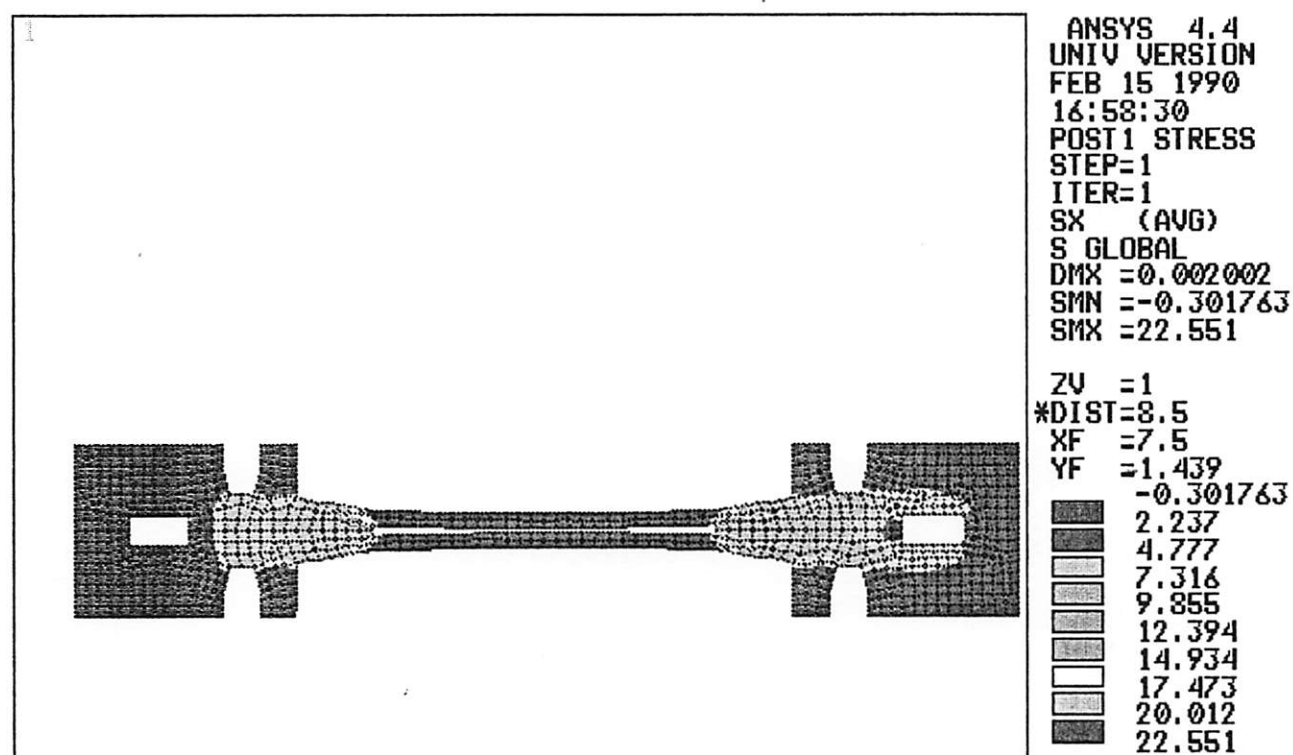


Bild 7: Vergrößerte Darstellung der Spannungszustände SX und SY. Alle Spannungswerte sind in der Einheit $[N/mm^2]$ angegeben.

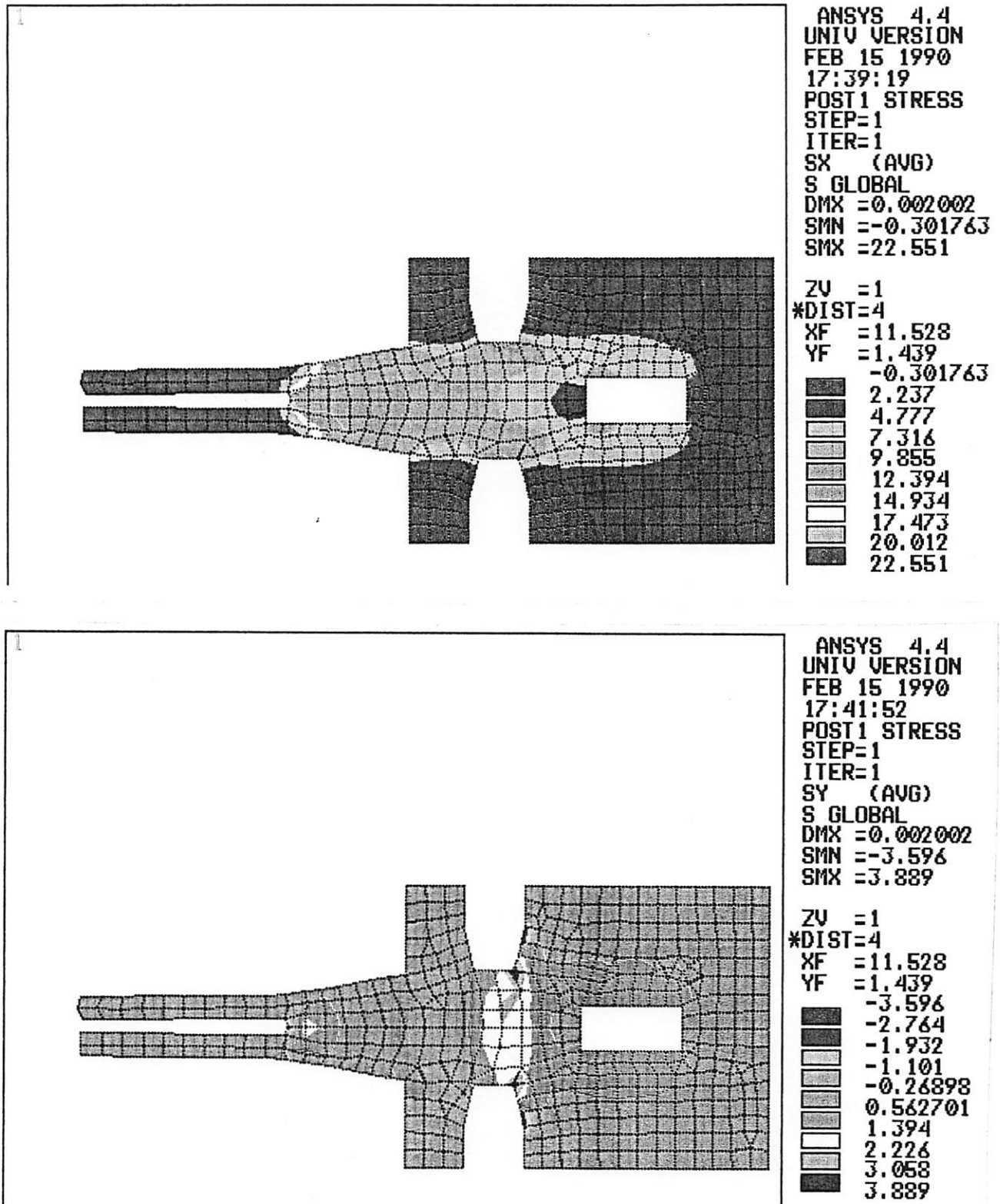


Bild 8: Verschiebungen (UX, UY) in x- und y-Richtung der Doppelstimmgabel. Die Verschiebungen sind in der Einheit [mm] angegeben.

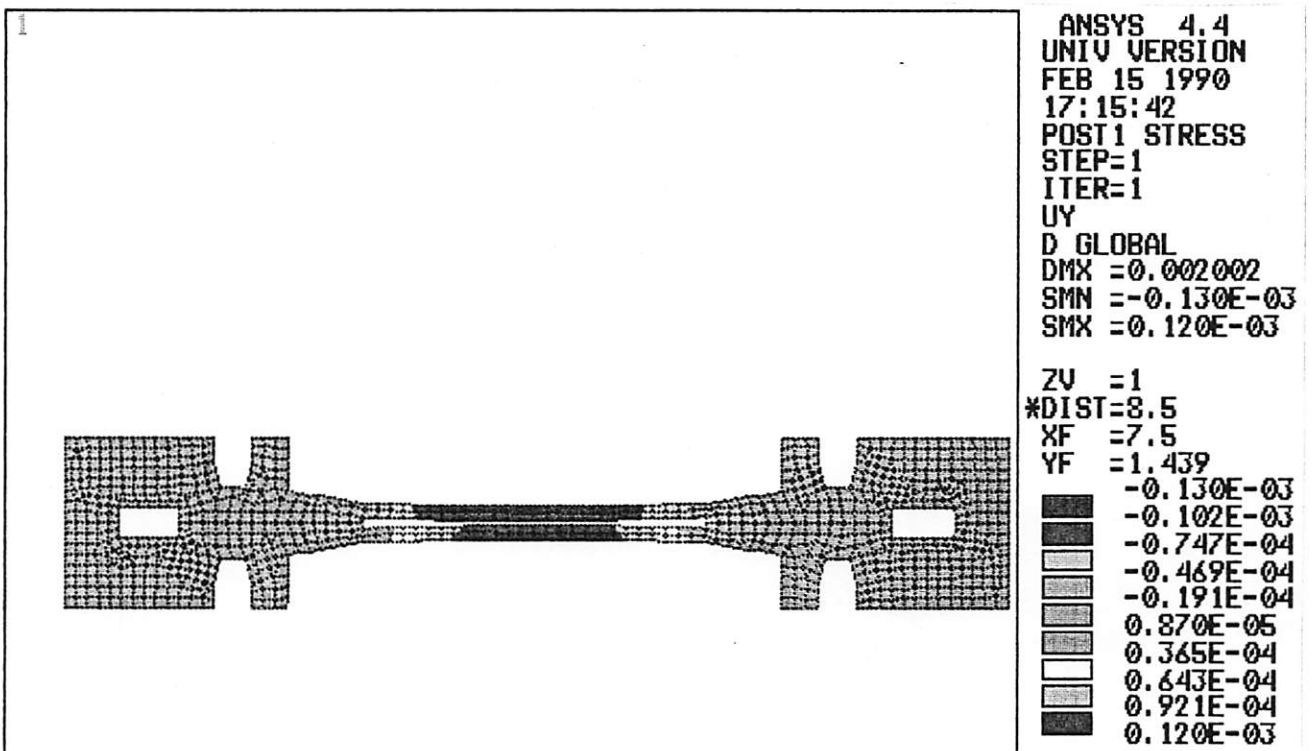
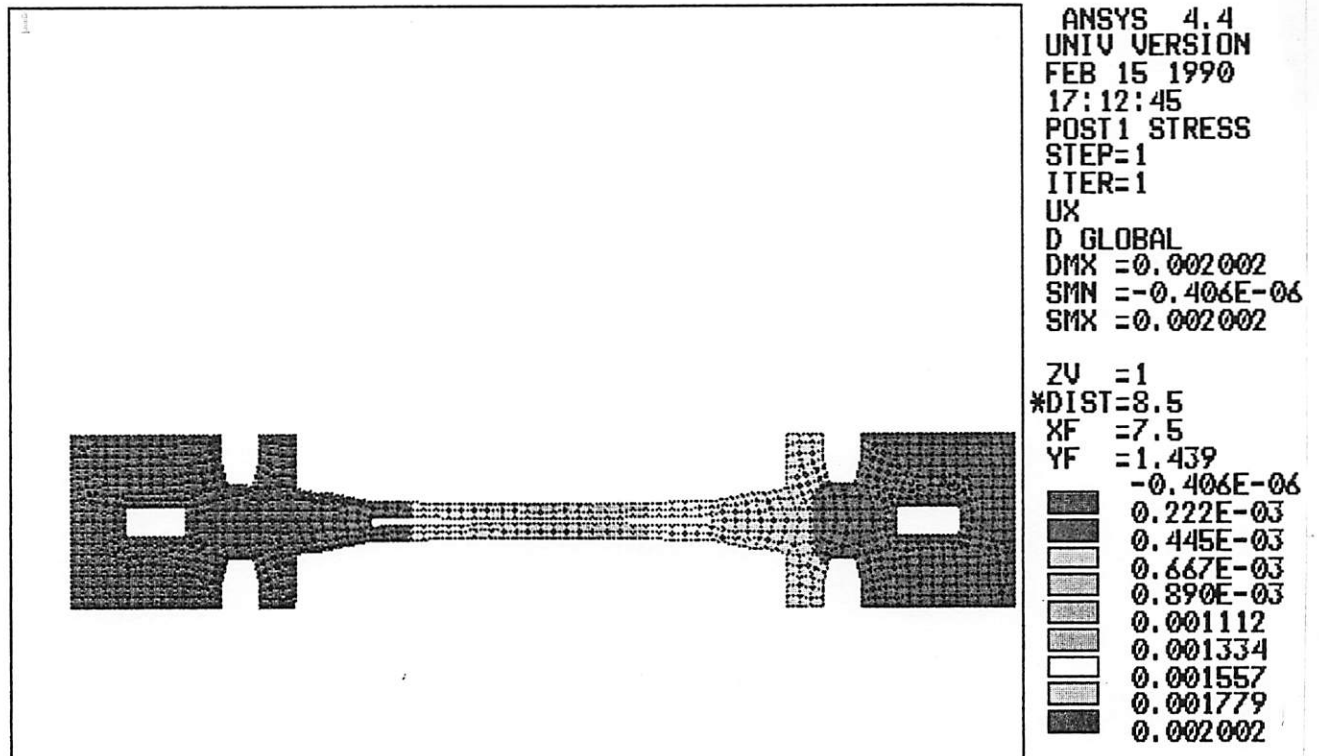


Bild 9: Kraft-Frequenz-Kennlinie der Doppelstimmgabel DETF2

