

Statusbesprechung zum Verbundprojekt:

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

Robert Bosch GmbH  
Gerlingen-Schillerhöhe

17. Januar 1990

Vortrag:

**Dynamische FEM-Rechnungen an resonanten Quarz-Kraftsensoren**

Th. Fabula, FFMU

# **Dynamische FEM-Rechnungen an resonanten Quarz-Kraftsensoren**

- Motivation**
- Finite-Elemente Modell**
- Modalanalyse**
- Kraft-Frequenz-Kennlinie**
- Verifikation der Ergebnisse**
- Zusammenfassung/Ausblick**

## Motivation:

- Einarbeitung in die Methode der Finiten-Elemente anhand des kommerziellen Programmpakets ANSYS:
  - \* Preprocessing: Aufbereiten der Struktur
  - \* Gleichungslösung: mathematische Lösungsverfahren
  - \* Postprocessing: Interpretation der Ergebnisse
  
- Studium der Abhängigkeit des FE-Modells von verschiedenen Parametern:
  - \* Elementvernetzung
  - \* Randbedingungen
  - \* Materialparameter
  - \* Geometrieverhältnisse
  
- > Einfluß der Modellparameter
  
- Überprüfbarkeit der Rechenergebnisse am Beispiel eines bekannten Problems (ETA-Kraftsensor)

## Dynamische Berechnungen: Modalanalyse

- freie, ungedämpfte, harmonische Schwingungen:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0$$

- Berechnung von Eigenfrequenzen und Eigenformen
- Reduktion des Gesamtsystems auf ausgewählte Freiheitsgrade (MDOF:  $i = 1 \dots n$ ):

$$([K_r] - \omega_i^2 [M_r]) \{\phi\}_i = 0$$

---> Eigenwertproblem

- Lösungen:

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cos \omega_i t$$

i-ter Eigenmodevektor

- Numerische Berechnung der  $n$  Werte von  $\omega_i$ ,  $\phi_i$ :

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$$

$\{\phi\}_i$  normiert

## Finite-Elemente Modell:

### Modellparameter:

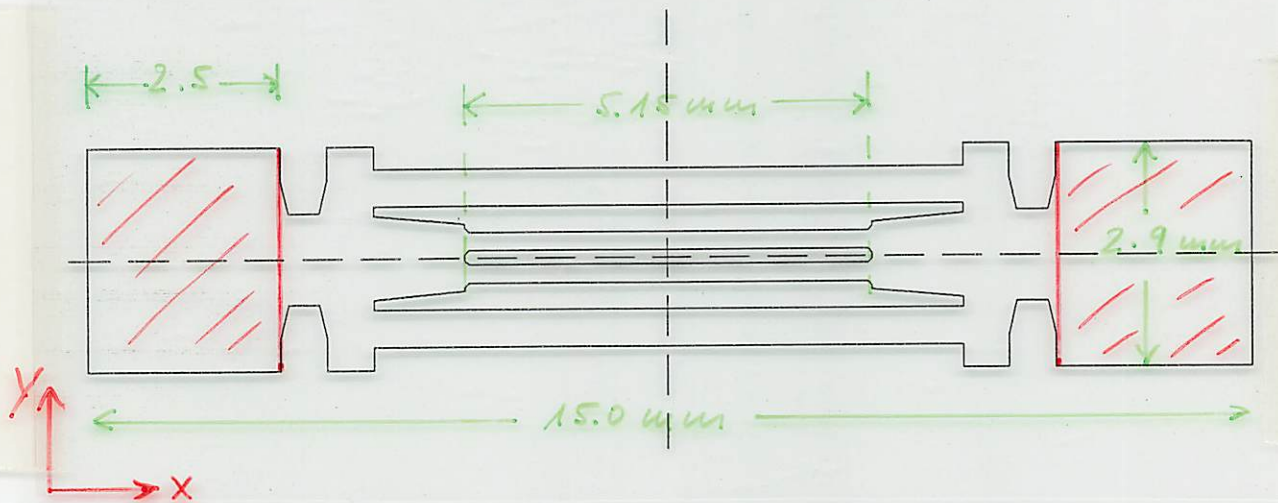
- Doppelstimmgabel mit/ohne Verstärkungsstege
- Material: Quarz
- isotropes Materialverhalten:
  - \* Elastizitätsmodul:  $0.89 \cdot 10^{11} \text{ [N/m}^2\text{]}$
  - \* Poissonzahl: 0.123 (Querkontraktion)
- Materialdichte: 2.65 [g/cm<sup>3</sup>]
- Strukturdicke: 125 [ $\mu\text{m}$ ]

### Modellannahmen:

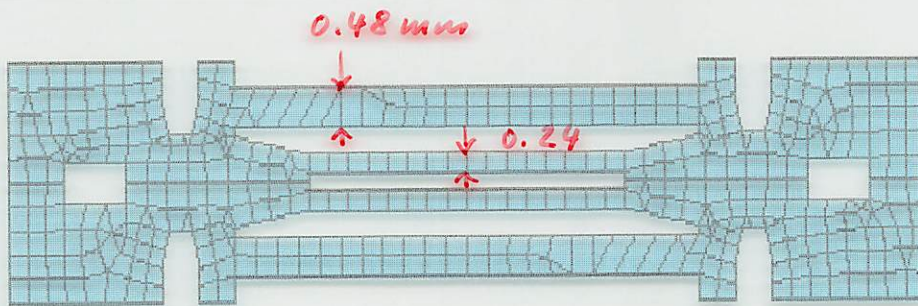
- Schwingungen nur in der x-y-Ebene zugelassen, Verwendung von 2D-Plattenelementen (4-, 8-knotig)
- Randbedingungen idealisiert
- Vernachlässigung der piezoelektrischen Effekte
- Cr-Au Elektroden weggelassen
- Vernachlässigung der Anisotropie



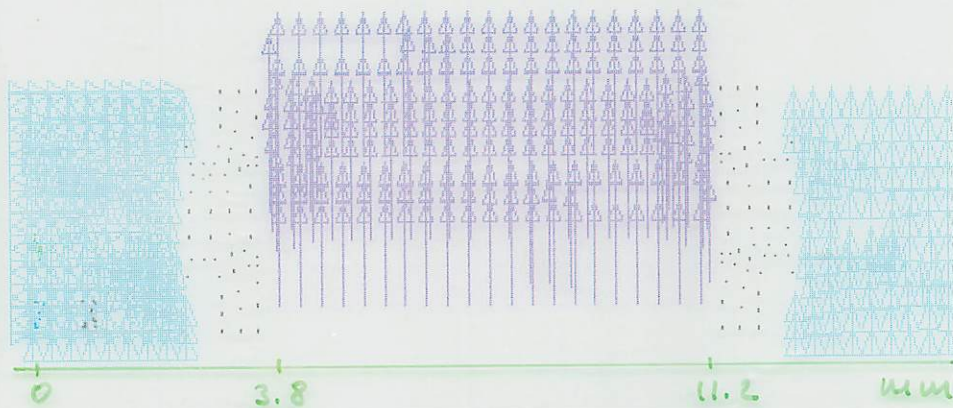
## Randbedingungen:



## Doppelbalkengeometrie mit Verstärkungsstäben (DETF4)



Vernetzte Struktur: 420 Elemente, 544 Knoten



Einspannungen:

Freiheitsgrade:

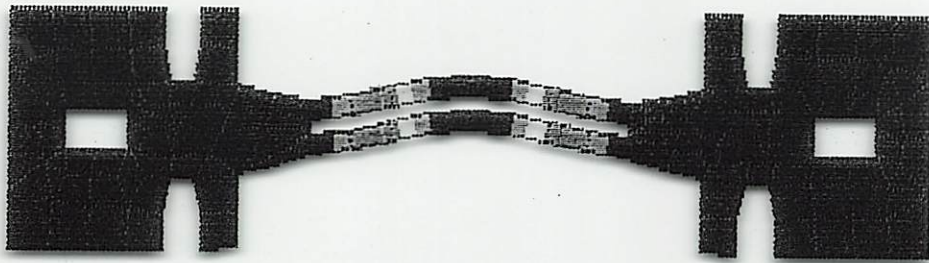
Fixierung in x-, y-Richtung

$3.8 < x < 11.2$  mm (MDOF: 218)

Eigenformen: (DETF2)

[kHz]

1.



43.3

2.



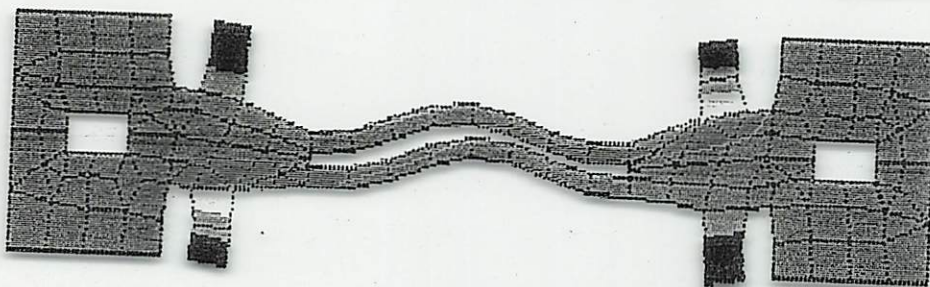
47.9

3.



99.0

4.



130.2

5.



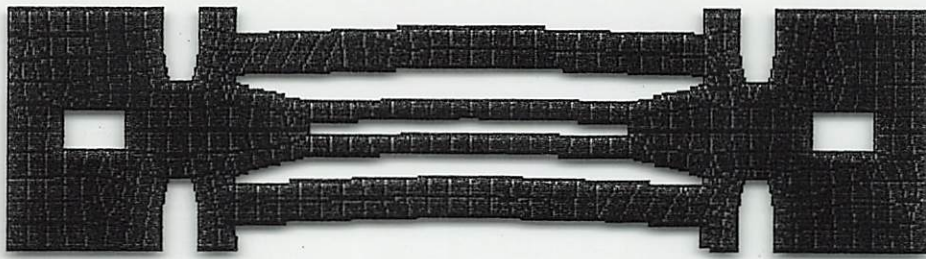
149.6



Eigenformen: (DETF4)

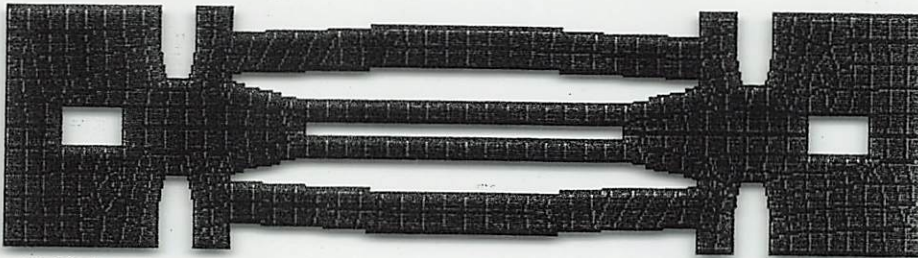
[kHz]

1.



40.4

2.



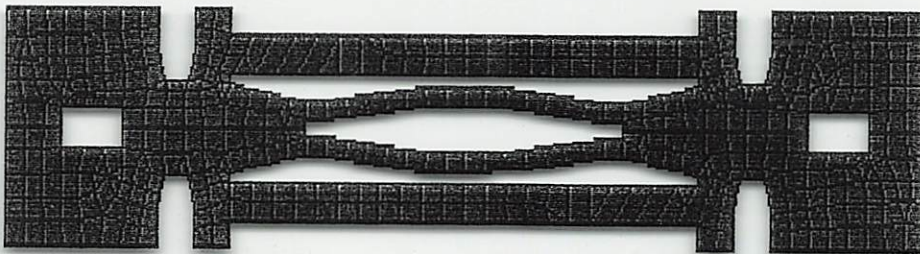
41.8

3.



44.7

4.



47.8

5.



84.7



## Berechnung von Eigenfrequenzen (DETF2):

Modell	1	2	3	4
Elemente:	88	158	354	352
Knoten:	116	212	430	1204
ELSI:	1.0	0.5	0.35	0.35 [mm]
MDOF:	78	130	102	266
wavefront:	58	88	84	207
EF1	49037	44788	43838	43362 [Hz]
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,  
Rechenzeit: ca. 30 min (PC386/20)

### Experimentelle Bestimmung von EF2:

46786 [Hz] : UNVERDROSS-Gerätetechnik (2.3 %)  
47025 [Hz] : Messungen bei BIZERBA (1.8 %)  
48385 [Hz] : Veröffentlichung ETA-ASULAB (1 %)

## Kraft-Frequenz-Charakteristik:

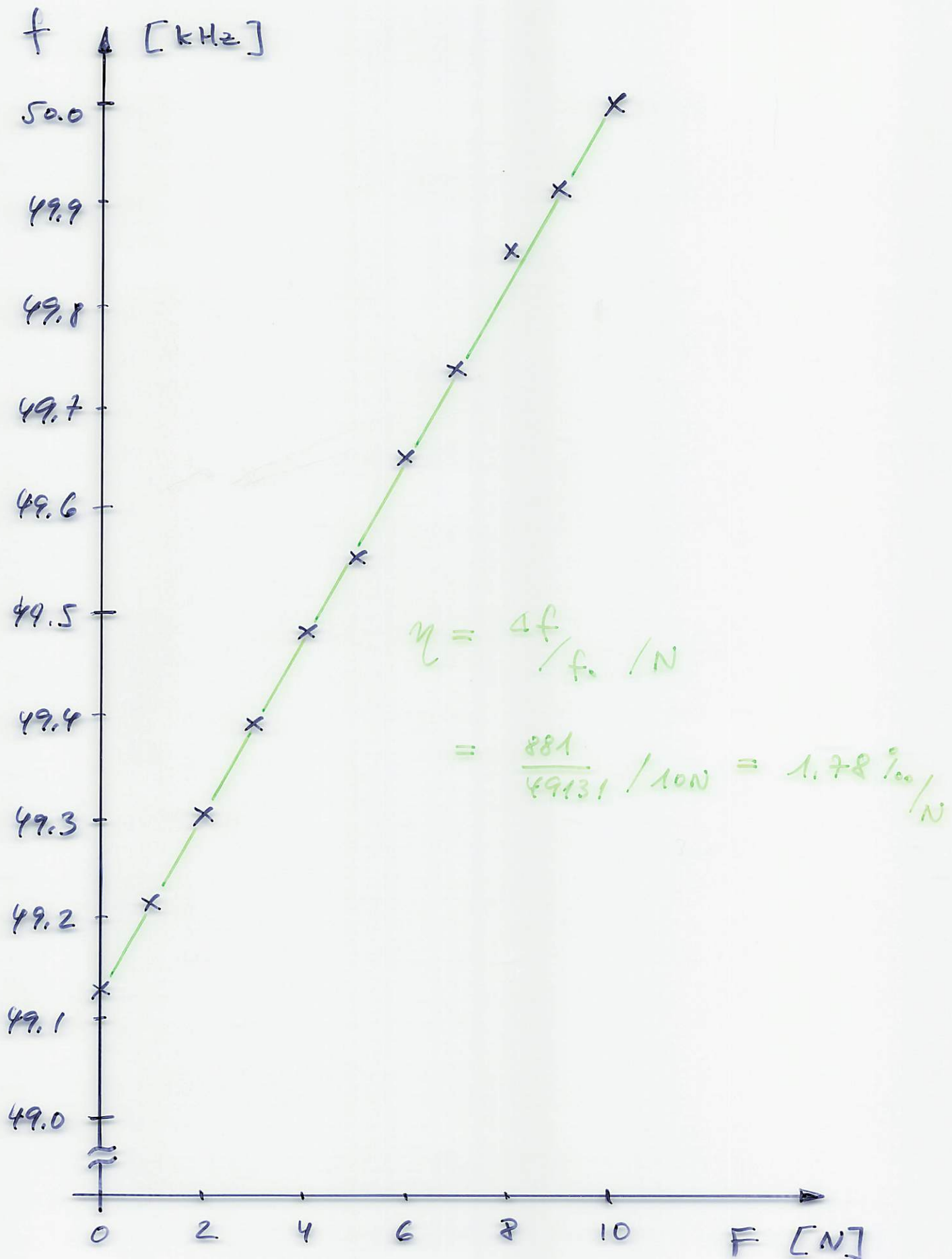
Last [N]	Frequenz $f$			Shift [Hz] $\Delta f$		
	Elem4	Elem8	BIZER.	Elem4	Elem8	BIZER.
0	49131 $f_0$	47879	47025	0	0	0
1	49212	-	-	81	-	-
2	49301	48049	-	170	170	-
3	49390	-	-	259	-	-
4	49479	-	-	348	-	-
5	49547	48317	47360	436	438	335
6	49655	-	-	524	-	-
7	49743	-	-	612	-	-
8	49831	-	-	700	-	-
9	49919	-	-	788	-	-
10	50006	48760	47692	875	881	667

Ergebnis für die Kraftempfindlichkeit:

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_0} / N$$

FEM:	1.78 - 1.8 ‰/ N
BIZERBA:	1.42 ‰/ N
ETA-ASULAB:	1.37 ‰/ N

## Kraft-Frequenz-Kennlinie:





## Zusammenfassung der Ergebnisse:

Unter den vereinfachten Annahmen (Isotropie, 2D-Rechnung, nicht piezoelektrisch) konnte eine recht gute Übereinstimmung der Eigenfrequenzen mit den experimentellen Werten (ETA-Sensor, DETF2) erzielt werden:

$$\Delta f_0 = (47879 - 47025) \text{ Hz} / 47025 \text{ Hz} \approx 2 \%$$

$$\Delta \eta = (1.78 - 1.42) \% / \text{N} / 1.42 \% / \text{N} \approx 25 \%$$

Die Genauigkeit der Rechnungen hängt wie erwartet von der Anzahl der Elemente (Knoten) bzw. berücksichtigter Freiheitsgrade (MDOF) ab:

---> Kompromiß: Rechenzeit / Genauigkeit

### Ausblick:

Weitere quantitative Aussagen bezüglich:

\* Strukturoptimierung, Elektrodenformgebung, etc.

bedingen leistungsfähigere Rechner (Workstation: 5000 Wavefront) und verfeinerte FE-Modelle:

- \* volle 3D-Modellierung
- \* Berücksichtigung der piezoelektrischen Effekte
- \* Berücksichtigung der Anisotropie.