

**Fachausschuß Mikrosystemtechnik in der
VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik und
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.**

Vortragsveranstaltung

Mikrosystemtechnik

**Max-Planck-Institut für Festkörperforschung,
Stuttgart-Büsnau**

16. Januar 1991

"Modellierung mikromechanischer Sensoren mit der Methode der Finiten Elemente"

Th.Fabula, B.Schmidt

**Hahn-Schickard Institut für
Mikro- und Informationstechnik,
Villingen-Schwenningen**

Modellierung mikromechanischer Sensoren mit der Methode der Finiten Elemente

Th.Fabula, B.Schmidt

**Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik,
Villingen-Schwenningen**

Im Hahn-Schickard-Institut wird das kommerzielle FEM-Programmsystem ANSYS für den Entwurf und die Auslegung von mikromechanischen Sensoren eingesetzt. Im Vordergrund stehen statische und dynamische Berechnungen an unterschiedlichen Sensorstrukturen, die z.T. anisotropes Materialverhalten (Silizium, Quarz) und den Einfluß verschiedener physikalischer Größen (z.B. Temperatur) berücksichtigen. Als Beispiele werden die Berechnungen von Silizium-Drucksensoren und von resonanten Quarz-Kraftsensoren aufgeführt.

Bei den statischen Berechnungen wird am Beispiel eines Drucksensors der Einfluß der Strukturgeometrie auf die Auslenkung und den Spannungszustand der Silizium-Membran aufgezeigt. Die Ergebnisse geben z.B. Aufschluß über eine günstige Anordnung der piezoresistiven Bauelemente, die Empfindlichkeit und den linearen Bereich des Drucksensors.

Bei den dynamischen Berechnungen sind die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen (Modalanalyse), die Kraft-Frequenz-Kennlinie (Kraftempfindlichkeit) und das Frequenzgangverhalten (Amplitudenspektrum) bei resonanter Anregung des Kraftsensors von Interesse. Die Anregung der resonanten Sensoren erfolgt z.B. thermisch oder piezoelektrisch, so daß die Kopplung verschiedener Felder (Wärmefeld-Struktur, Piezoelektrizität etc.) mit berücksichtigt werden muß. Der Einfluß der Temperatur auf die Resonanzeigenschaften der Sensorstruktur können ebenfalls mit berücksichtigt werden.

**Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und
Informationstechnik, Villingen-Schwenningen**

**Modellierung mikromechanischer
Sensoren mit der
Methode der Finiten Elemente**

Th.Fabula, B.Schmidt

**A.) Statische Berechnungen am Beispiel eines
piezoresistiven Silizium-Drucksensors**

**B.) Dynamische Berechnung eines resonanten
Kraftsensors auf Quarzbasis**

Gliederung

A.) Statische FEM-Berechnungen

- **2D FEM-Berechnung**
- **Nichtlineare Effekte**
- **3D-Membranstrukturen**
- **Sensorkennlinie**

B.) Dynamische FEM-Berechnungen

- **Modalanalyse**
- **Kraft-Frequenz-Kennlinie**
- **Frequenzganganalyse**
- **Temperaturabhängigkeit**

A.) Statische FEM-Berechnungen

Beispiel: piezoresistiver Silizium-Drucksensor

■ Funktionsprinzip:

Druckbeaufschlagung $p \Rightarrow$ Membranauslenkung \Rightarrow
 \Rightarrow Membranspannung $\sigma \Rightarrow$ Widerstandsänderung

■ Sensorkennlinie ist charakterisiert durch:

- Druckempfindlichkeit
- Linearität
- Temperaturempfindlichkeit
- Überlasteigenschaft

■ Einflußgrößen:

- Materialeigenschaften
- Kristallorientierung
- Membrangeometrie
- Widerstandsdesign
- Aufbau- und Verbindungstechnik

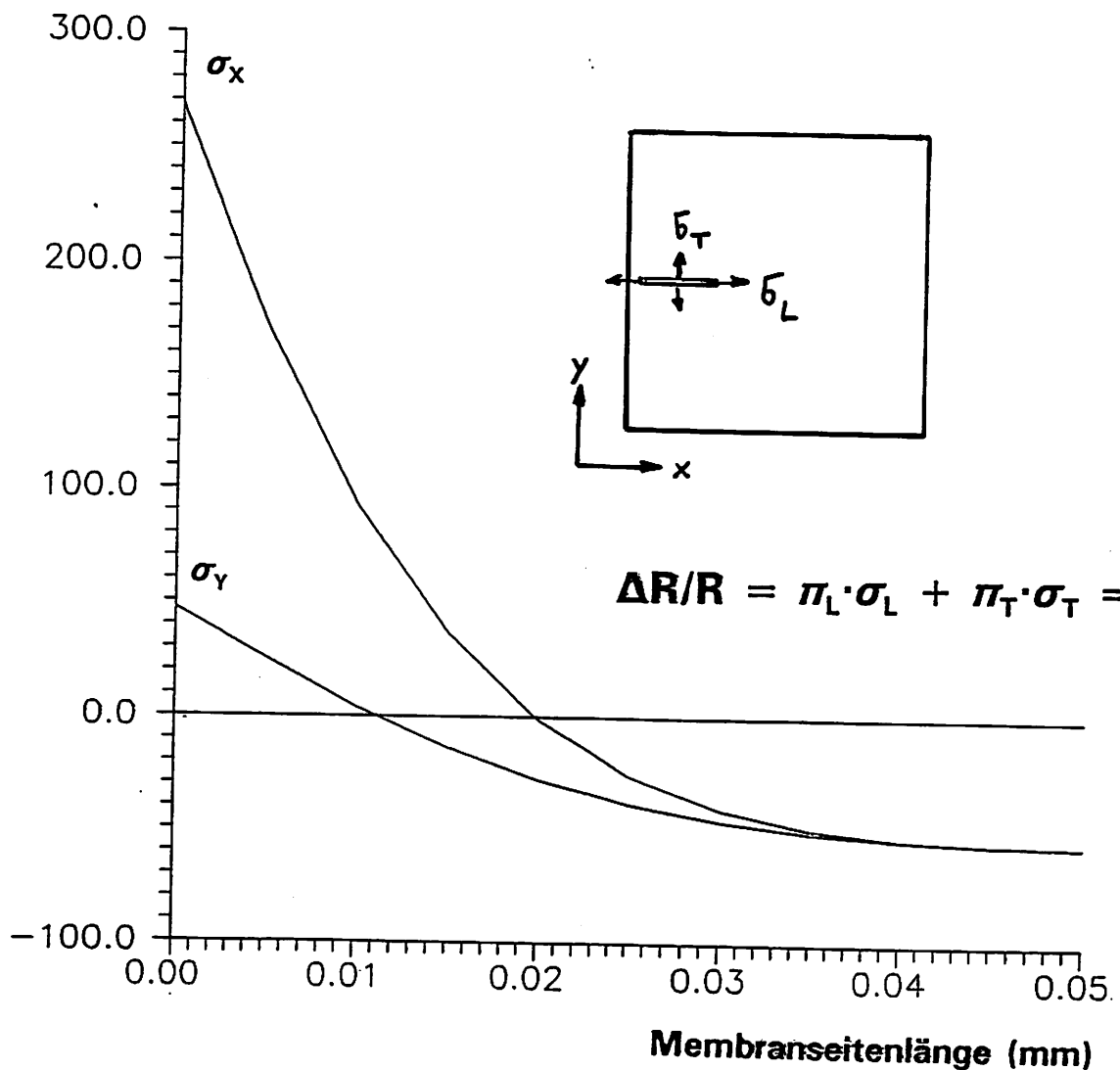
FEM-Lösung (zweidimensionales Modell)

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\}$$

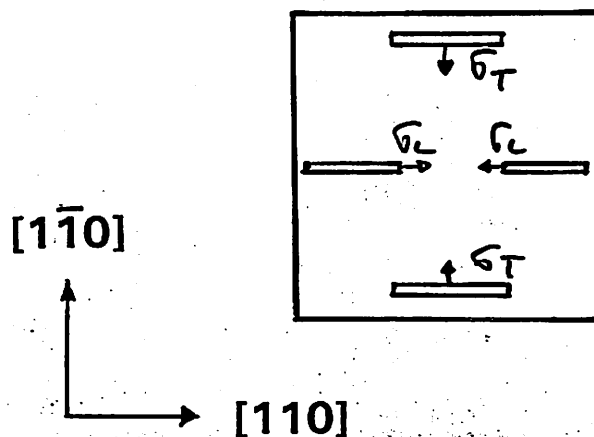
Berechnung einer dünnen Silizium-Membranstruktur:

- Membranabmessung: $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
- Membrandicke: $h = 1 \mu\text{m}$
- Druckbeaufschlagung: $\Delta p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

Spannungen (N/mm²)



Beispiel: • quadratische Si(100)-Membran



Widerstandslayout

- p-dotierte Si-Widerstände in $\langle 110 \rangle$ -Richtung:

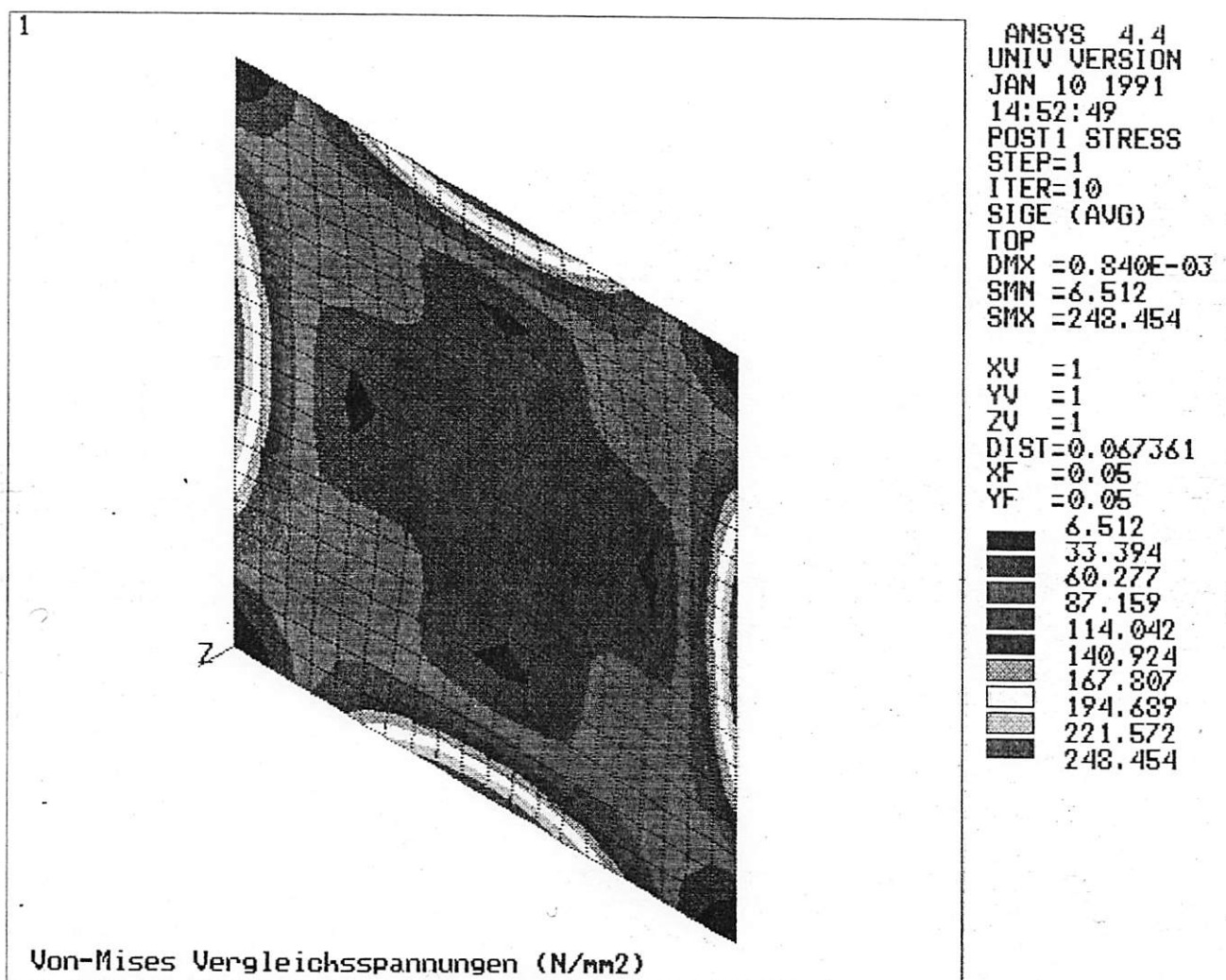
$$\Pi := \pi_L \approx -\pi_T \approx 7 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$

- trans. und long. Widerstandsdesign
- Wheatstonesche Brückenschaltung:

$$\Delta R/R \approx \Pi \cdot (\sigma_L - \sigma_T) \approx \Pi \cdot \sigma_L (1 - \nu)$$

Berechnete Spannungsverteilung

- max. Zugspannung: $\sigma_x \approx 2.7 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
- max. Auslenkung: $U_z \approx 0.8 \mu\text{m}$



Positionierung der piezoresistiven Widerstände im Bereich größter Biegespannungen

3.) Nichtlinearität der Kennlinie

- Membran-Nichtlinearität:

Dehnung der neutralen Ebene durch zusätzliche innere Zugspannung σ_{Zug} ($\sim p^2 \cdot (a/h)^6$)

FEM: große Auslenkungen (\approx Membrandicke)

\Rightarrow Spannungsversteifung der Membran

- Nichtlinearität des piezoresistiven Effektes:

$$\Delta\rho_i/\rho = \sum_{k,m} \pi_{ik} \cdot \sigma_k + \pi_{ikm} \cdot \sigma_k \cdot \sigma_m + \dots$$

(Kompensation durch eine Wheatstone-Brücke mit long. und trans. Widerstandsdesign)

- temperaturbedingte Nichtlinearitäten:

FEM: temp.abh. Materialeigenschaften: $E_{ik}(T)$

Finite-Elemente-Modellierung:

\Rightarrow Minimierung des Linearitätsfehlers NL

\Rightarrow Maximierung der Druckempfindlichkeit S

Nichtlineare FE-Berechnungen

- **Material-Nichtlinearität (anisotroper E-Modul)**
- **verschiedene Materialien (Si, SiO₂, Si₃N₄, Pyrex ...)**
- **Spannungsversteifung der Membran: $K = f(\Delta p)$**
- **große Auslenkungen (\approx Membrandicke)**
- **temperaturabhängige Materialeigenschaften**

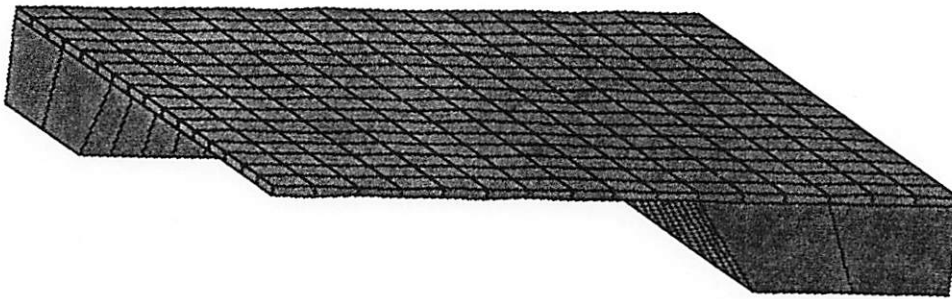
FEM \Rightarrow Iterative Lösungsalgorithmen nötig

3D-Membranstrukturen

Berücksichtigung von:

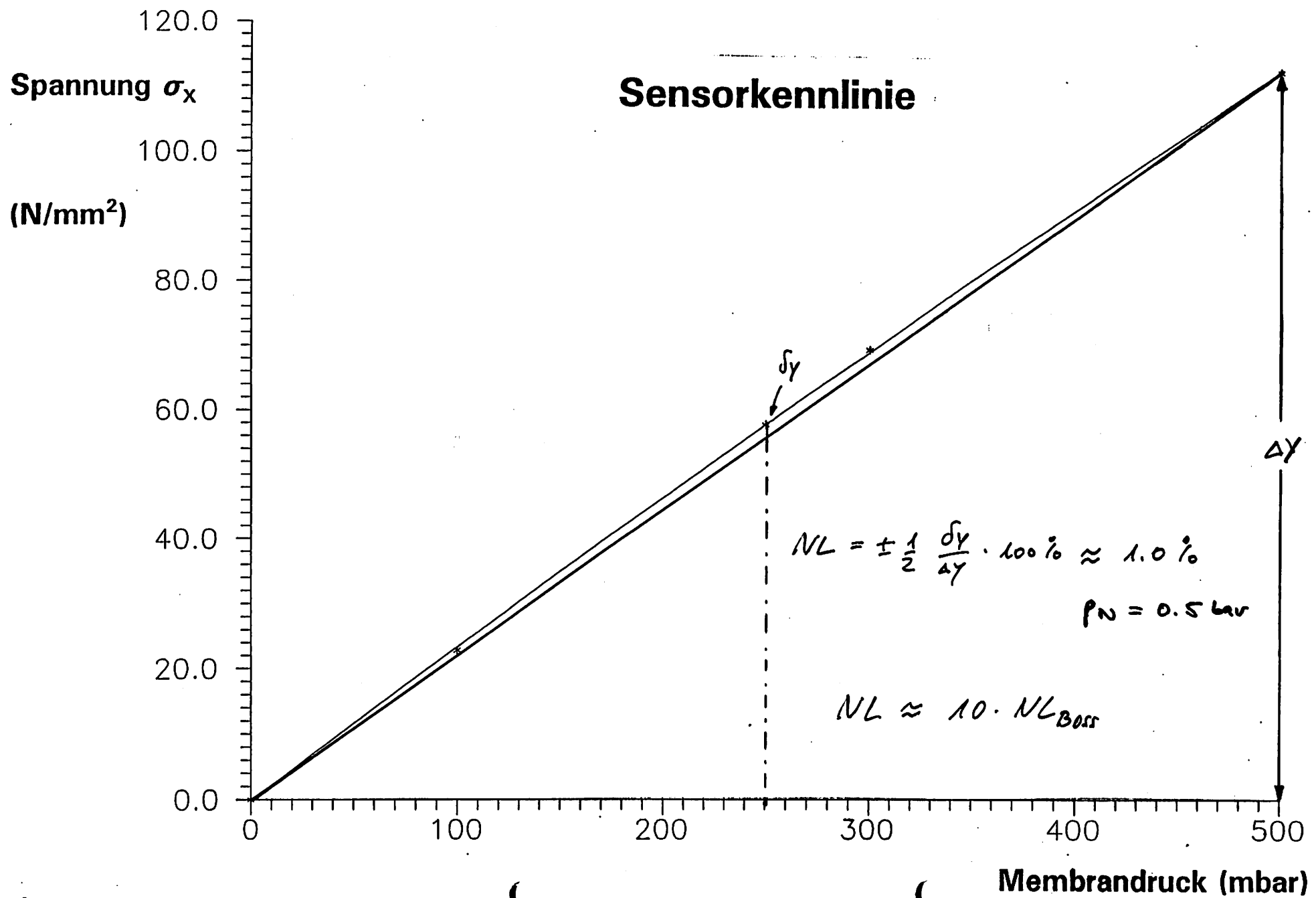
- Membraneinspannung
- Membranstrukturierung
- Materialanisotropie

ebene Si(100)-Membran



Si(100)-Membran mit einfach-BOSS





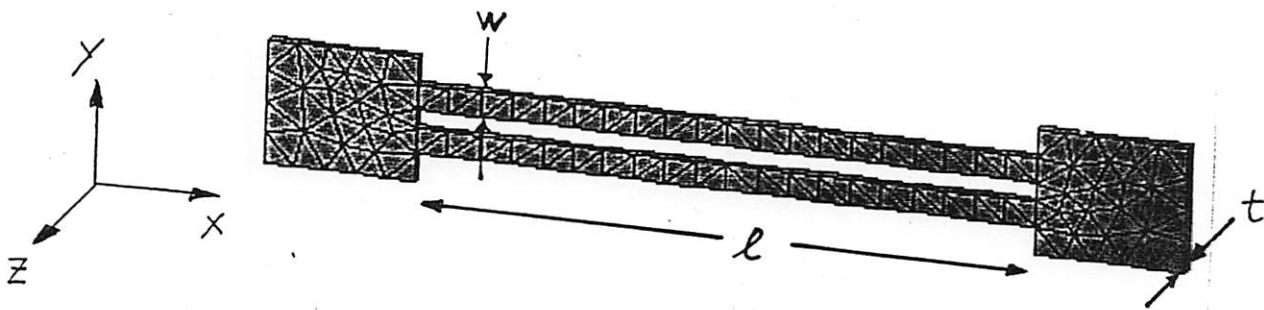
B.) Dynamische FEM-Berechnungen

Beispiel:

Quarzdoppelstimmgabel als resonanter Kraftsensor

■ Funktionsprinzip:

Kraftbeaufschlagung \Rightarrow Resonatorvorspannung \Rightarrow
Resonanzfrequenzänderung Δf



- $l = 5 \text{ mm}$, $w = 0.2 \text{ mm}$, $t = 0.1 \text{ mm}$
- anisotroper E-Modul (Z-Schnitt)
- Eigenfrequenzen: $f \sim w/l^2 \cdot \sqrt{(E/\rho)}$

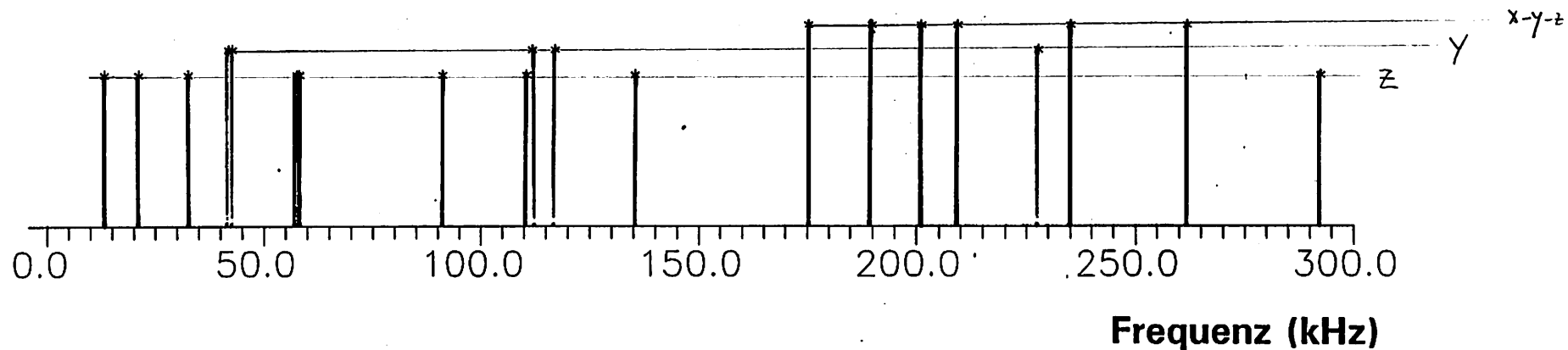
1.) Modalanalyse:

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

- Berechnung der Eigenfrequenzen f_i
- Berechnung der Eigenschwingungsformen

Modenspektrum der Quarz-Doppelstimmgabel

- Biegeschwingungen in z-Richtung
- Biegeschwingungen in y-Richtung
- überlagerte Schwingungszustände (x-y-z)

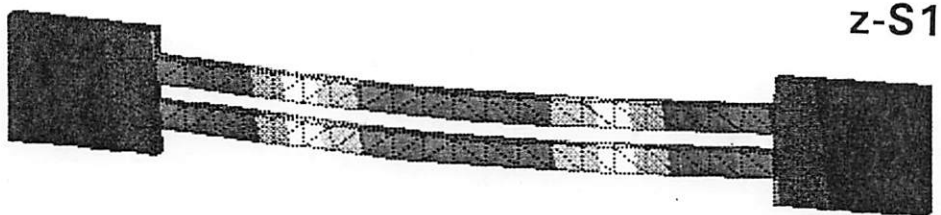


Eigenschwingungsformen

Mode i

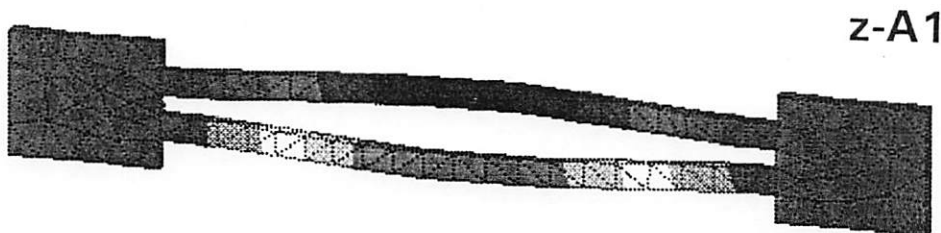
f_i (kHz)

1.



13.3

2.



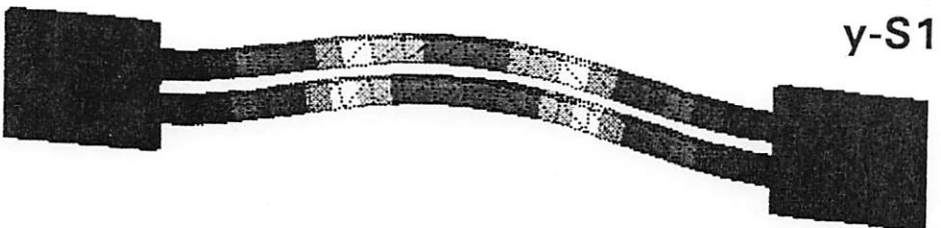
21.1

3.



32.6

4.



41.9

5.



42.8

2.) Kraft-Frequenz-Kennlinie

- Steifigkeitsänderung infolge Vorspannung S:

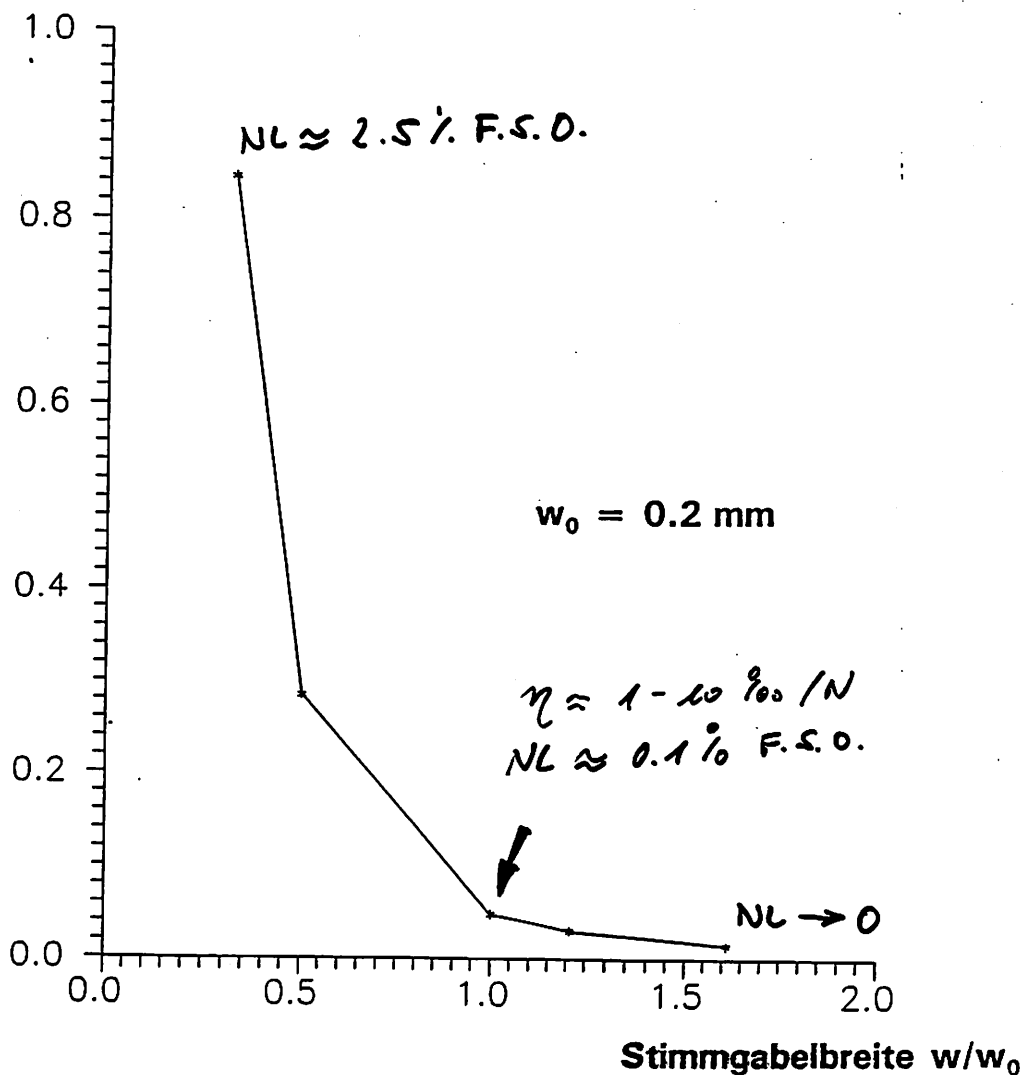
$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + ([K] + [S]) \cdot \{u\} = 0$$

- Kraftempfindlichkeit $\eta = \Delta f / \Delta \sigma \cdot 1/f_i = f(S)$

Abhängigkeit der Kraftempfindlichkeit η von der Stimmgabelbreite w :

$$\eta \sim 1/E \cdot (l/w)^2 \cdot F/(w \cdot t)$$

Empfindlichkeit (arb. units)

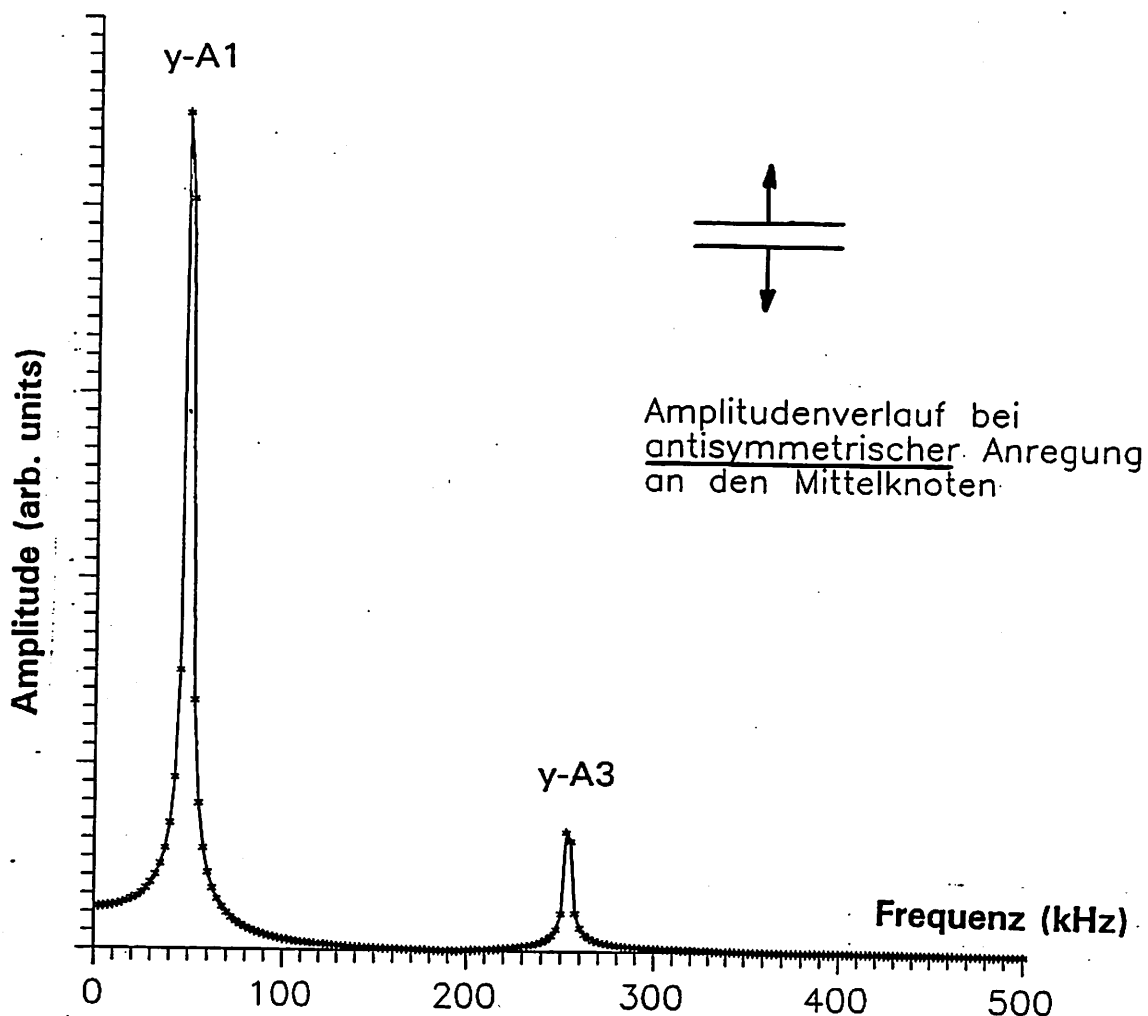


3.) Frequenzganganalyse

Berechnung des Amplitudenspektrums $A(f)$:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{F(t)\}$$

(mechanische Anregung $F(t)$, konstante Dämpfung)



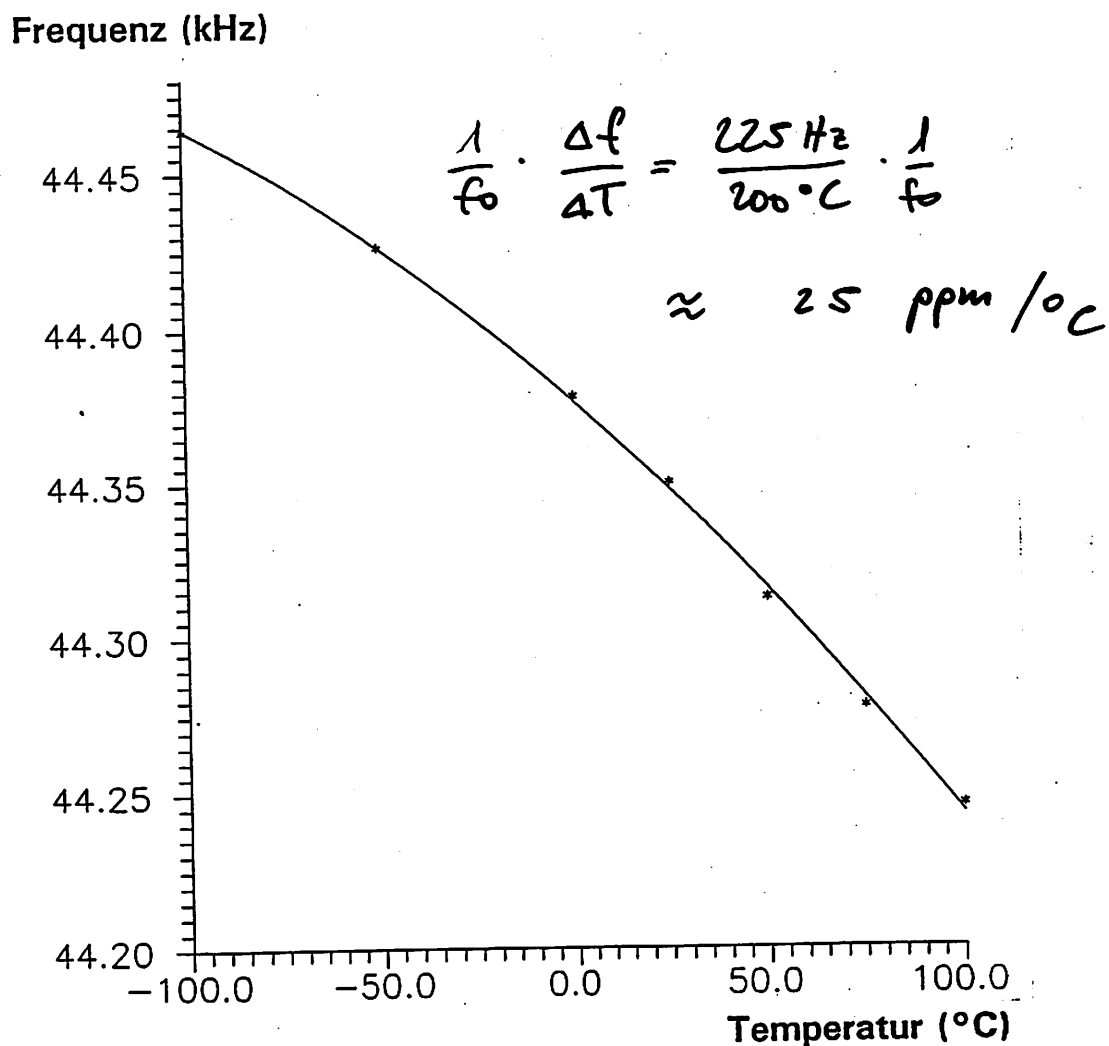
Bestimmend für mikromechanischen Resonator:

- mechanische Schwingungsgüte Q ($\sim 1/\text{Dämpfung}$)
- Unimodalität im Arbeitsbereich

4.) Temperaturabhängigkeit

Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz $f_0(T)$ des Schwingungsmodes y-A1:

- therm. Ausdehnung: $\alpha = f(T) \Rightarrow l = l(T)$
- E-Modul c_{ik} : $c_{ik} = f(T) \Rightarrow [K]$



Temperaturverhalten abhängig von:

- Quarz-Kristallschnitt
- Resonatorabmessungen

Zusammenfassung

Am Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik wurde mit Hilfe von FEM-Berechnungen untersucht:

- **Verhalten miniaturisierter Si-Drucksensoren (Membran-Abmessungen: $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$)**
- **Verbesserung der Linearität bei piezoresistiven Drucksensoren durch Strukturierung der Membranen**
- **Einsatzmöglichkeiten der dynamischen FEM-Berechnungen für resonanten Sensoren unter Einbeziehung thermischer und nichtlinearer Effekte**

Ergebnisse

Zur Modellierung mikromechanischer Sensoren wurden für die gezeigten Anwendungen parametrisierte FE-Modelle erstellt.

Diese ermöglichen:

- 1.) Modellierung von Sensorkonzepten**
- 2.) Optimierung des Sensordesigns**
- 3.) Berücksichtigung prozeßtechnischer Einflüsse**