

**Designoptimierung mikrotechnischer Sensoren mit FE-Modellierung**

Dr. Th. Fabula

Dr. rer. nat. Thomas Fabula

TCNK Entwicklung-Berechnung-Konstruktion GmbH, Dortmund

# **Designoptimierung mikrotechnischer Sensoren mit Finite-Element-Modellierung**

Mikrotechnischer Entwurf

Finite-Element-Methode

Frequenzanaloges Sensorprinzip

Optimierungsbeispiele

- ☐ resonanter Membrandrucksensor
- ☐ Dreifachbalken-Kraftsensor
- ☐ piezoelektrische Bimorphstrukturen
- ☐ elektrothermischer Strömungssensor
- ☐ resonanter BOD-Drucksensor

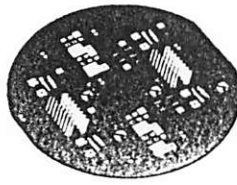
Zusammenfassung

# **Analytische Berechnungen**

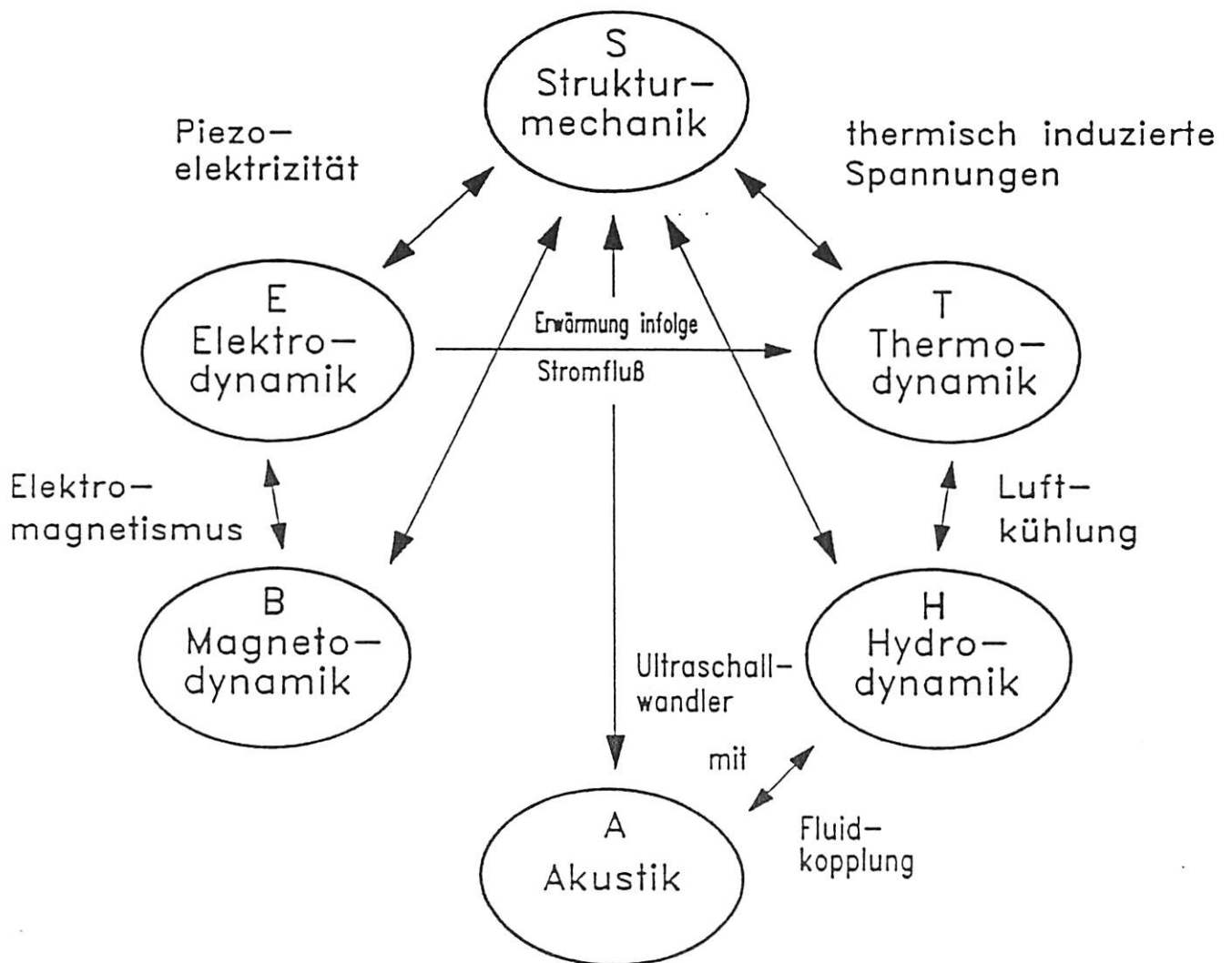
- Dimensionsreduzierung ( $3D \Rightarrow 2D \Rightarrow 1D$ )
- isotrope Materialeigenschaften ( $E, \nu$ )
- homogene Massenverteilung
- idealisierte Randbedingungen, Lasten
- stationäre Zustände (z.B. bei Schwingungen)
- diskrete Systeme (wenige Freiheitsgrade)
- keine (mehrfach) gekoppelten Effekte
- lineares Bauteilverhalten

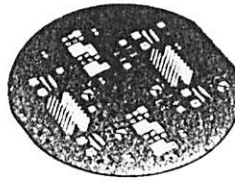
# **Numerische FE-Berechnungen**

- anisotrope Materialeigenschaften
- Einschluß von Temperaturabhängigkeiten
- reale Bauteilgeometrien (Strukt., techn. Toleranzen)
- komplexe Randbedingungen und Lastvorgaben
- transiente Berechnungsmöglichkeiten
- viele Freiheitsgrade (quasi kontinuierlich)
- gekoppelte Feldeffekte (Therm.-Strukt., Piezoel.)
- Nichtlinearitäten (Material, Geometrie, Struktur)



# Gekoppelte Feldberechnungen





# Thermodynamische Zustandsgleichungen

Beschreibung der mechanisch-elektrisch-thermischen Kopplungseffekte:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= s^E, T \sigma + d_t^T E + \alpha^E \Delta T \\ D &= d^T \sigma + \kappa^{\sigma, T} E + p^{\sigma} \Delta T \\ \Delta S &= \alpha_t^E \sigma + p_t^{\sigma} E + (C^{\sigma, E} / T) \Delta T \end{aligned} \right\}.$$

Matrixschreibweise:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= s_{11}^E \sigma_1 + s_{12}^E \sigma_2 + s_{13}^E \sigma_3 + s_{14}^E \sigma_4 + s_{15}^E \sigma_5 + s_{16}^E \sigma_6 + d_{11}^T E_1 + d_{21}^T E_2 + d_{31}^T E_3 + \alpha_1^E \Delta T \\ \epsilon_2 &= s_{12}^E \sigma_1 + s_{22}^E \sigma_2 + s_{23}^E \sigma_3 + s_{24}^E \sigma_4 + s_{25}^E \sigma_5 + s_{26}^E \sigma_6 + d_{12}^T E_1 + d_{22}^T E_2 + d_{32}^T E_3 + \alpha_2^E \Delta T \\ \epsilon_3 &= s_{13}^E \sigma_1 + s_{23}^E \sigma_2 + s_{33}^E \sigma_3 + s_{34}^E \sigma_4 + s_{35}^E \sigma_5 + s_{36}^E \sigma_6 + d_{13}^T E_1 + d_{23}^T E_2 + d_{33}^T E_3 + \alpha_3^E \Delta T \\ \epsilon_4 &= s_{14}^E \sigma_1 + s_{24}^E \sigma_2 + s_{34}^E \sigma_3 + s_{44}^E \sigma_4 + s_{45}^E \sigma_5 + s_{46}^E \sigma_6 + d_{14}^T E_1 + d_{24}^T E_2 + d_{34}^T E_3 + \alpha_4^E \Delta T \\ \epsilon_5 &= s_{15}^E \sigma_1 + s_{25}^E \sigma_2 + s_{35}^E \sigma_3 + s_{45}^E \sigma_4 + s_{55}^E \sigma_5 + s_{56}^E \sigma_6 + d_{15}^T E_1 + d_{25}^T E_2 + d_{35}^T E_3 + \alpha_5^E \Delta T \\ \epsilon_6 &= s_{16}^E \sigma_1 + s_{26}^E \sigma_2 + s_{36}^E \sigma_3 + s_{46}^E \sigma_4 + s_{56}^E \sigma_5 + s_{66}^E \sigma_6 + d_{16}^T E_1 + d_{26}^T E_2 + d_{36}^T E_3 + \alpha_6^E \Delta T \\ D_1 &= d_{11}^T \sigma_1 + d_{12}^T \sigma_2 + d_{13}^T \sigma_3 + d_{14}^T \sigma_4 + d_{15}^T \sigma_5 + d_{16}^T \sigma_6 + \kappa_{11}^{\sigma, T} E_1 + \kappa_{12}^{\sigma, T} E_2 + \kappa_{13}^{\sigma, T} E_3 + p_1^{\sigma} \Delta T \\ D_2 &= d_{21}^T \sigma_1 + d_{22}^T \sigma_2 + d_{23}^T \sigma_3 + d_{24}^T \sigma_4 + d_{25}^T \sigma_5 + d_{26}^T \sigma_6 + \kappa_{12}^{\sigma, T} E_1 + \kappa_{22}^{\sigma, T} E_2 + \kappa_{23}^{\sigma, T} E_3 + p_2^{\sigma} \Delta T \\ D_3 &= d_{31}^T \sigma_1 + d_{32}^T \sigma_2 + d_{33}^T \sigma_3 + d_{34}^T \sigma_4 + d_{35}^T \sigma_5 + d_{36}^T \sigma_6 + \kappa_{13}^{\sigma, T} E_1 + \kappa_{23}^{\sigma, T} E_2 + \kappa_{33}^{\sigma, T} E_3 + p_3^{\sigma} \Delta T \\ \Delta S &= \alpha_1^E \sigma_1 + \alpha_2^E \sigma_2 + \alpha_3^E \sigma_3 + \alpha_4^E \sigma_4 + \alpha_5^E \sigma_5 + \alpha_6^E \sigma_6 + p_1^{\sigma} E_1 + p_2^{\sigma} E_2 + p_3^{\sigma} E_3 + (C^{\sigma, E} / T) \Delta T \end{aligned} \right\};$$

Kopplungsschema:

	$\sigma$	$E$	$\Delta T$
$\epsilon$	$s$	$d_t$	$\alpha$
$D$	$d$	$\kappa$	$p$
$\Delta S$	$\alpha_t$	$p_t$	$C/T$

$s$  = elastic compliances

$d$  = piezoelectric moduli

$\alpha$  = thermal expansion coefficients

$\kappa$  = permittivities

$p$  = pyroelectric coefficients

$C$  = heat capacity

$T$  = absolute temperature







$\Delta S$  = Entropieänderung

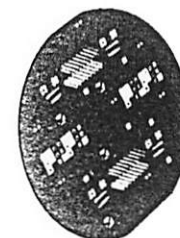
Quelle: J.F. Nye, Physical Properties of Crystals, Oxford Univ. Press

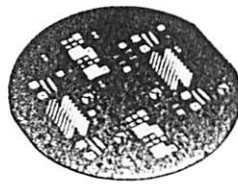
## Resonanzfrequenzen-Vergleich: Analytische Rechnung $\Leftrightarrow$ FEM $\Leftrightarrow$ Messung

Resonanzfrequenzvielfaches  $c_i$ :  $f_i = c_i \cdot f_0$

- analytisch: ideal homogene, quadratische Silizium-Platte (steife Einspannung)
- FE-Modelle: Si-Membran, Abm.:  $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$ ,  $t_{\text{Si}} = 100 \text{ }\mu\text{m}$
- Messungen: Si/ZnO-Bimorphmembran, Abm.:  $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$ ,  $t_{\text{Si}} = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $t_{\text{ZnO}} = 15 \text{ }\mu\text{m}$   
( $k_{\text{eff}}$  : effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor)

Schwingungs- mode		analytisch		FEM		opt. Messung		elektr. Messung	
		isotrop [Pon91]	aniso. [Pon91]	2D isotrop	3D an- isotrop	$c_i$	$f_i$ [kHz]	$c_i$	$k_{\text{eff}}$
	$M_{11}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,24	1,00	0,10
	$M_{12}$	2,04	2,00	2,04	2,11	2,10	15,22	---	---
	$M_{22}$	3,01	2,90	3,00	3,03	2,86	20,71	---	---
	$M_{31}$	3,66	3,62	3,65	3,75	---	---	---	---
	$M_{13}$	3,68	3,63	3,67	3,77	3,94	28,57	3,92	0,08
	$M_{33}$	6,12	5,87	6,11	6,02	6,35	46,0	6,34	0,07



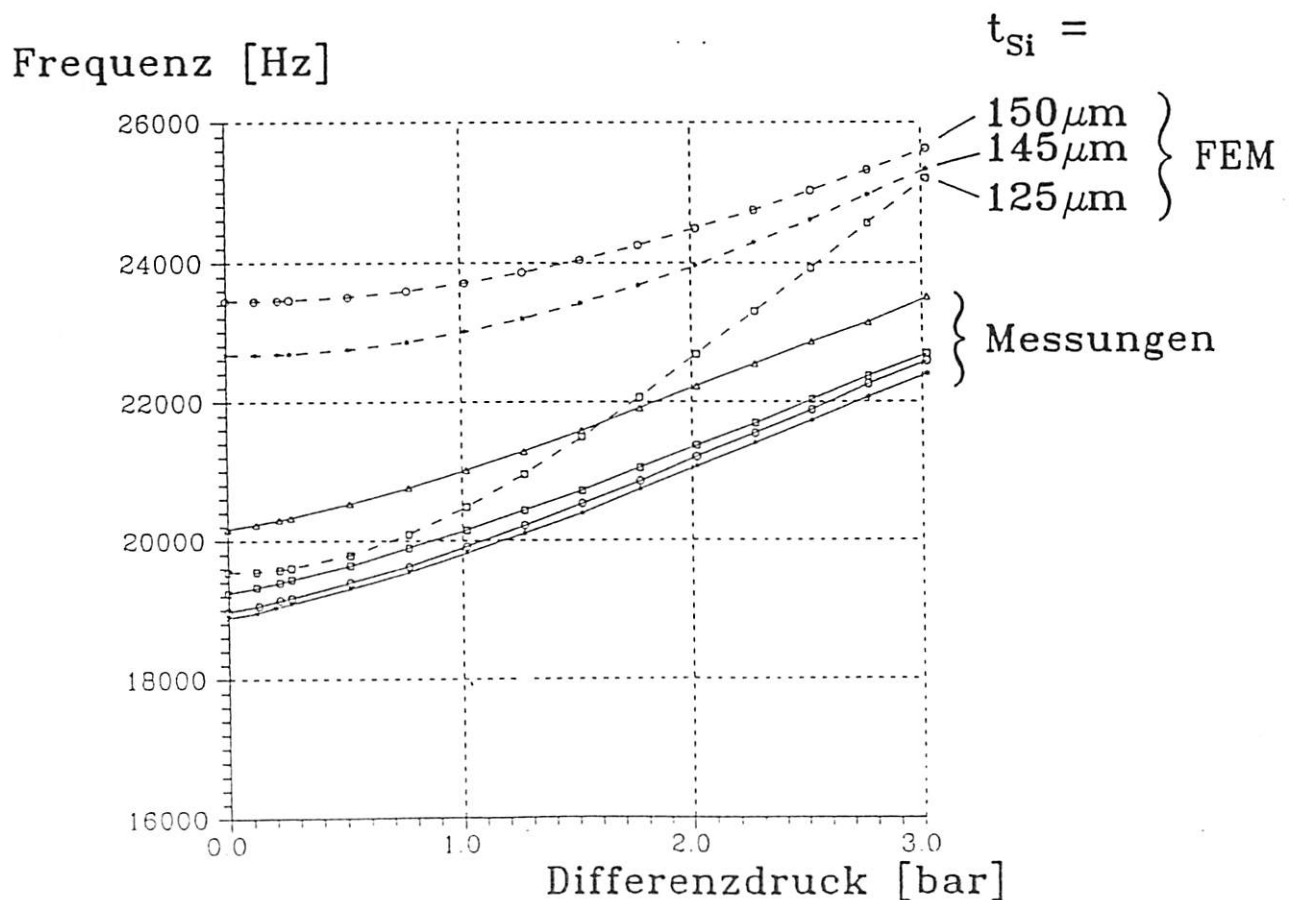


# Frequenzverschiebung bei Druckbeaufschlagung

Membranparameter:

Abm.:  $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$ ,

Gesamtdicke: Si =  $148 \mu\text{m}$ , ZnO =  $15 \mu\text{m}$



Frequenzempfindlichkeit:  
Frequenzshift infolge von  
innerer Schichtspannung:

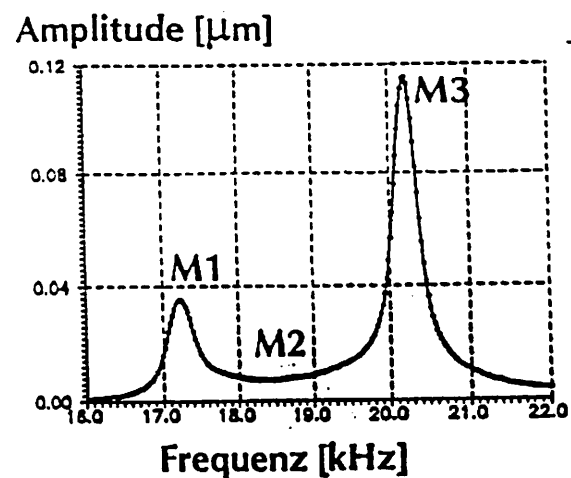
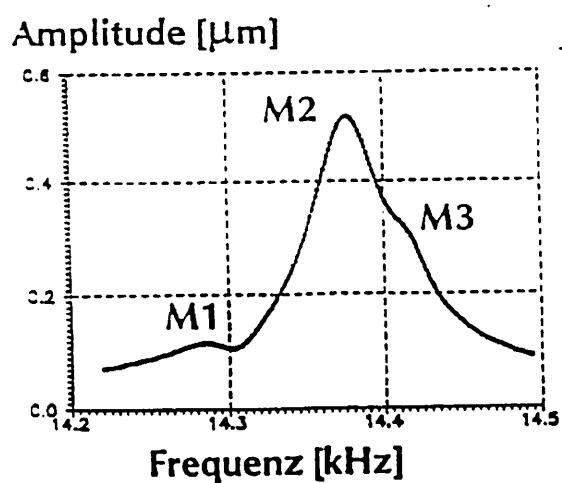
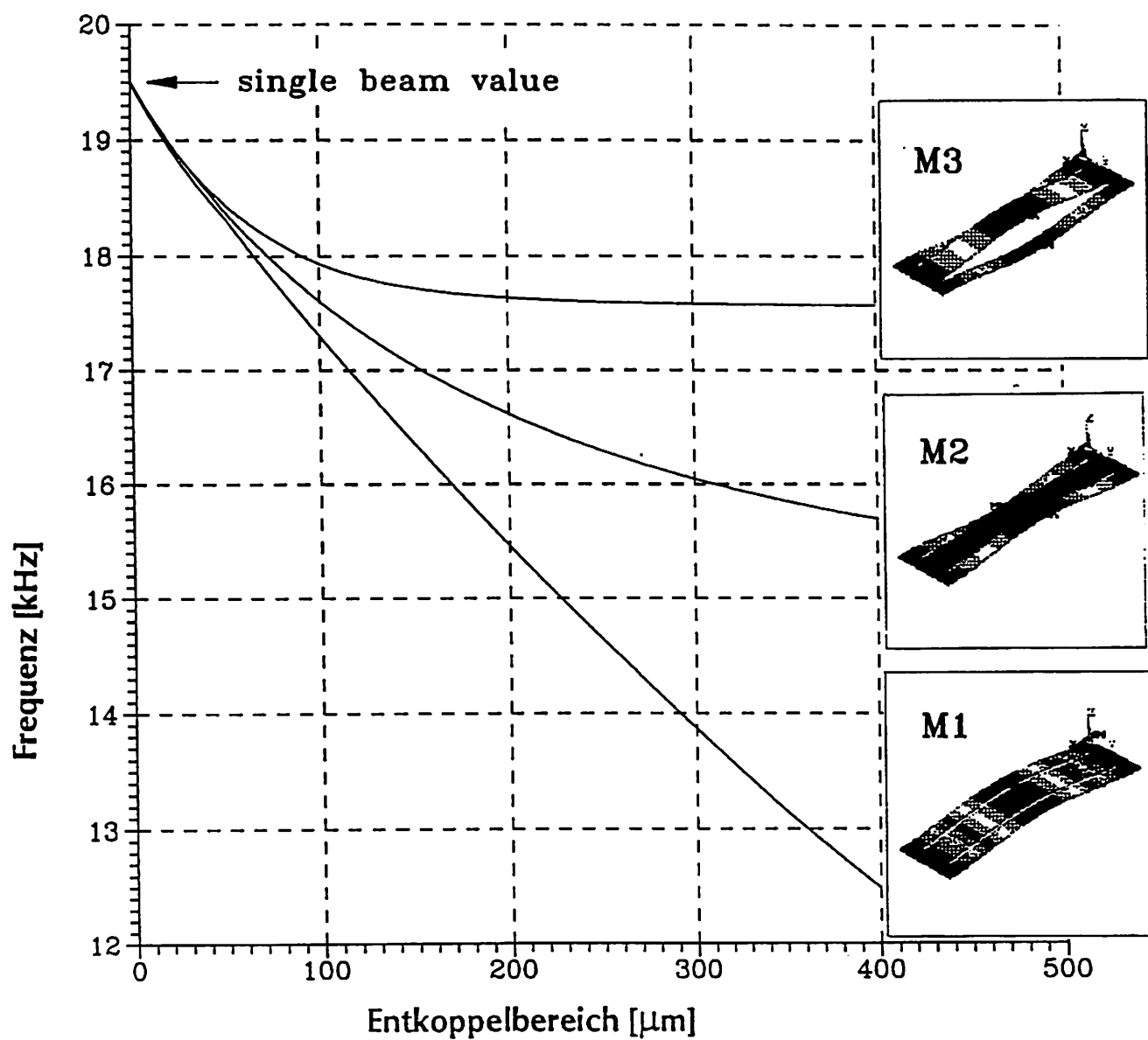
$$\Delta f / \Delta p \approx 1 \text{ Hz/mbar}$$

$$f = f_0 \sqrt{1 + c \cdot \sigma_{\text{int}}}$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{int}} \approx -100 \text{ MPa}$$

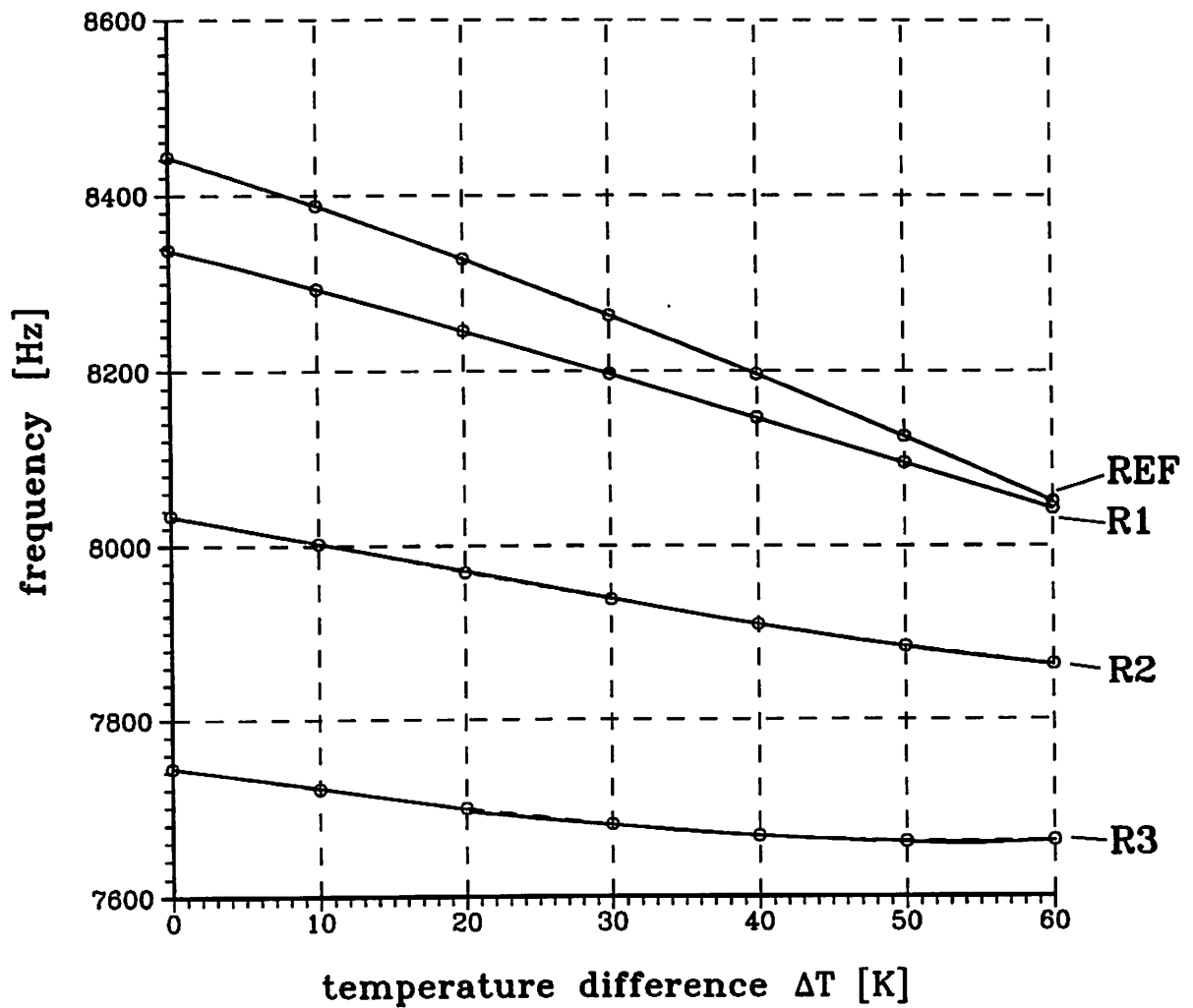
# Dreifachbalken-Resonatoren aus Silizium

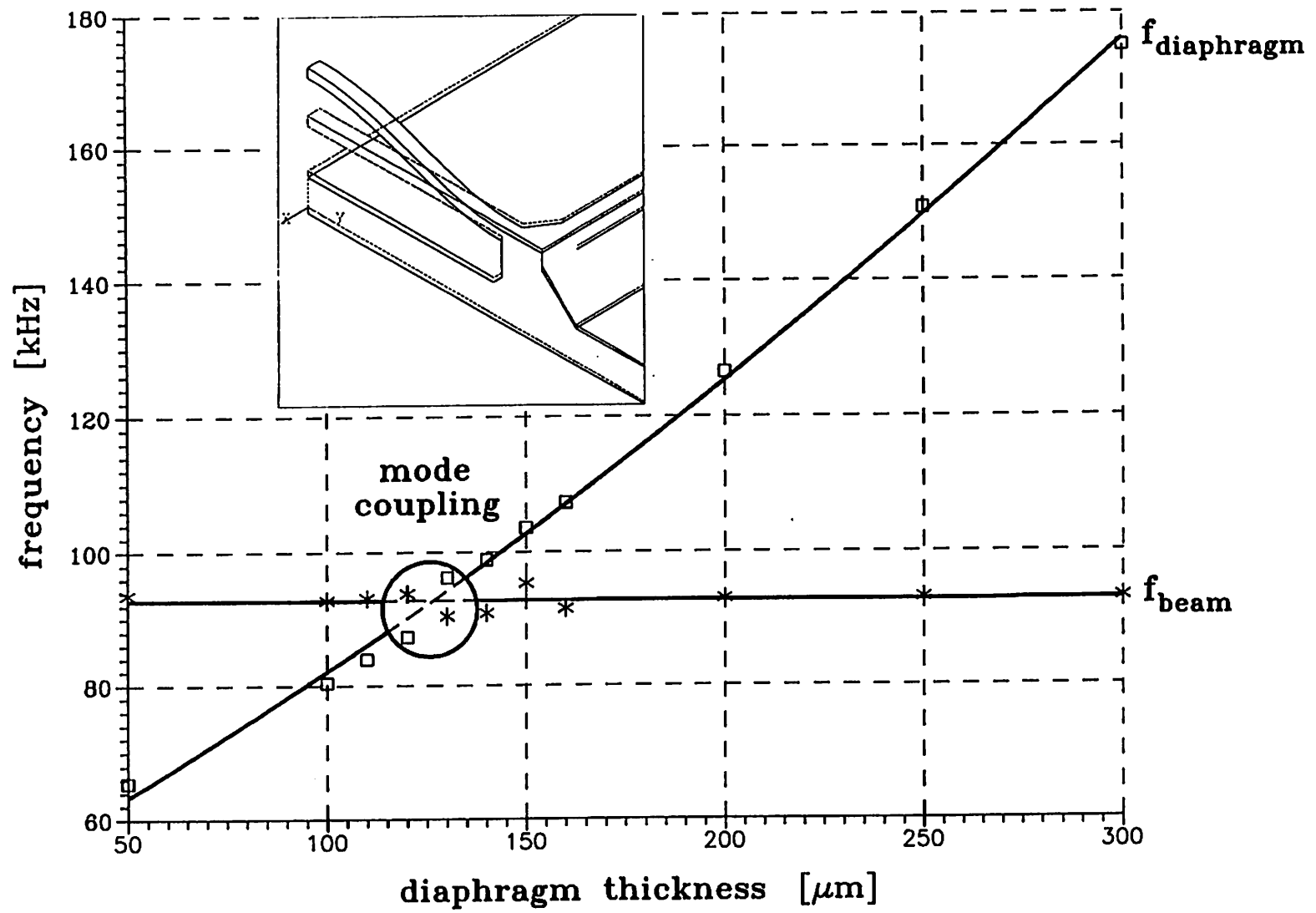
## Modenentkopplung





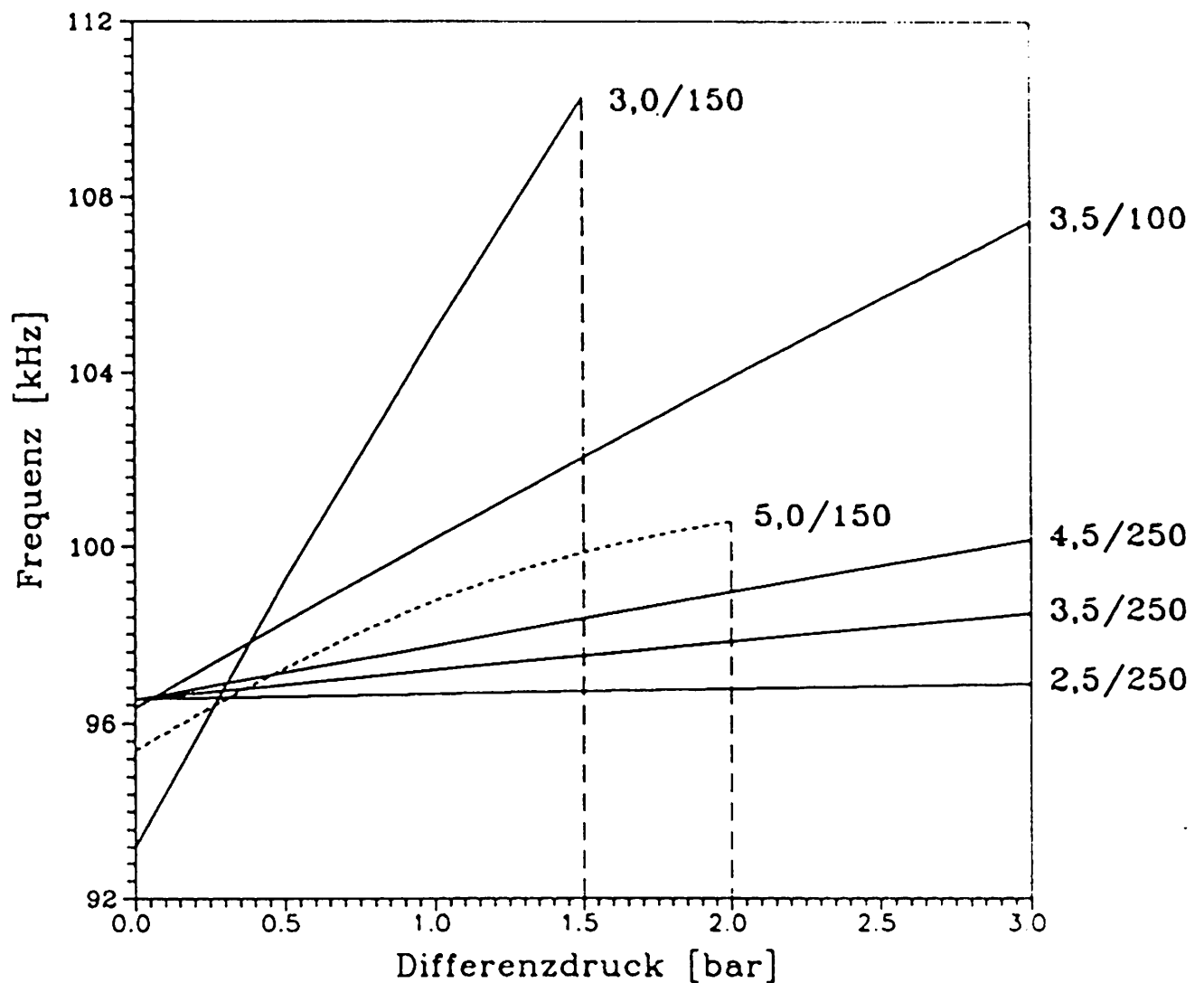
# Temperaturkompensation eines resonanten Membrandrucksensors





# BOD-Drucksensor: Geometrieeinfluß auf die Druckempfindlichkeit

Membranseitenlänge [mm] / Membrandicke [ $\mu\text{m}$ ]



## Literaturverzeichnis

- G. Stemme: Resonant silicon sensors, *J. Micromech. Microeng.* 1 (1991) 113-125
- H.A.C. Tilmans, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman: Micro resonant force gauges, *Sensors and Actuators A30* (1992) 35-53
- R.A. Buser: Resonant Sensors, in: *Sensors*, Vol. 7, Mechanical Sensors, ed. H.H. Bau, N.F. de Rooij, B. Kloeck (VCH, Weinheim, 1994) pp. 205-284
- S. Büttgenbach: *Mikromechanik* (Teubner, Stuttgart, 1991)
- A. Schumacher, M. Alavi, Th. Fabula, B. Schmidt, H.-J. Wagner: Monolithic bridge-on-diaphragm microstructure for sensor applications, *Proc. Micro System Technologies 94*, Berlin, 1994
- Th. Fabula, H.-J. Wagner, B. Schmidt, S. Büttgenbach: Triple-beam resonant silicon force sensor based on piezoelectric thin films, *Sensors and Actuators A41-42* (1994) 375-380
- H.A.C. Tilmans: Micro-mechanical encapsulated built-in resonant strain gauges, Ph.D. thesis (University of Twente, Enschede, 1993)
- K.J. Bathe: *Finite element procedures in engineering analysis* (Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 1982)
- J.G. Smits, H.A.C. Tilmans, K. Hoen, H. Mulder, J. van Vuuren, G. Boom: Resonant diaphragm pressure measurement system with ZnO on Si excitation, *Sensors and Actuators 4* (1983) 565-571
- A. Prak: *Silicon resonant sensors: operation und response*, Ph.D. thesis (University of Twente, Enschede, 1993)
- Th. Fabula, A. Schroth: *Simulation des dynamischen Verhaltens mikromechanischer Membranen*, VDI-Berichte 960 (VDI, Düsseldorf, 1992)
- H.L. Chau, K.D. Wise: Scaling limits in batch-fabricated silicon pressure sensors, *IEEE Trans. Electron Devices ED-34* (1987) 850-858
- D. Braess: *Finite Elemente* (Springer, Berlin, 1991)
- P. Kohnke (ed.): *ANSYS User's Manual for Revision 5.0, Volume IV, Theory* (Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, 1992)
- H. Allik, T.J.R. Hughes: Finite element method for piezoelectric vibration, *Int. J. Numerical Methods in Engineering 2* (1970) 151-157
- M. Alavi, Th. Fabula, A. Schumacher, H.-J. Wagner: Monolithic microbridges in silicon using laser machining and anisotropic etching, *Sensors and Actuators A37-38* (1993) 661-665
- Landolt-Börnstein: *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik*, Gruppe III, Band 17a (Springer, Berlin, 1982)
- Th. Fabula, N. Hey, S. Messner: Gekoppelte Feldberechnung eines mikromechanischen Strömungssensors, *Proc. 11. CADFEM Users' Meeting*, Bamberg (CADFEM GmbH, Grafing, 1993)
- Th. Fabula: *Dynamisches Verhalten mikromechanischer Strukturen - Finite Elemente Simulation zur Entwurfsunterstützung und deren meßtechnische Verifikation*, Ph.D. thesis (University of Bonn, 1994)
- R. Lerch: Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements, *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelect., Freq. Control UFFC-37* (1990) 233-247
- H.-J. Wagner, A. Schumacher, M. Alavi, T. Fabula, B. Schmidt: Monolithic bridge-on-diaphragm structure for pressure sensor applications, *Microsystem Technologies 1* (1995) 191-195