

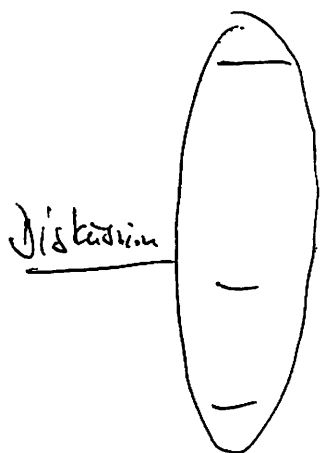
Resonante Sensoren:

- Schwingstypen, Frequenzen f_0
- Skalierung: f_0 , $\frac{\partial f}{\partial F}$, $\frac{\partial f}{\partial p}$, $\frac{\partial f}{\partial T}$
- Materialproblematik (Stress)

Ermüdung / Bruch

- Messung: Nodes, $A(x)$
Empf.: $\frac{df}{dp} \rightarrow \sigma_{int}$
(Membran, Balken.)

Schichtdickenoptimierung (t/t , Piezomater)
(Bsp.: Einfluß von Steps, Piezoparameter)



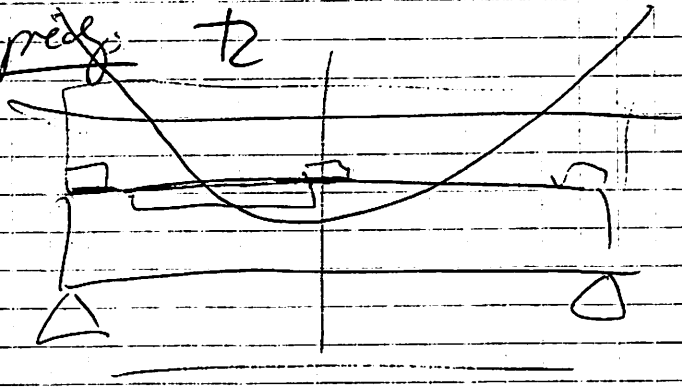
Einsparungsmöglichkeiten

Resonatorquerschnitte:

- Temp.einfluss: 1) Buckling
2) Kompensation
- Formelkram ...

Besprache T2

S. 2-93



1-3 um

- SiO_2 : amorph. 300-500 nm
gute Abs. (geringe GPa)

Haar	100
CTD	100

hoch, thermisch \rightarrow isotropisch
gibt nur auf Si-diekt.

Atem: raps, Raster-schichten punktuell.

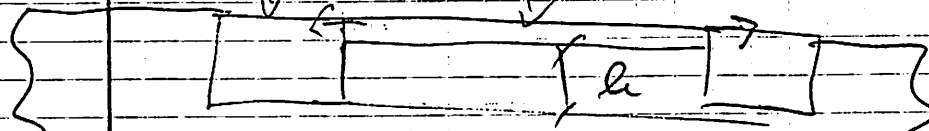
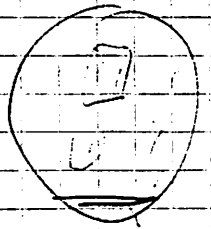
- Stöchiometrie: SiO_2 } techn. Parameter
 SiO_x } haben Einfluss

- Einzelprozess \rightarrow definiert.

Gesamtprozess: gegenseitige Beeinflussung
temp. Verhalten.

- Protok. die generellen Aussagen müssen
(Schichtarten, Temp. constraints, etc.)
 \rightarrow fest
von Standardprozessen ausgehen.

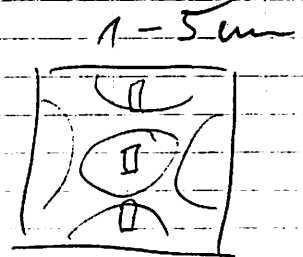
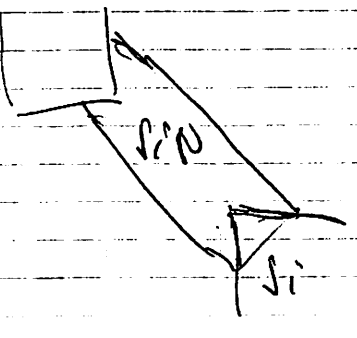
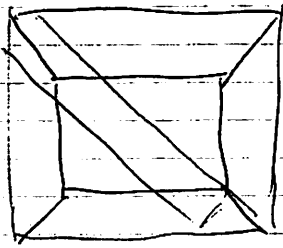
2-Schichtsystem:



(100)

45° gedreht.

Maßstäben d. fügen:



$t_{SiN} / t_{Met.}$

Metall: Cr, Al.

1) Var. t_{SiN}	$t_{Met.}$ const
2) const	var

30 - 100 nm

30/40/50/75/100 nm

$t_{SiN} = 2 \mu m$

17 Pa (flexile)

$t_{SiN} = 500 nm / 1 / 1.5$

$t_{Cr} = 30 nm$

Cr: Dicht $\approx 50 \pm 20 MPa$

amorph - polykristallin

SiN: amorph.

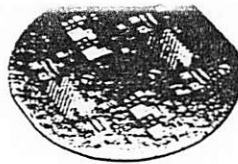
h : fester Kref 10 - 100 μm

$h_{krit} = \frac{1}{2} W \rightarrow 11 \mu m$

- Si dient als Stopp (\rightarrow elektrodennisch)

längs fest

- poly-Si auch



Mikromechanische Schwinger

• Mikromechanische Grundstrukturen

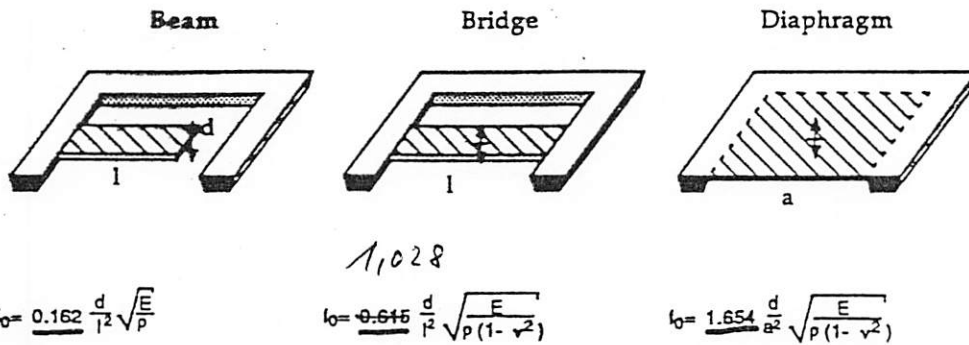


Figure 2. Three basic resonant structures and their fundamental flexural resonance frequencies, where E is Young's modulus, ρ is the density and ν is the Poisson's ratio

$$0,162 / 1,028 / 1,654 \hat{=} 1,0 / 6,35 / 10,21$$

• Verschiedene Schwingungsformen

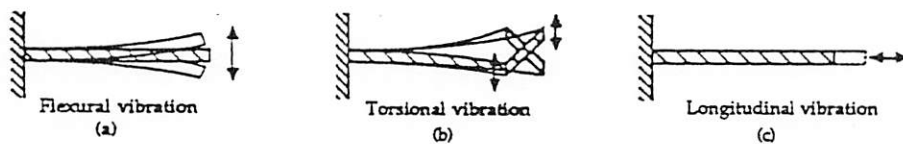


Figure 3. Cantilever beams in fundamental (a) flexural, (b) torsional and (c) longitudinal vibration modes.

• Biegeschwingungen und Oberwellen



Figure 4. Fundamental and two first overtones of flexural cantilever beam vibration.

Quelle: G. Stemme, J.Micromech.Microeng. 1 (1991)

① Frequenzen:

$$f_0 \approx c \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E'}{5}}$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad \begin{array}{l} \text{Balken} \\ \text{Membran} \end{array}$$

(Frage: $E' = E$)

Konstanten: $\left. \begin{array}{l} \text{Frage / Balken / Membran} \\ c = 0,162 / 1,028 / 1,654 \end{array} \right\} 1 / 6 / 10$

② Frequenzänderung:

a) Balken:
$$f = f_0 \sqrt{1 + 0,295 \left(\frac{l}{t}\right)^2 \frac{\sigma}{E'}}$$

Wobei: $\sigma = \frac{F}{A} + E \alpha \cdot \Delta T + \sigma_0$ mechan. Axialspannung in Resonanz

F : äußere Axialkraft

ΔT : Temperaturbelastung

σ_0 : innere Spannung (thin film stress)

lin. Näherung obiger Gleich (Taylorentwicklung):

$$\eta = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta F} = 0,148 \left(\frac{l}{t}\right)^2 \frac{\sigma}{E'} \quad \text{Kraftempfindlichkeit}$$

b) Membran:

$$f = f_0 \sqrt{1 + c \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2}$$

$$f = f_0 \sqrt{1 + 0,22 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \frac{\sigma}{E'}}$$

d = Membranzunahme
 c = Konstante

σ = mechan. Spannung
 a = Membranzunahme

Tabelle 2.1: Mechanische Materialeigenschaften mikromechanischer Werkstoffe

Material	E-Modul [10^{11} Pa]	Poisson-Zahl	Dichte [kg/m ³]	Innere Spannung [MPa]
Si-(100)	1,30	0,28	2330	86 (bordot.)
Si-(110)	1,69	0,063		
Si-(111)	1,88	0,26		
Quarz	0,88	0,12	2650	---
SiO ₂	0,70	0,17	2220	einige GPa (Plasma)
Si ₃ N ₄	1,40 - 3,89	0,30	3100	stressfrei
poly-Si	1,74	0,25	2330	10
Polyimid	0,03	0,30		
Pyrex	0,63	0,20	2230	
Al ₂ O ₃	3,10	0,24	3900	

Probleme:

- Temperaturabhängigkeit (RT = 20°C)
- anisotrope Eigenschaften: Definition der Poissonzahl
- Dichte abhängig von der Stöchiometrie
- innere Spannungen (Zug-, Druck und stressfrei)
- Abhängigkeit von Schichtdicke
- Prozeßparameter (Abscheiderate, Temperaturen, Gasdruck, Gaszusammensetzung)

Berechnung der Resonanzfrequenz der Grundbiegeschwingungsmode:

$$f = c \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E'}{\rho}} \quad \text{wobei: } E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

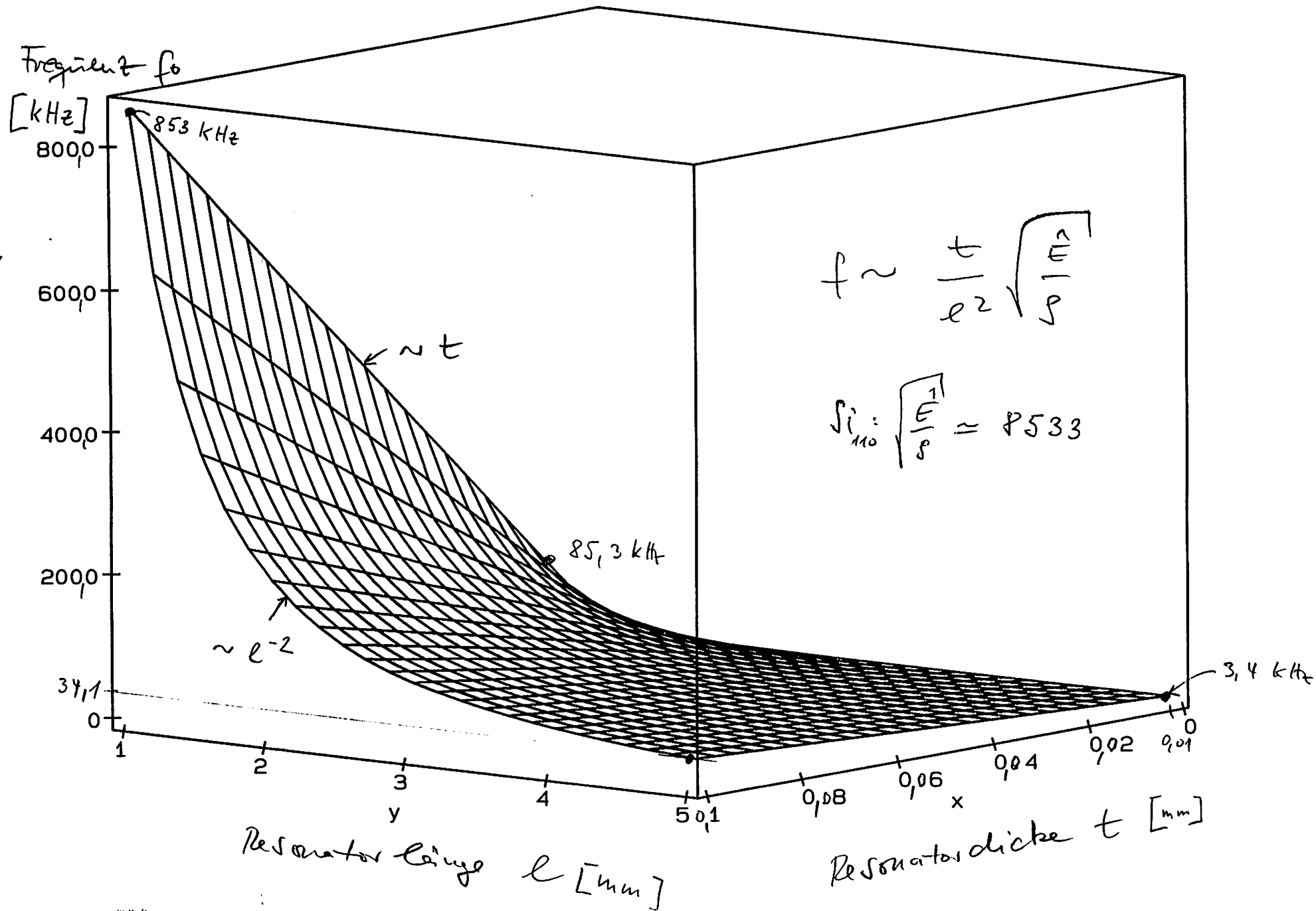
t, l : Resonatordicke, -länge

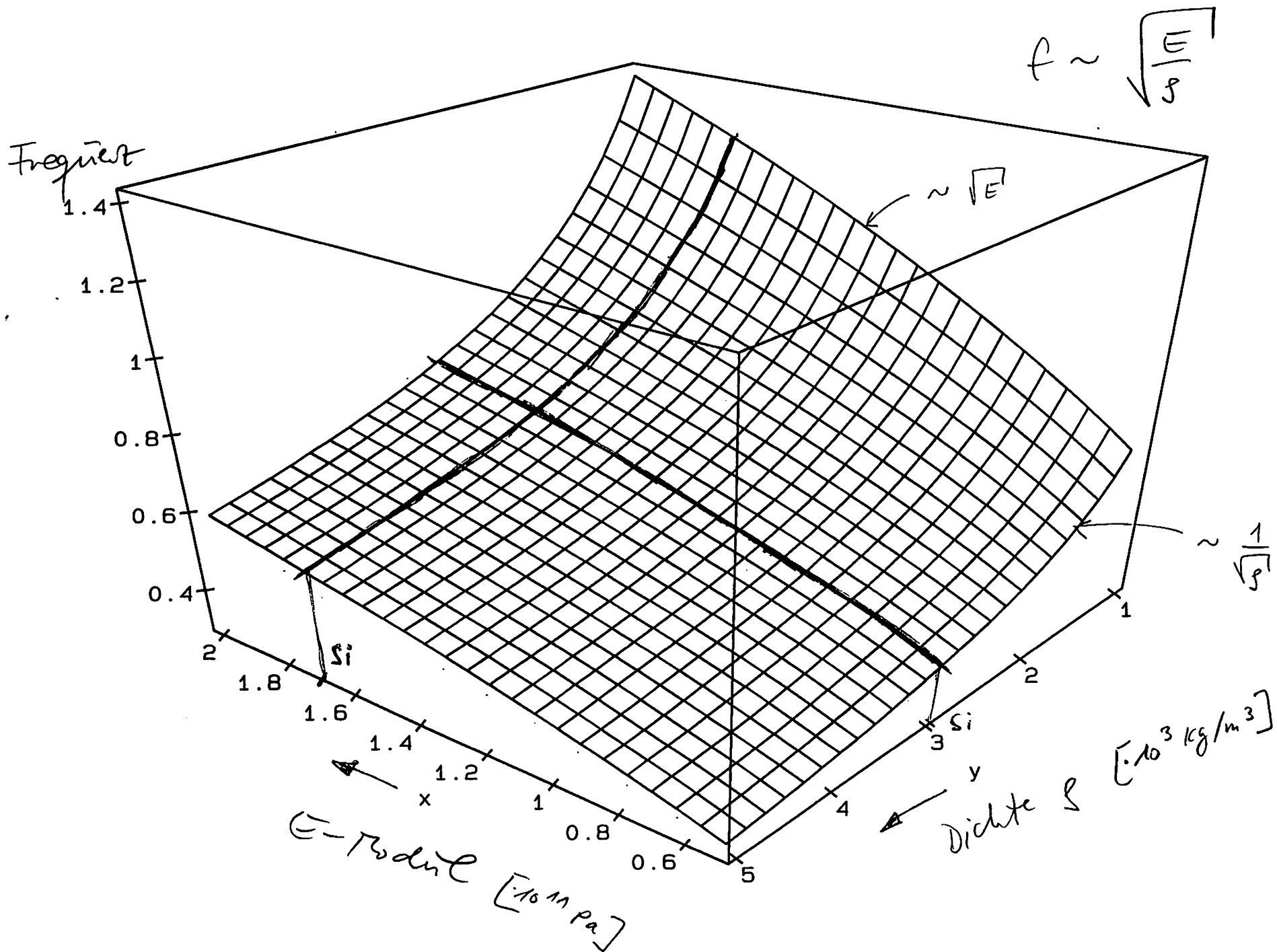
E, ν, ρ : E-Modul, Poissonzahl, Dichte

Die Tabellenwerte sind mit folgenden Konstanten zu multiplizieren:

- einseitig eingespannte Zunge: $c = 0,162$ ($E' = E$)
- doppelseitig eingespannter Balken: $c = 1,028$
- volleingespannte Membran: $c = 1,654$

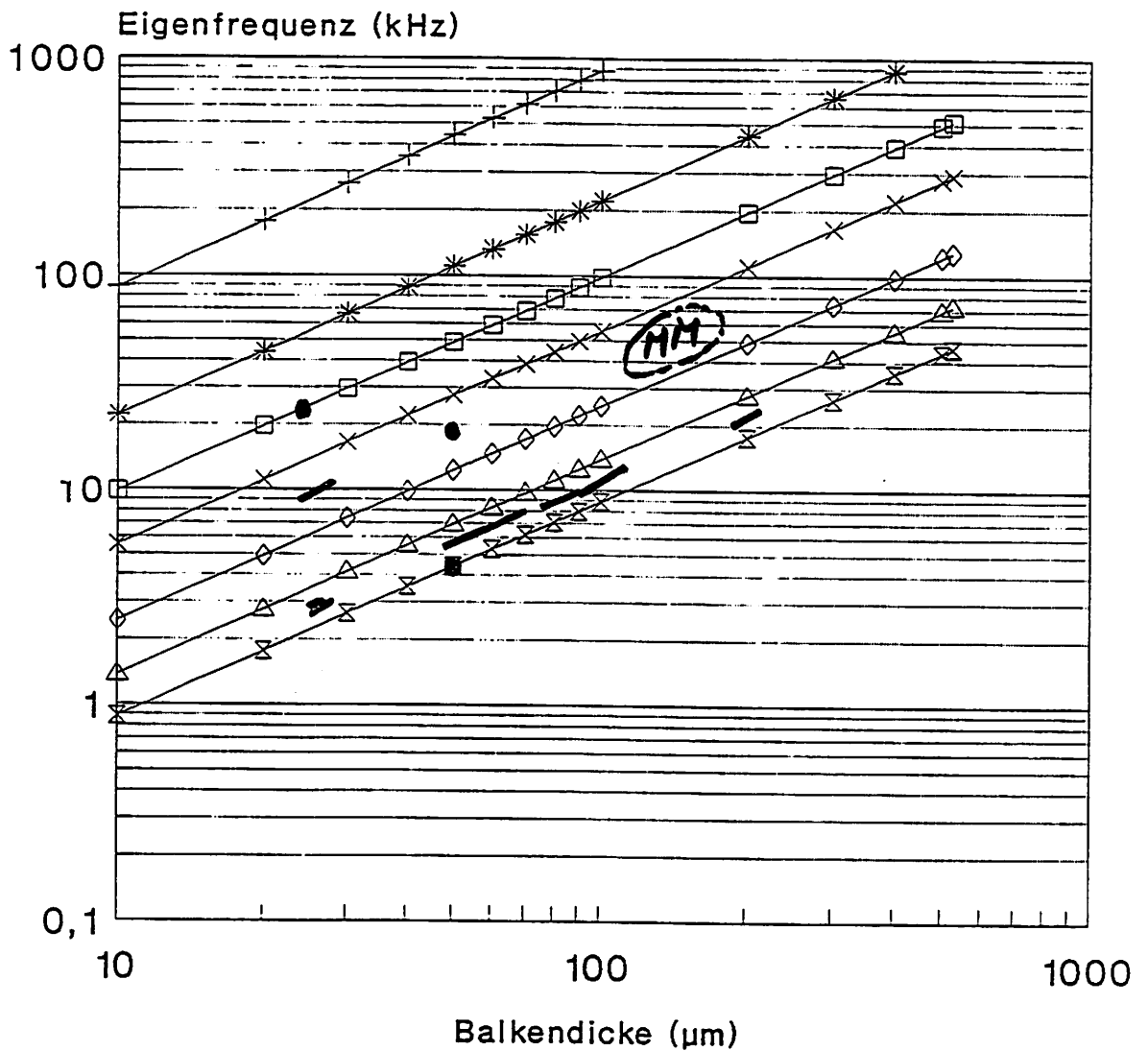
l/t Dicke t	10^1	10^2	10^3	10^4
$1 \mu\text{m}$	85,33 MHz (10 μm)	853 kHz (100 μm)	8,53 kHz (1 mm)	85 Hz (10 mm)
10 μm	8,53 MHz (100 μm)	85,3 kHz (1 mm)	853 Hz (10 mm)	8,5 Hz (10 cm)
100 μm	853 kHz (1 mm)	8,53 kHz (10 mm)	85 Hz (10 cm)	0,85 Hz (1 m)





Grundschwingung von Biegebalken

Frequenzanaloge Sensoren in Si



RB/ZWD/Schweikhardt 22.1.1991

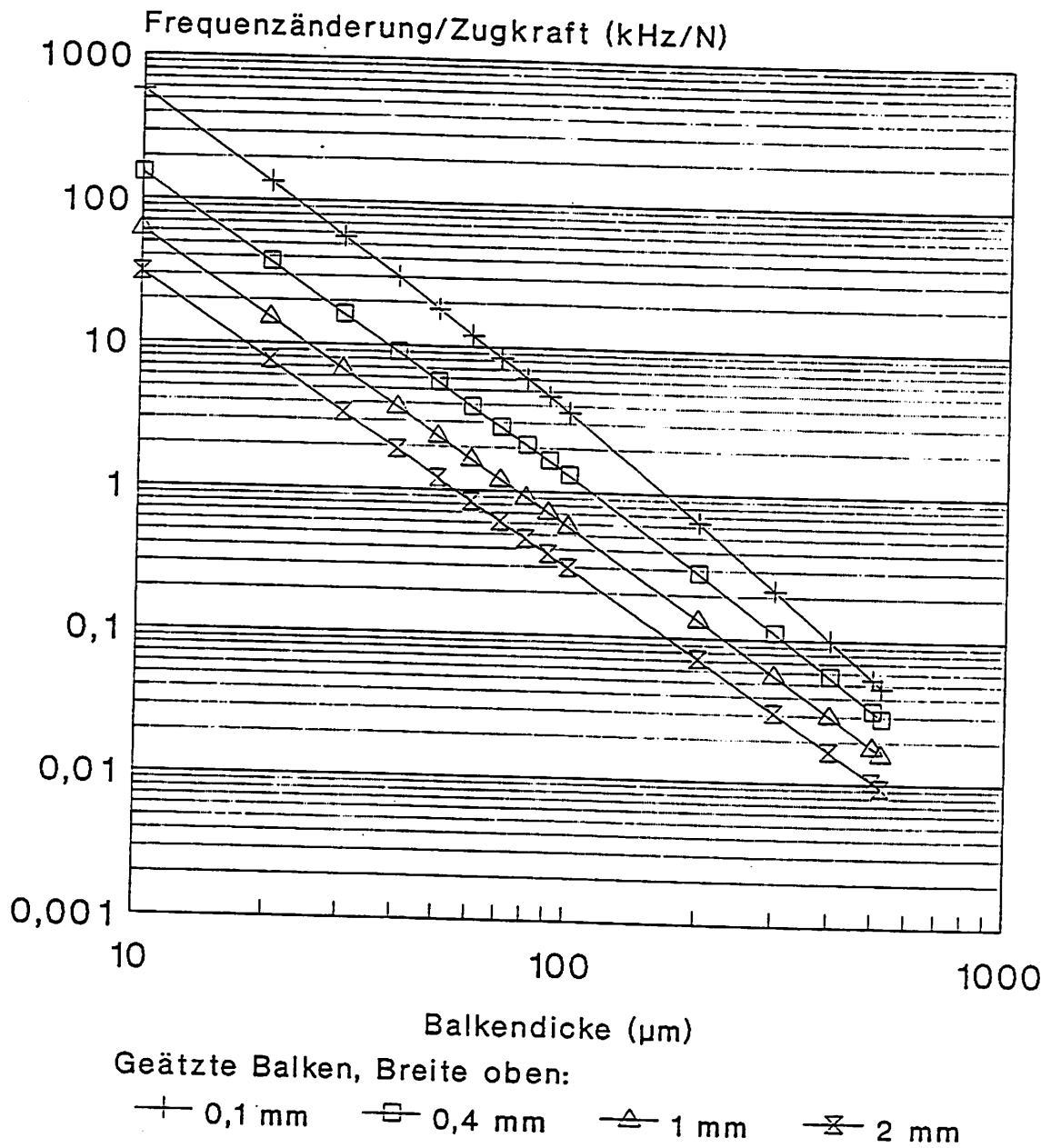
Benutzer:

— iMiT
 — Bosch
 --- MotoMeter

	l	t
• iMiT	3 mm	25 μm
• GMS	10 mm	50 μm
• Bosch	5 mm	50 μm

Abbildung 3

Zugempfindlichkeit von Biegebalken Frequenzanaloge Sensoren in Si

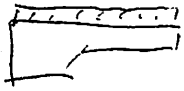


RB/ZWD/Schweikhardt 7.12.1990

Statisches Verhalten mechan. Fugen:

Auslenkungs-Konstanten e_{24} für einen Silizium-Balken mit ZnO-Schicht

h_{Si}	h_p	$L = 1 \text{ mm}$	2 mm	5 mm
$10 \text{ } \mu\text{m}$	$1 \text{ } \mu\text{m}$	$0,12 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,47 \text{ } \mu\text{m/V}$	$2,95 \text{ } \mu\text{m/V}$
	$5 \text{ } \mu\text{m}$	$0,06 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,26 \text{ } \mu\text{m/V}$	$1,60 \text{ } \mu\text{m/V}$
$20 \text{ } \mu\text{m}$	$1 \text{ } \mu\text{m}$	$0,03 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,13 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,82 \text{ } \mu\text{m/V}$
	$5 \text{ } \mu\text{m}$	$0,02 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,09 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,57 \text{ } \mu\text{m/V}$
$30 \text{ } \mu\text{m}$	$1 \text{ } \mu\text{m}$	$0,02 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,06 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,38 \text{ } \mu\text{m/V}$
	$5 \text{ } \mu\text{m}$	$0,01 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,05 \text{ } \mu\text{m/V}$	$0,29 \text{ } \mu\text{m/V}$



$$\delta \sim k \mu$$

Kraft-Konstanten e_{24}/e_{22} für einen Silizium-Balken mit ZnO-Schicht

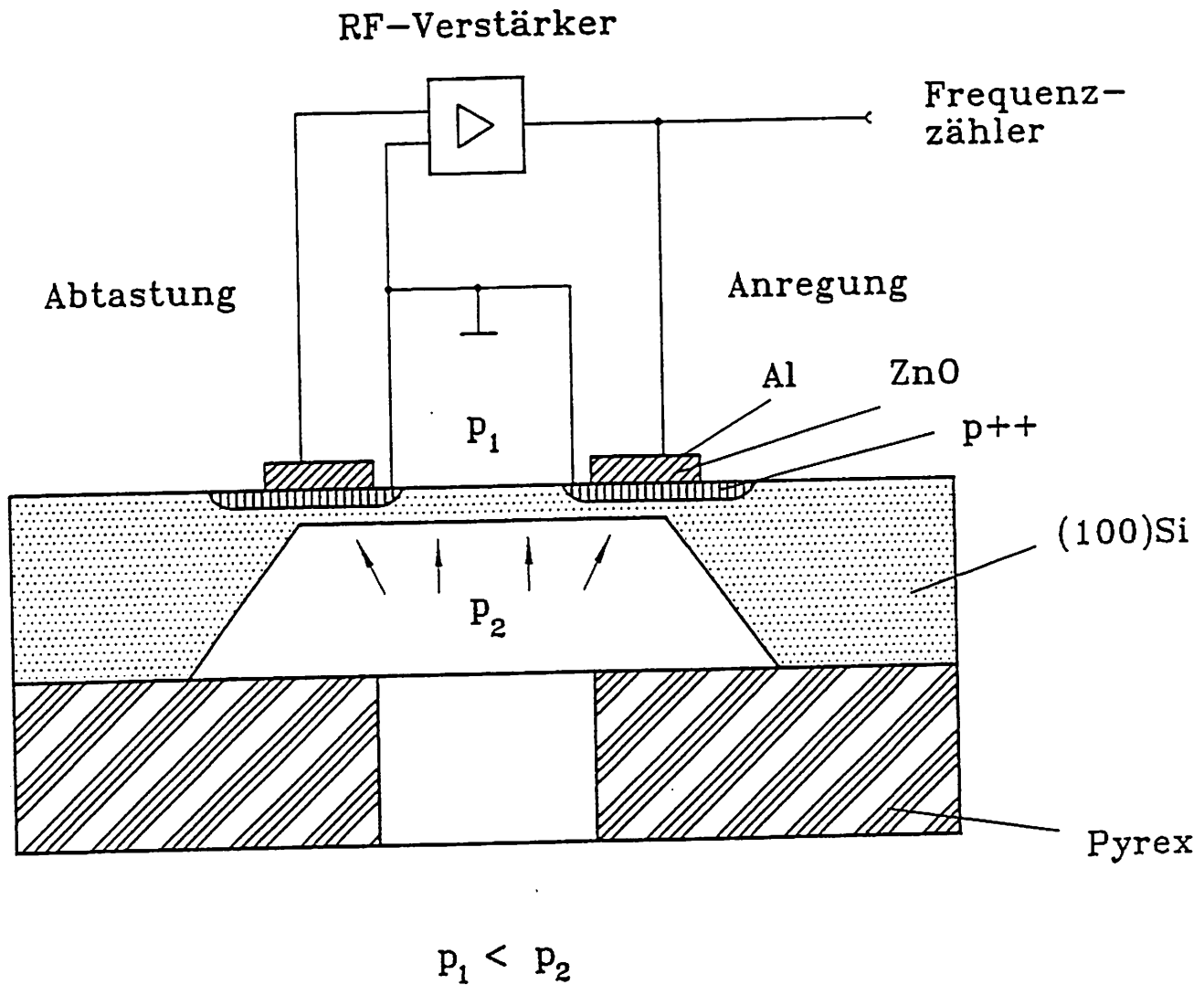
h_{Si}	h_p	$L = 1 \text{ mm}$	2 mm	5 mm
$10 \text{ } \mu\text{m}$	$1 \text{ } \mu\text{m}$	$2,43 \text{ } \mu\text{N/V}$	$1,22 \text{ } \mu\text{N/V}$	$0,49 \text{ } \mu\text{N/V}$
	$5 \text{ } \mu\text{m}$	$2,45 \text{ } \mu\text{N/V}$	$1,23 \text{ } \mu\text{N/V}$	$0,49 \text{ } \mu\text{N/V}$
$20 \text{ } \mu\text{m}$	$1 \text{ } \mu\text{m}$	$4,86 \text{ } \mu\text{N/V}$	$2,43 \text{ } \mu\text{N/V}$	$0,97 \text{ } \mu\text{N/V}$
	$5 \text{ } \mu\text{m}$	$4,88 \text{ } \mu\text{N/V}$	$2,44 \text{ } \mu\text{N/V}$	$0,98 \text{ } \mu\text{N/V}$
$30 \text{ } \mu\text{m}$	$1 \text{ } \mu\text{m}$	$7,29 \text{ } \mu\text{N/V}$	$3,64 \text{ } \mu\text{N/V}$	$1,46 \text{ } \mu\text{N/V}$
	$5 \text{ } \mu\text{m}$	$7,31 \text{ } \mu\text{N/V}$	$3,66 \text{ } \mu\text{N/V}$	$1,46 \text{ } \mu\text{N/V}$

$$F \sim \mu$$

Einfluß des Schichtsystems auf die Auslenkungen und Kräfte

Größe:	AlN	ZnO	PZT	Verhältnis	Dimension
$\delta_{\max} [\mu\text{m}]$	19,1	29,5	548	1/1,5/29	Variante 1 $U = 10 \text{ V}$
$F_{\max} [\mu\text{N}]$	3,8	4,9	81,7	1/1,3/22	
$\delta_{\max} [\mu\text{m}]$	0,34	1,0	11,5	1/2,9/34	Variante 2 $U = 50 \text{ V}$
$F_{\max} [\mu\text{N}]$	273	366	6500	1/1,3/24	

Resonanter Drucksensor



Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik

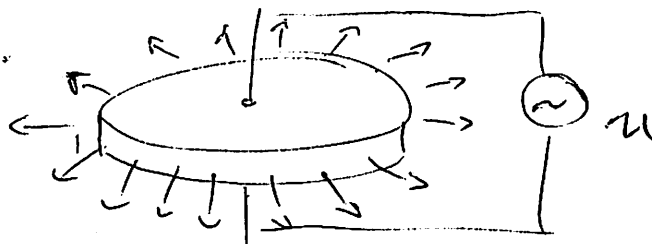
Abb. 1: Resonanter Silizium-Drucksensor

Tab.1: Materialeigenschaften mikromechanischer Werkstoffe

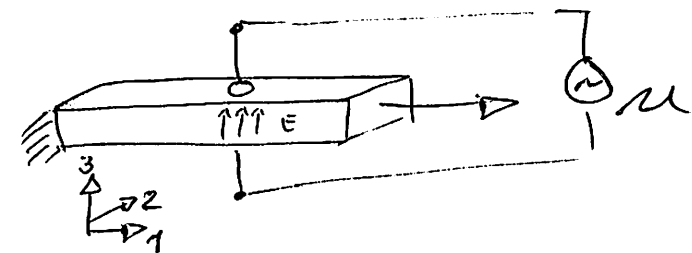
Bezugstemperatur: $T = 300 \text{ K}$

	ρ [kg/m³]	S_{11}^E/S_{12}^E [10^{-12} Pa^{-1}]	ν	d_{31} [10^{-12} C/N]	d_{33} [10^{-12} C/N]	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	α_{th} [10^{-6} K^{-1}]	λ [W/mK]	k_p^{mat}
Si	2329	7,68 -2,14	0,28	—	—	10711	10711	2,3 - 2,6	156	—
Quarz	2650	12,78 -1,81	0,14	$d_{11} = 2,30$	$d_{14} = -0,67$	4,51	4,63	$7,48 \parallel z$ $13,7 \perp z$	12	(0,1)
AlN	3260	3,53 -1,01	0,29	-2,00	5,53	9,04	11,4	$4,15 \parallel z$ $5,27 \perp z$	(?)	0,18
ZnO	5470	7,91 -3,30	0,42	-5,12	12,0	9,26	8,2	$2,92 \parallel z$ $4,75 \perp z$	54	0,40
PZT	7600	15,4 -5,70	0,37	-160	355	1600	1600	$\approx 7,0$	1,2	0,61

$$k_p^{mat} = \sqrt{\frac{2}{1-\nu}} \cdot k_{31} \approx 1,6 \dots 1,9 \cdot k_{31}$$



$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{S_{11}^E \cdot \epsilon_{33}^T}$$



Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Membrandicke

Vergleich: analytische Rechnung — FEM

$$E_{\text{SiO}_2} = 1,689 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$$

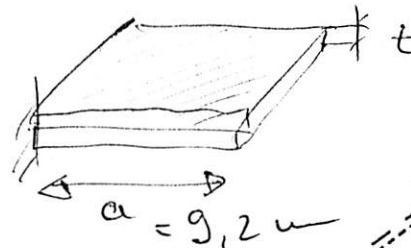
$$\nu_{\text{SiO}_2} = 0,063$$

$$\rho = 2329 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Frequenz [Hz]

$$f \sim \frac{t}{a^2} \cdot \sqrt{\frac{\hat{E}}{\rho}}$$

$$\hat{E} = \frac{E}{1 - \nu^2}$$



f_{bulk}

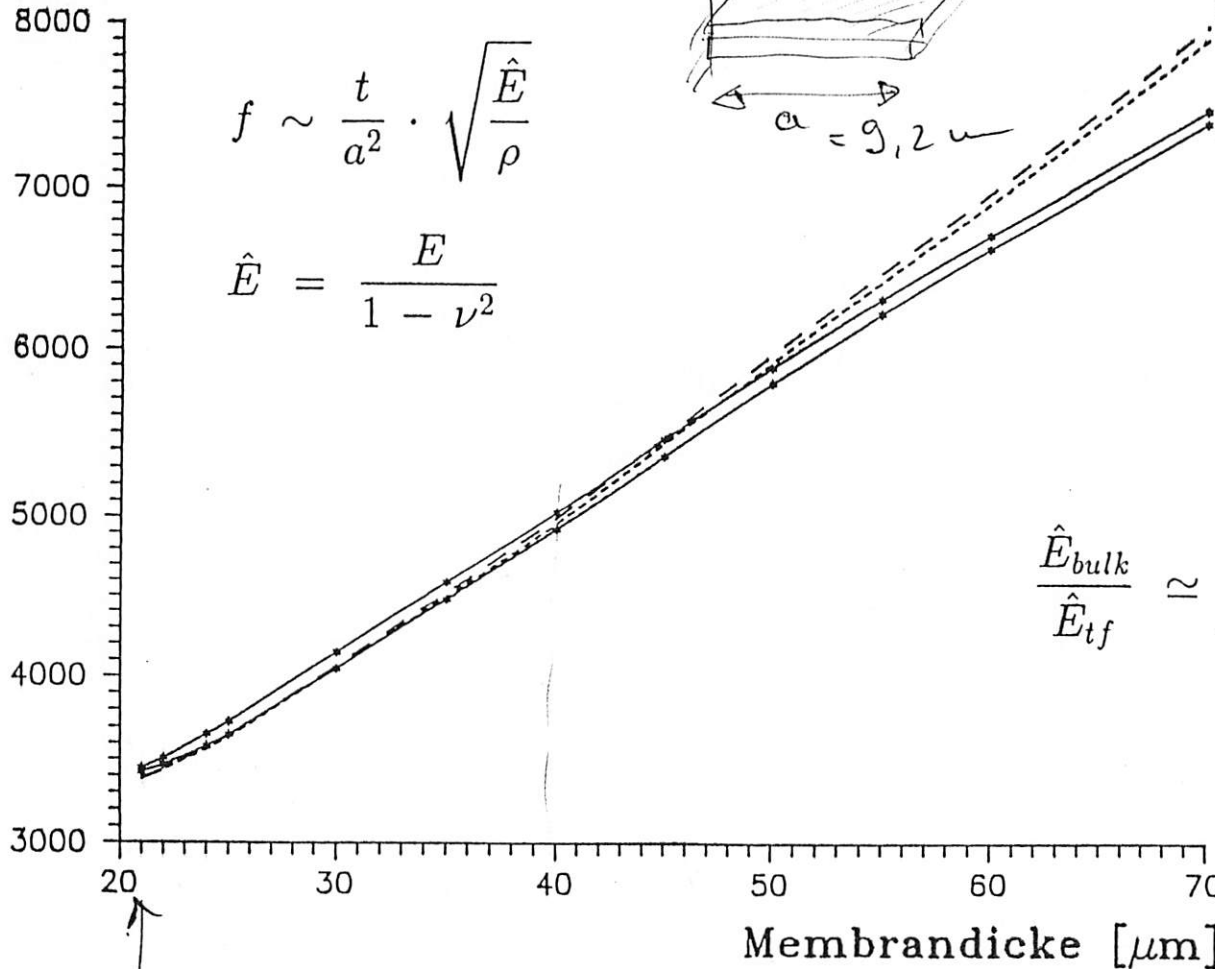
f_{tf}

} analytisch

f_p

f_s

} FEM



$$\frac{\hat{E}_{\text{bulk}}}{\hat{E}_{\text{tf}}} \approx \underline{1.13} : \text{Indenkr-Messungen}$$

an $t_{\text{SiO}_2} \approx 2,5 \mu\text{m}$

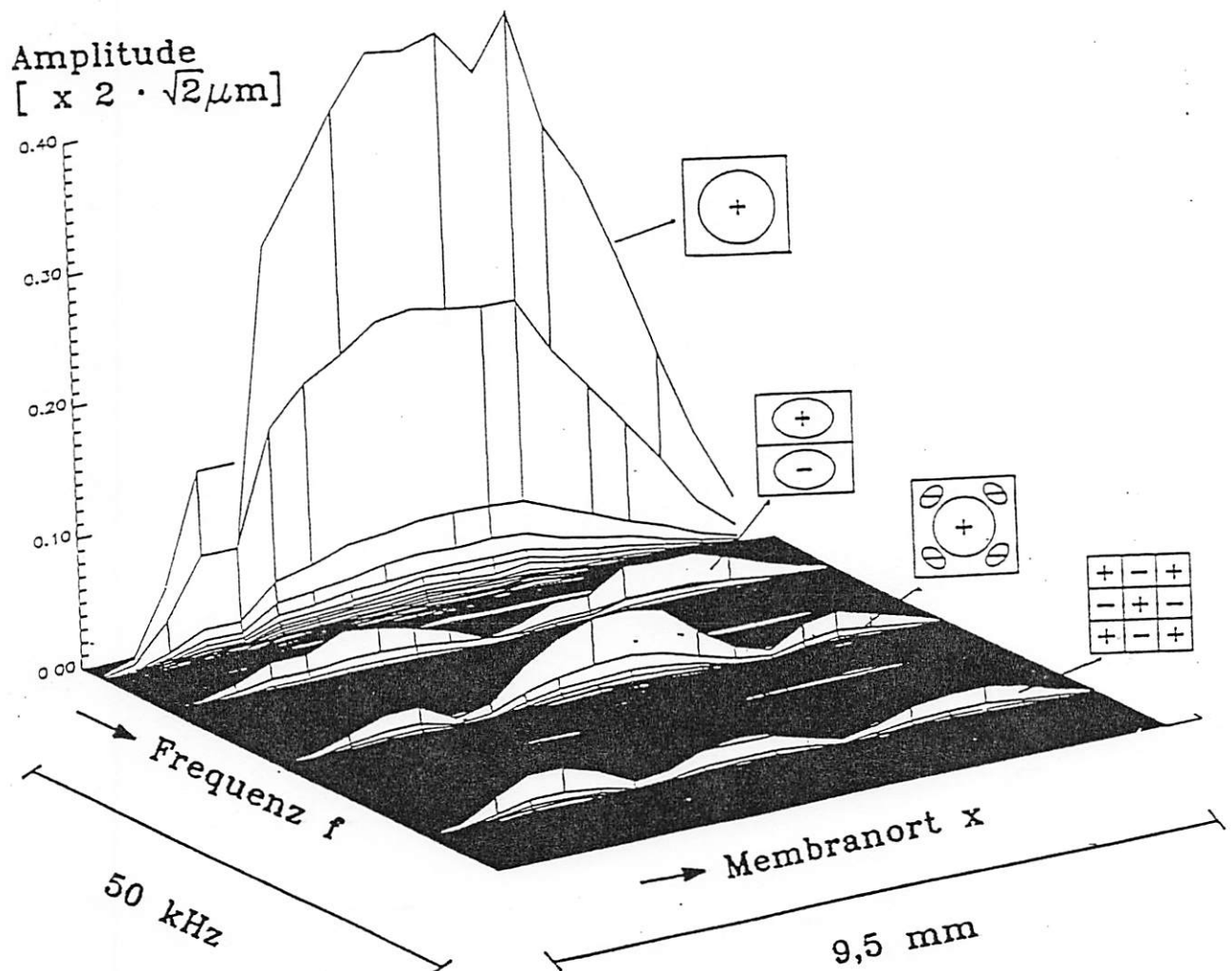
(FlG-iWM, Freiburg Dr. Olaf)

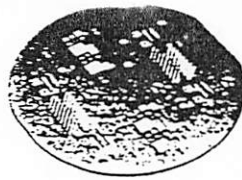
$t_{\text{Si}} = 20 \mu\text{m}$

Modalanalyse einer Siliziummembran

Amplitudenspektrum $A(f, x)$

Membran: M7-2/3
9.2 x 9.2 mm²
 $t_{Si} = 50 \mu m$
 $t_{ZnO} = 15 \mu m$
(Bosch-Membran)





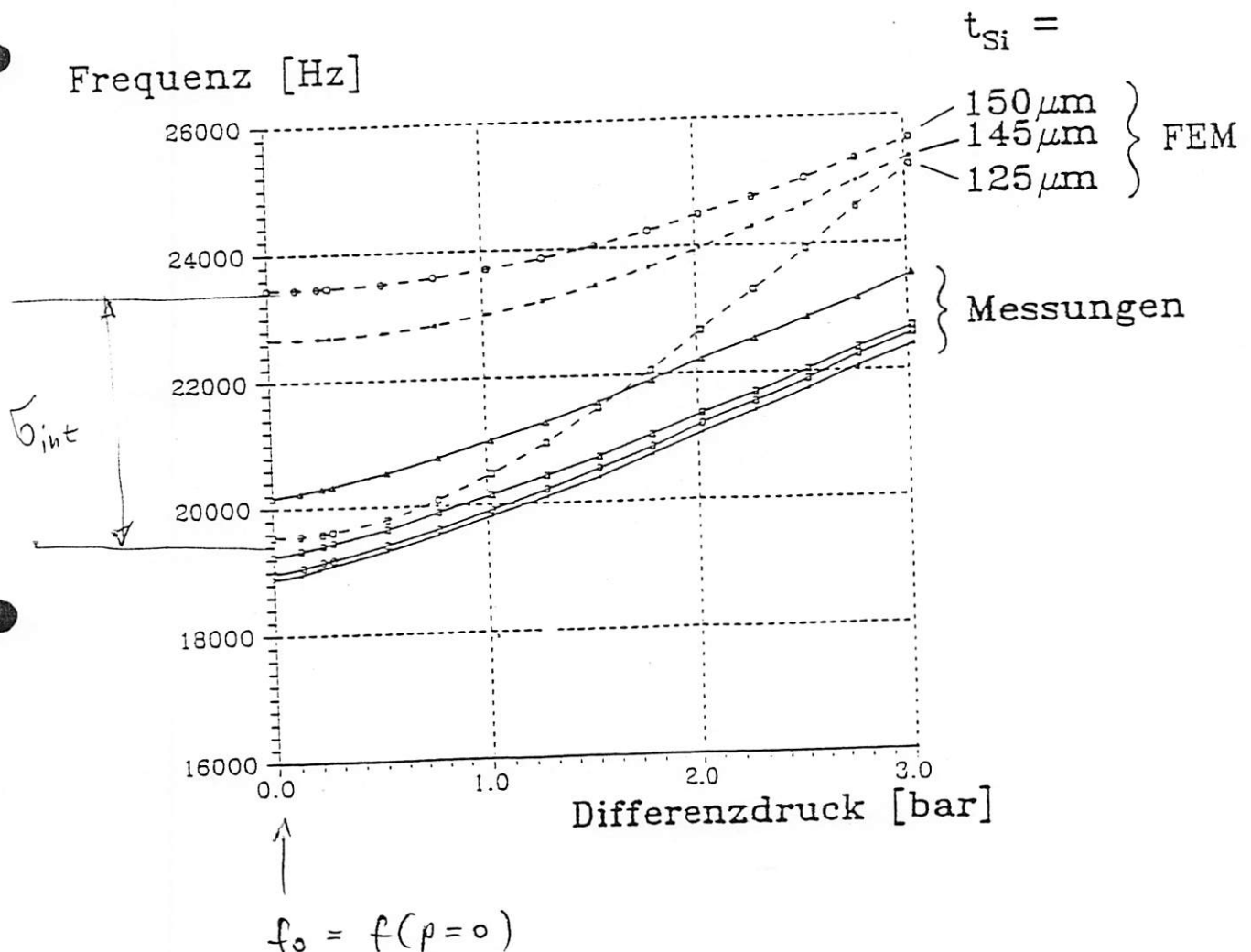
Frequenzverschiebung bei Druckbeaufschlagung

Membranparameter:

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

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

BOSCH



Frequenzempfindlichkeit:
Frequenzshift infolge von
innerer Schichtspannung:

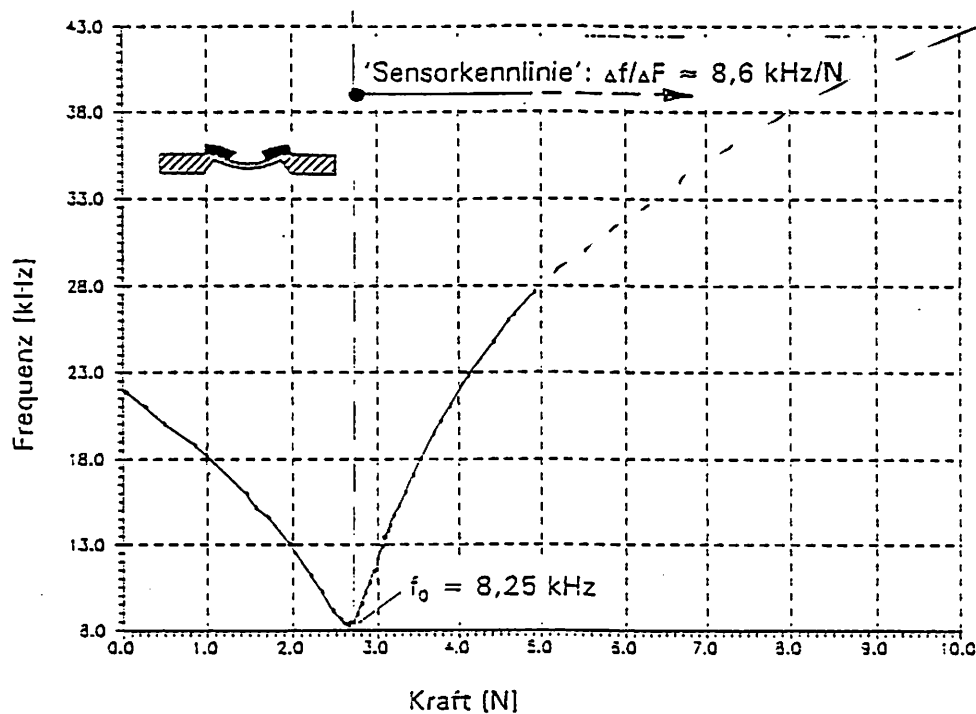
$$\Delta f / \Delta p \approx 1 \text{ Hz/mbar}$$

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

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

Dreifachbalken:

FAS Wafer 2.40



Kraft/Frequenz-Kennlinie einer Dreifachbalkenstruktur im Mode M3. Der Verlauf der Kennlinie zeigt einen Buckling-Effekt der ZnO-Schicht.

Draso 2 : $l = 3 \mu\text{m}$ (20% ZnO, HSG)

$t_{\text{Si}} = 25 \mu\text{m}$ $t_{\text{ZnO}} = 2,5 \mu\text{m}$

$$\frac{l}{t} = \frac{3 \mu\text{m}}{27,5 \mu\text{m}} \approx 110$$

$$f_0(\text{Si}) \approx 1,028 \cdot \frac{27,5 \mu\text{m}}{(3 \mu\text{m})^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 26,8 \text{ kHz}$$

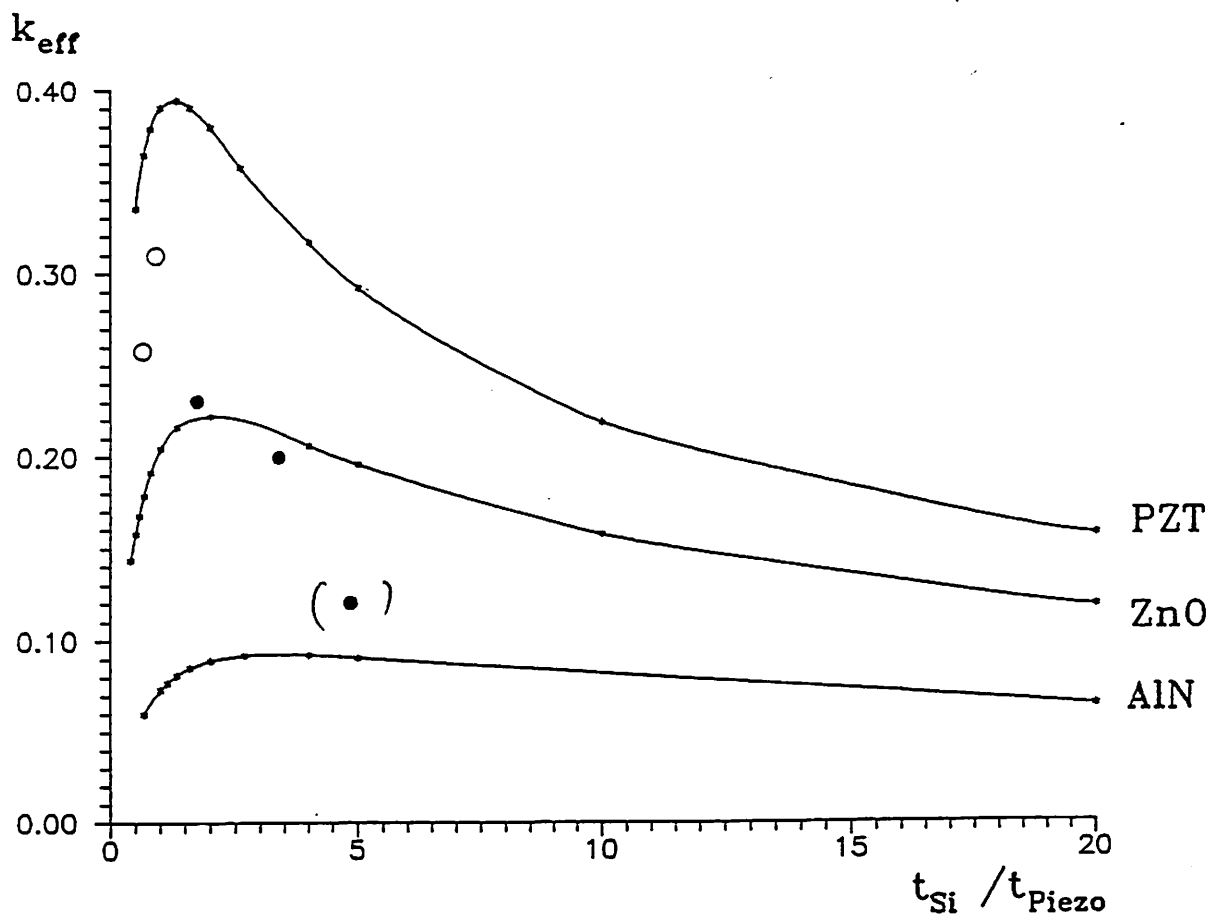
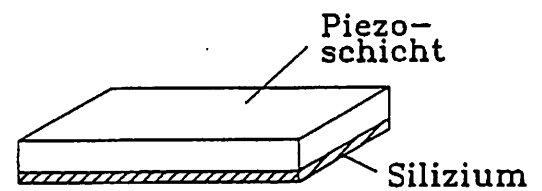
$$f_0(\text{Si-ZnO}) \approx 25,1 \text{ kHz} \rightarrow \sigma = 23,4 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{gemessen}} = 22 \text{ kHz} \rightarrow \text{Abschätz: } 3,1 \text{ kHz}$$

$$\text{Abschätz d. inneren Spannung: } \boxed{\sigma < 15 \text{ MPa}}$$

Kopplungsfaktor in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses

Membran: $9.2 \times 9.2 \text{ mm}^2$
 $t_{\text{Si}} = 20 \mu\text{m}$



Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik

Abb. 6:

Elektromechanischer Kopplungsfaktor in Abhängigkeit
des Schichtdickenverhältnisses

Elektromechanische Kopplungsfaktoren in Abh. von den relativen Materialdicken ZnO/Si-Membranen, strukturiert

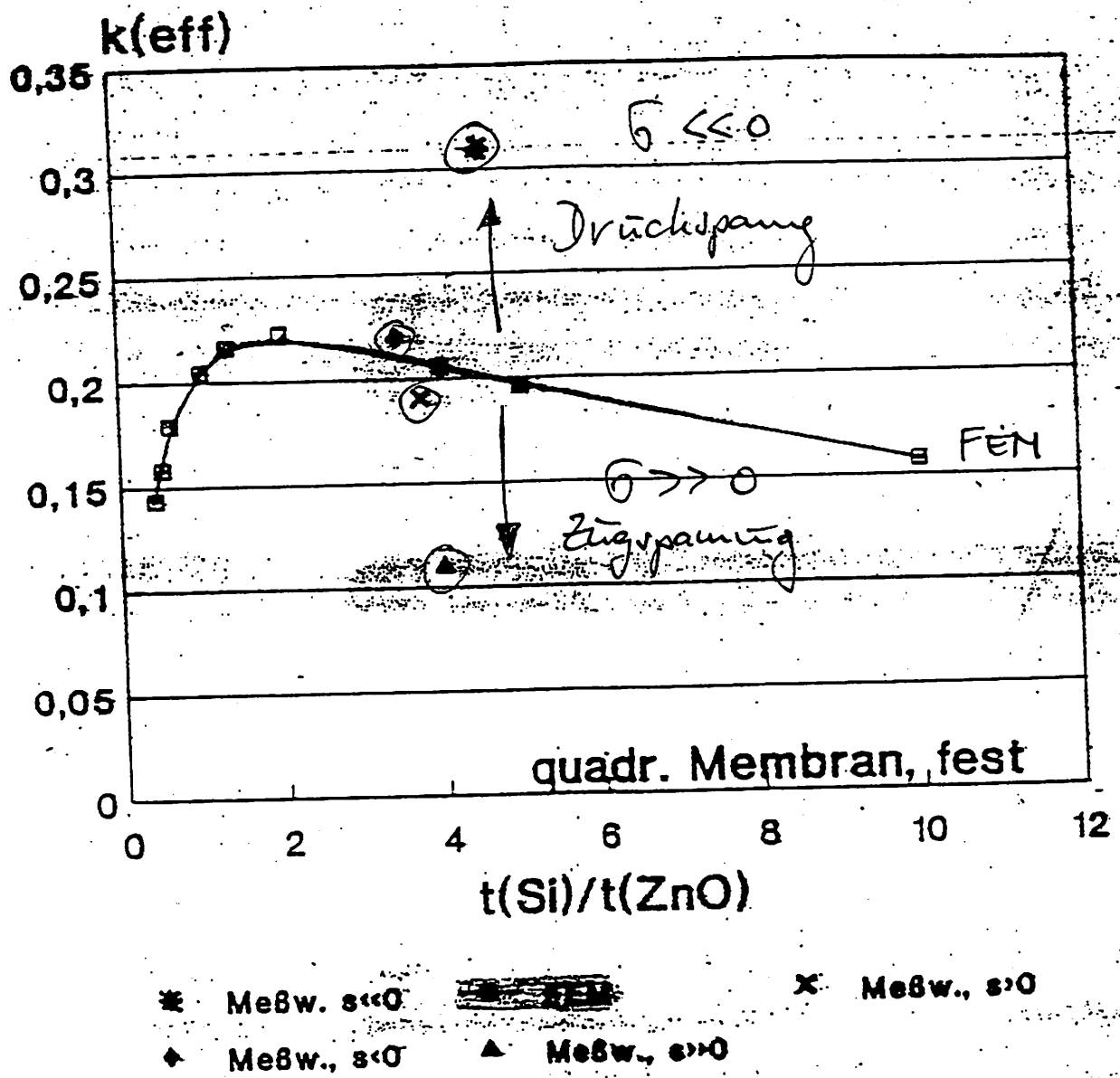
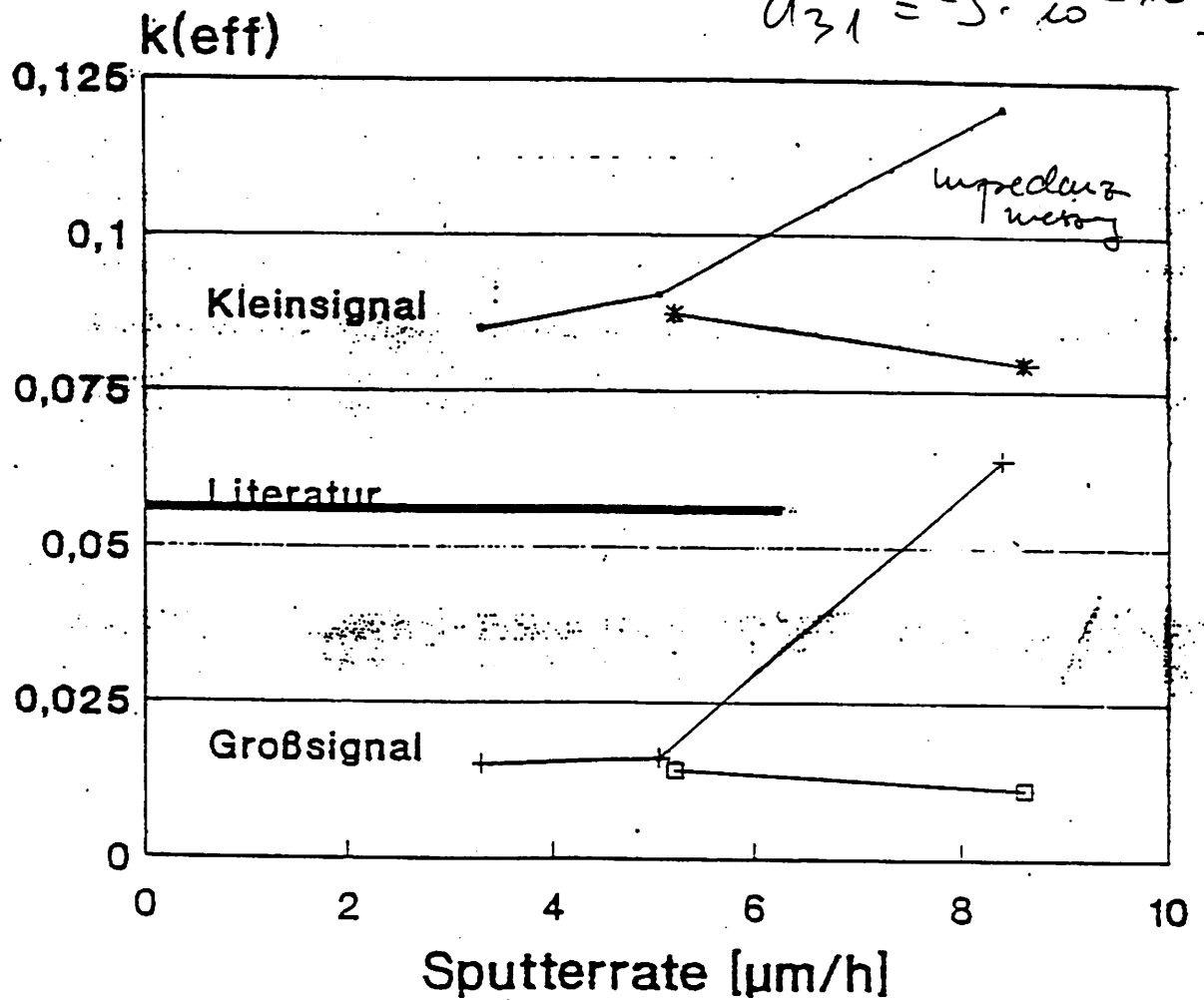


Abb. 21 Meßwerte für unterschiedliche Schichtspannungen

Effektive Kopplungsparameter von ZnO/Si-Biegeezungen

$b = 5\text{ mm}$, $l = 7\text{ mm}$, $d(\text{Si}) = 124\text{ }\mu\text{m}$

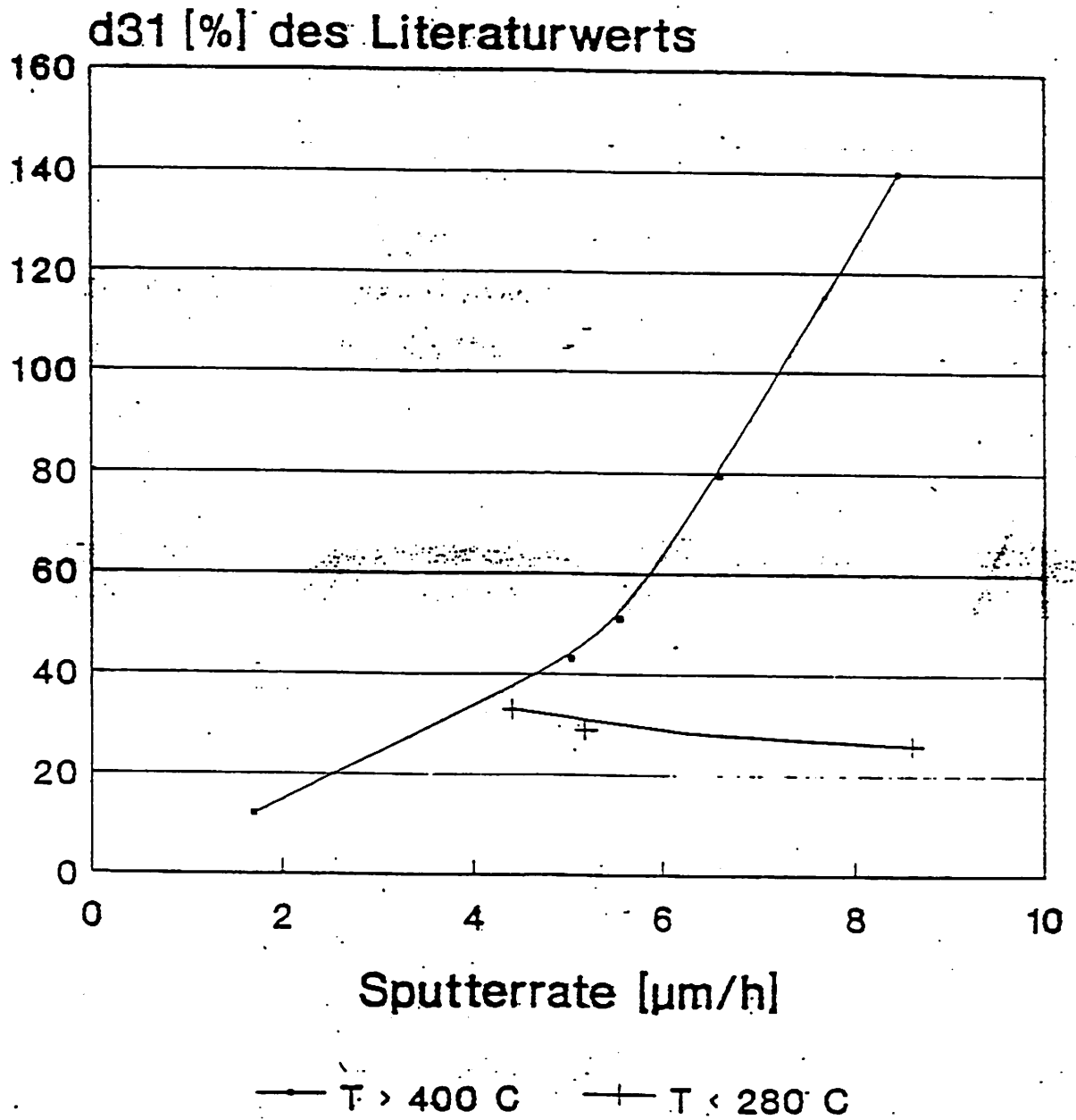
$$d_{31} = -5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}}$$



- Impedanz T1
- * Impedanz T2
- + Hub T1
- Hub T2

Vergleich von Groß- und Kleinsignal
messungen

Reaktives Magnetronspütern von ZnO Einfluß von Substrattemp. und Sputter- rate auf piezoelektr. Konstante d31.



BOSCH



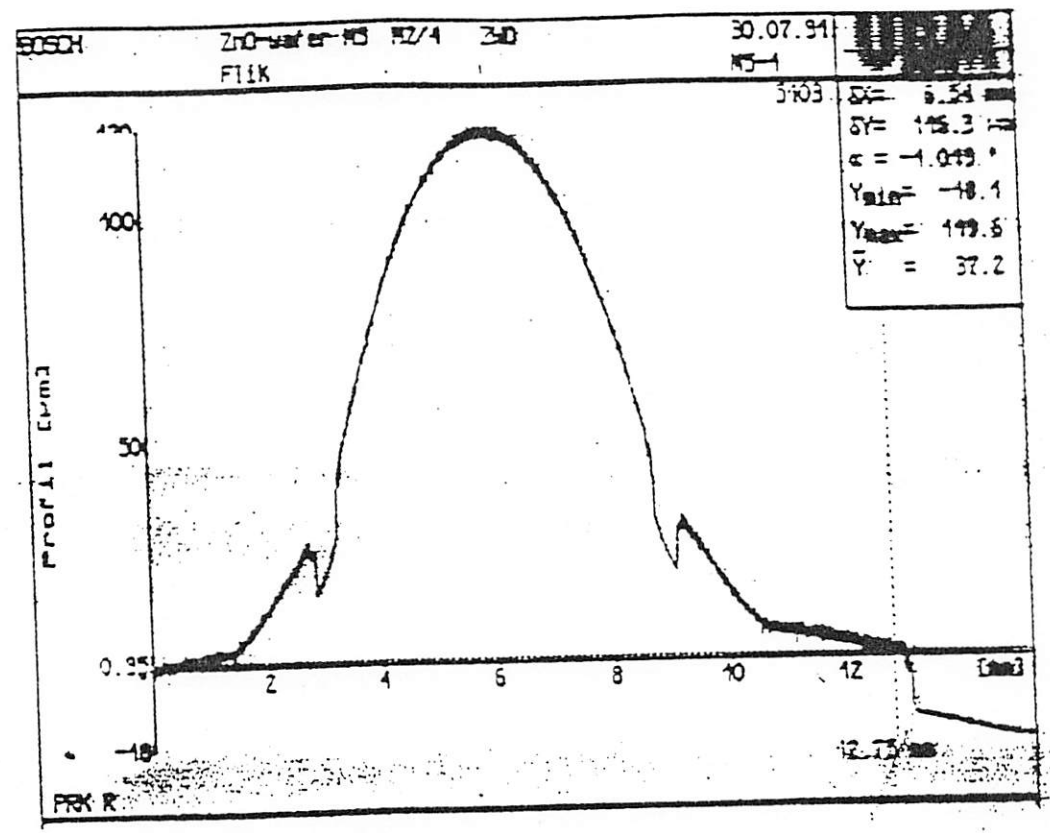
ZND

Krümmungen von ZnO/Si-Membranen

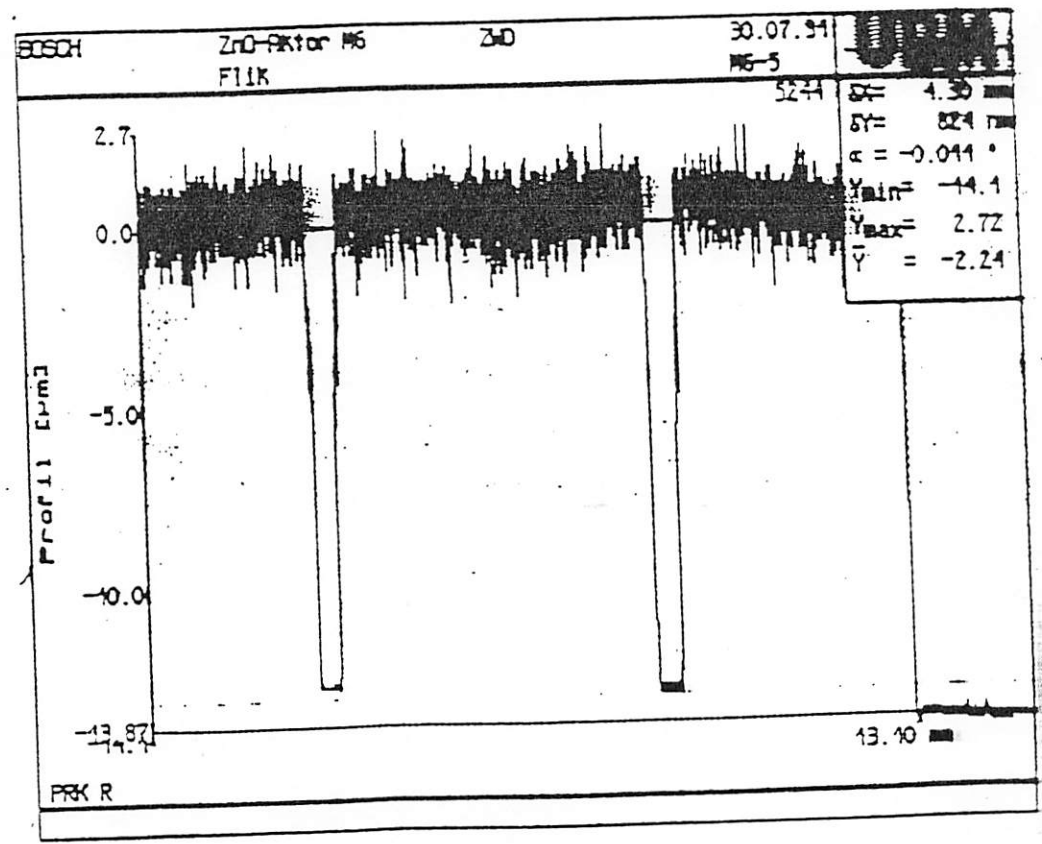
Nov. 91

Tag

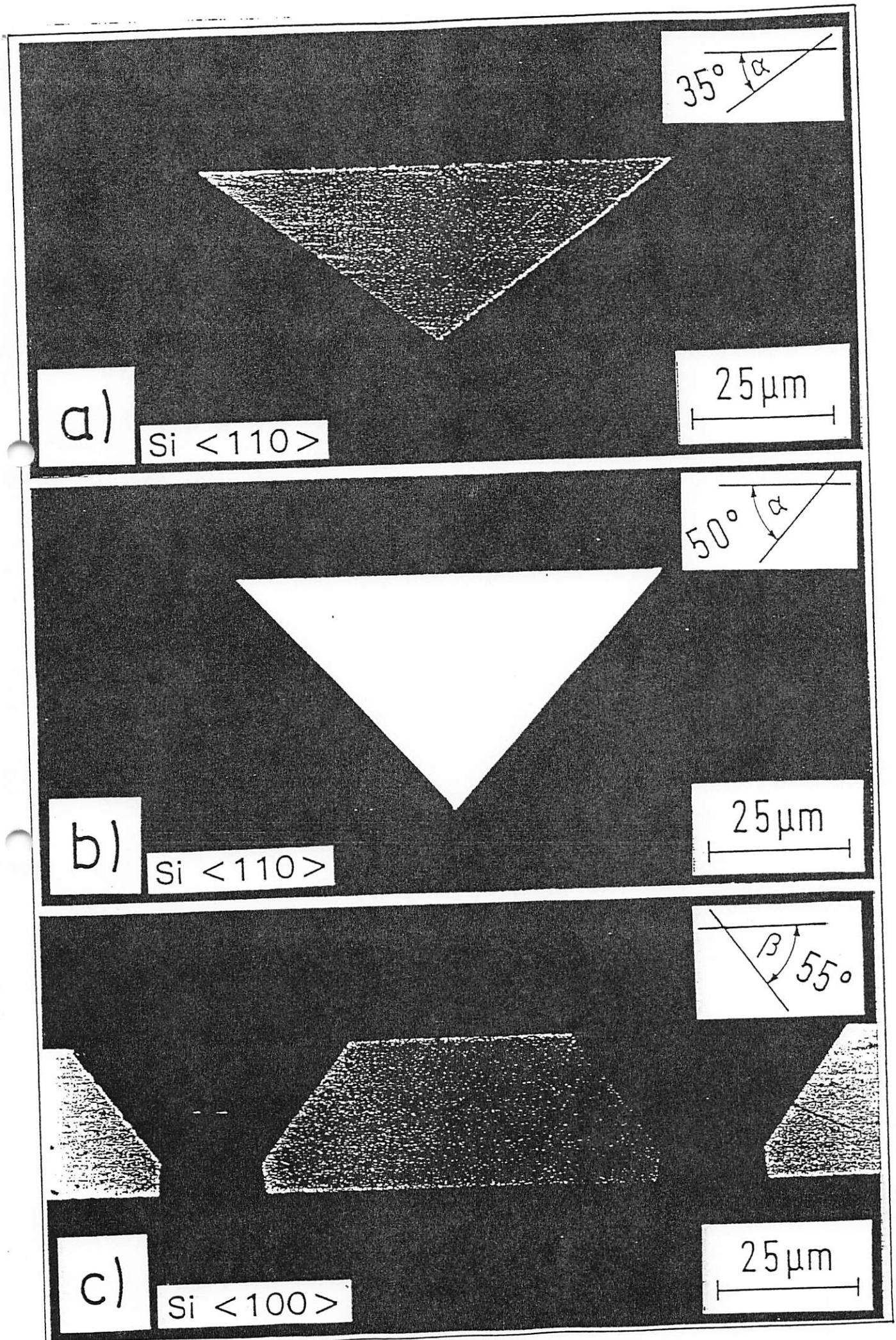
$d(\text{Si}) = 50 \mu\text{m}$
 $d(\text{ZnO}) = 12 \mu\text{m}$
 nur O_2
 $p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$
 $T = 280^\circ\text{C}$



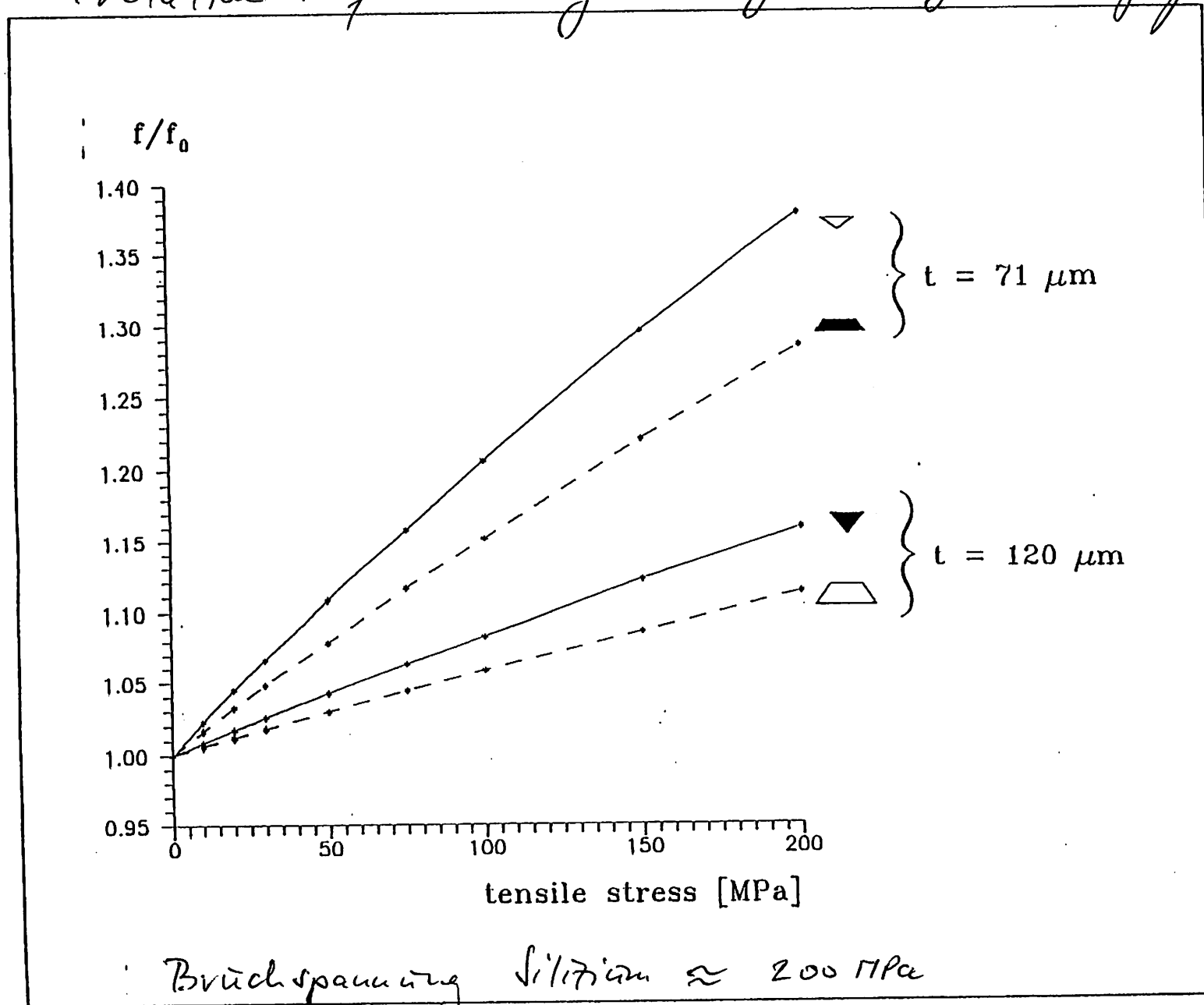
$d(\text{Si}) = 50 \mu\text{m}$
 $d(\text{ZnO}) = 12 \mu\text{m}$
 $\text{Ar} : \text{O}_2 = 1 : 1$
 $p = 1 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$
 $T = 290^\circ\text{C}$



AGG.38



relative Frequenzänderung des Grund-Siege schwingungswerte



M. Alavi, Th. Fabula, A. Schumacher and H.-J. Wagner
Monolithic Microbridges in Silicon Using Laser Machining
and Anisotropic Etching
Fig. 7

Dr. Bartsch:

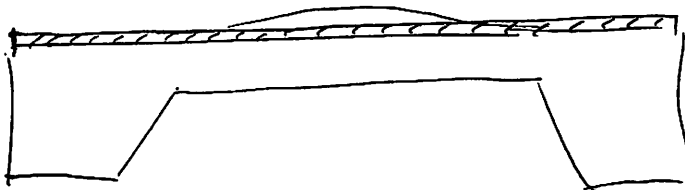
0774 - 930 - 540

Temperatureinfluss bei Grundbiegemodus

Si-Balken:

$$l = 10 \mu\text{m}$$

$$d = 50 \mu\text{m}$$



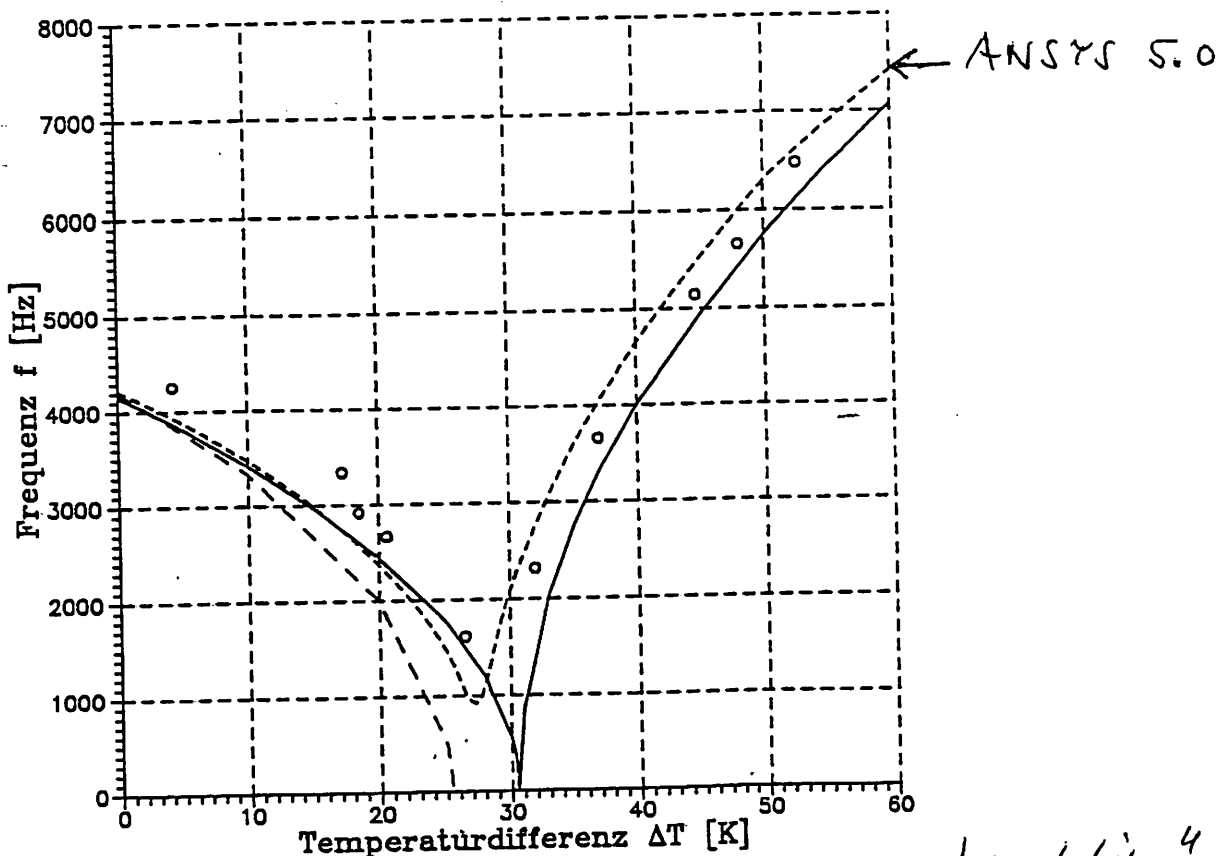
1,5 μm SiO_2 (Stg + R)

o Messwerte Wiedemann

— analyt. gefittet

--- ANSYS 5.0 } FET

--- ANSYS 4.4A }



"buckling"

Temperaturverlauf bei doppelt eingespannten Biegebalken

(FEM-Simulation
St. Messner)

