Tabelle 1: **Matrixgleichungen der FE-Modellierung**

(1) lineare Statik: $[K]\cdot\{u\} = \{F\}$

(2) nichtlineare Statik: $[K(u,T,...)]\cdot\{u\} = \{F\}$

(3) lineare Modalanalyse: $[M]\cdot\{\ddot{u}\} + [K]\cdot\{u\} = 0$

(4) Modalanalyse mit Vorspannung: $[M]\cdot\{\ddot{u}\} + [K + S]\cdot\{u\} = 0$

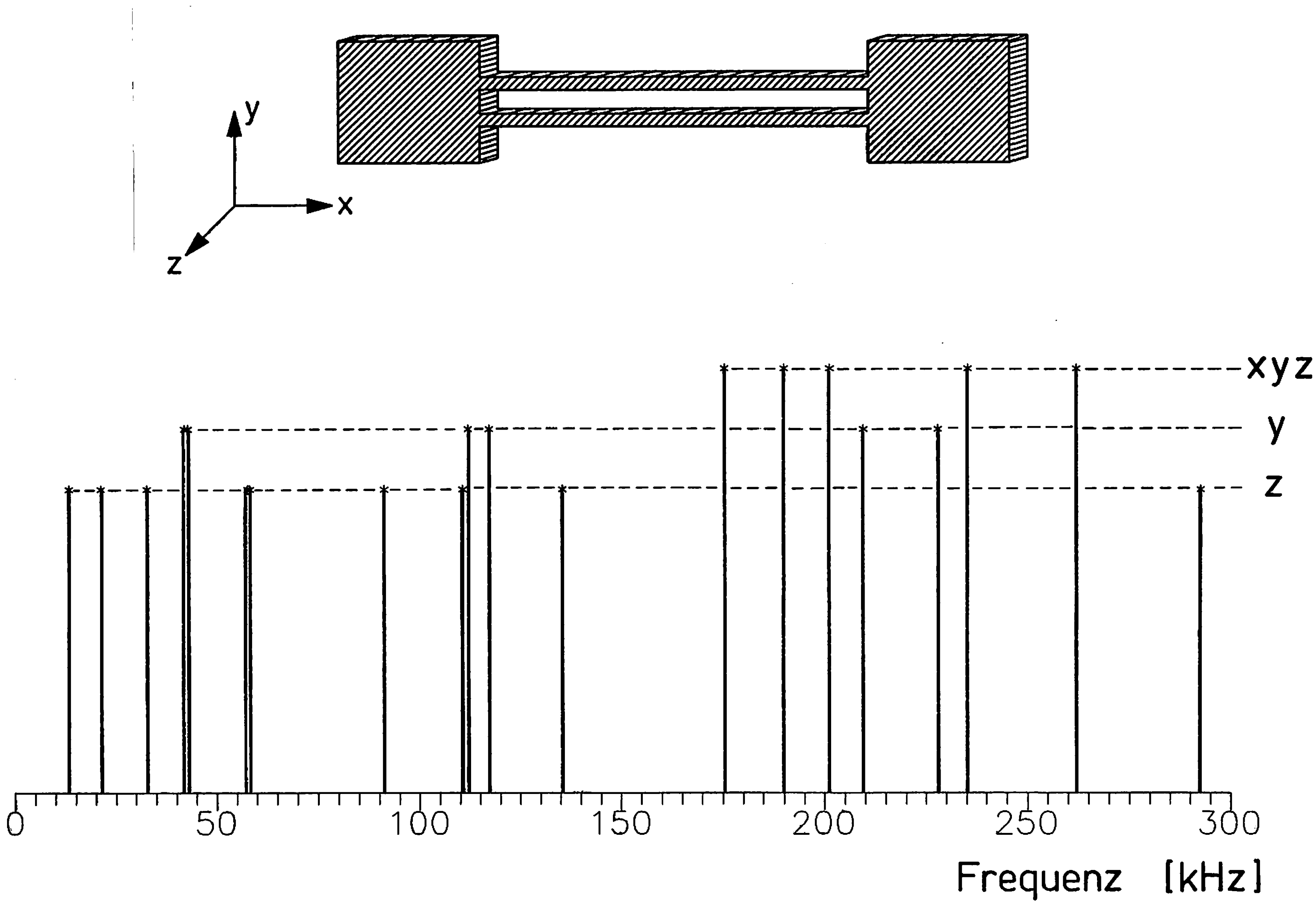
(5) Frequenzganganalyse: $[M]\cdot\{\ddot{u}\} + [C]\cdot\{\dot{u}\} + [K]\cdot\{u\} = \{F(t)\}$

(6) Gekoppelte piezoelektrische Feldgleichung:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C_\phi \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi}^{t} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix}$$

M, C, K : Massen-, Dämpfungs-, Steifigkeitsmatrix
$\ddot{u}, \dot{u}, u$: Beschleunigungs-, Geschwindigkeits-, Verschiebungsvektor
$F(t), S$: zeitabhängige Anregungskraft, Spannungsversteifungsmatrix
Φ, Q : elektrisches Potential, elektrische Ladung an den Knoten
C_ϕ : dielektrische Dämpfungsmatrix
K_{uu} : elastische Steifigkeitsmatrix (= K)
$K_{u\phi}$: piezoelektrische Kopplungsmatrix
$K_{\phi\phi}$: dielektrische Steifigkeitsmatrix
T : Temperatur

Abbildungsverzeichnis:


y
x
z
xyz
y
z
0
50
100
150
200
250
300
Frequenz [kHz]

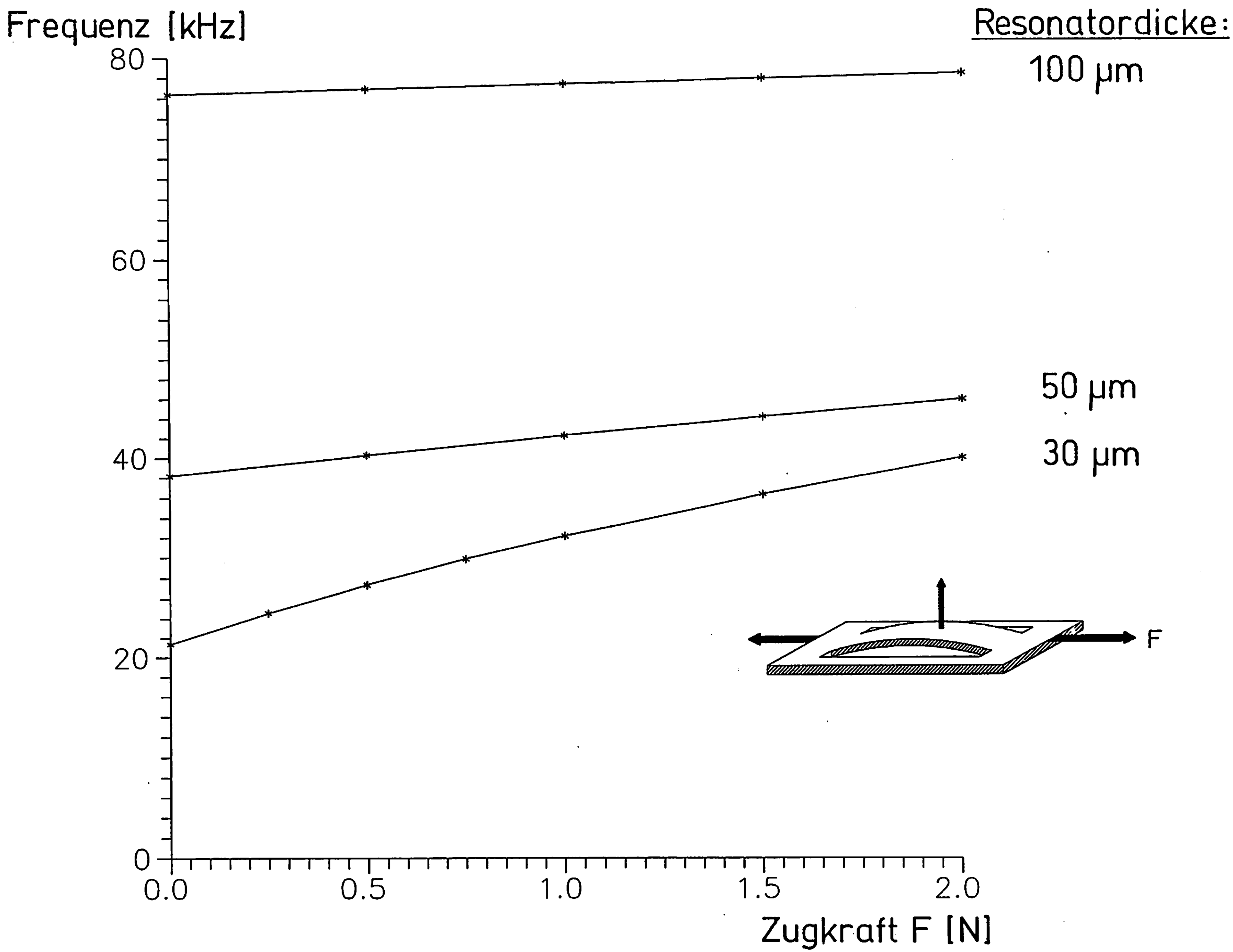
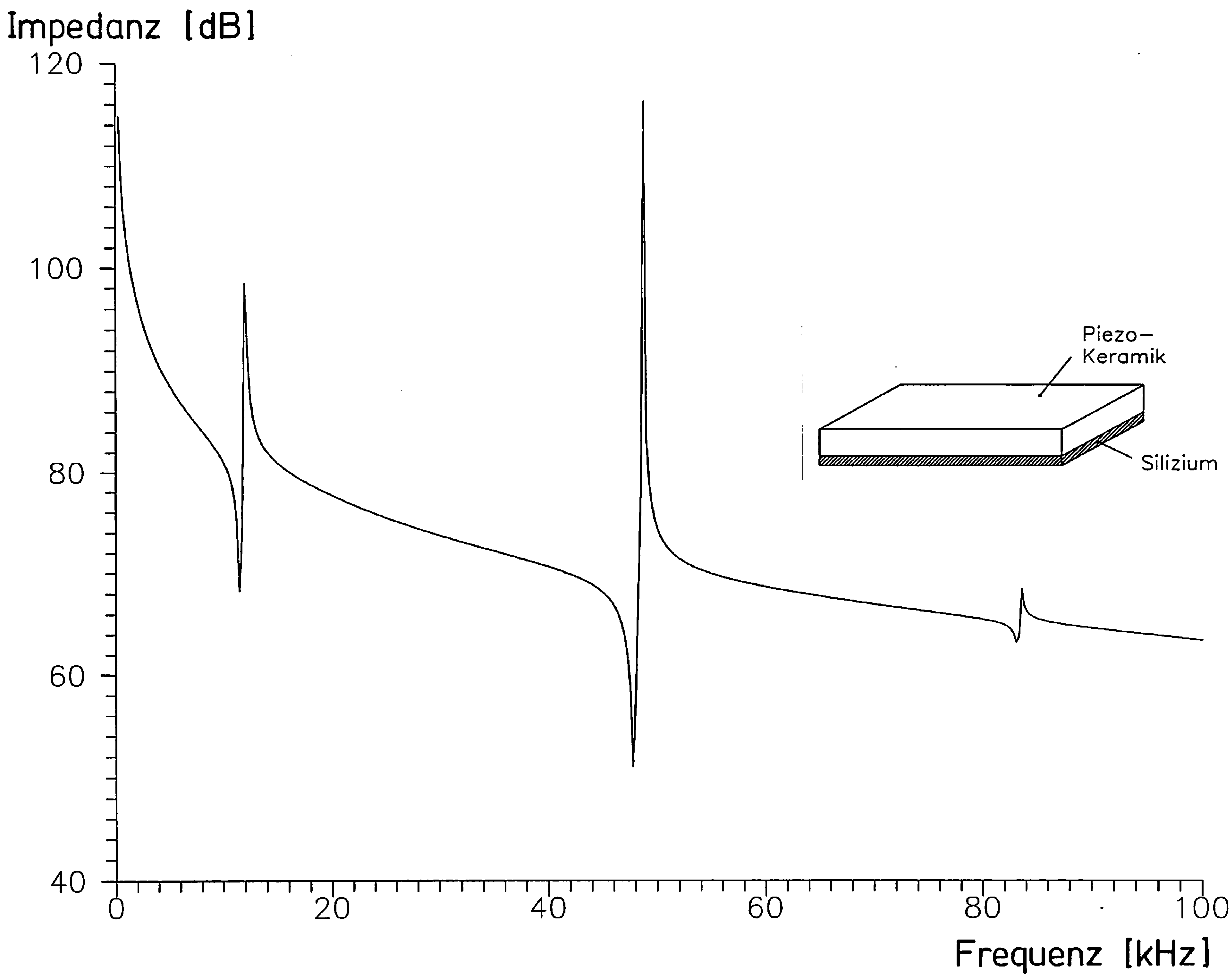

Frequenz [kHz]
Resonatordicke:
100 µm
50 µm
30 µm
80
60
40
20
0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
Zugkraft F [N]
F

Bild 2


Impedanz [dB]
120
100
80
60
40
0
20
40
60
80
100
Frequenz [kHz]
Piezo-
Keramik
Silizium