

FEM-Beispielrechnung:

Mit Hilfe dieser Rechnung (ANSYS, Ver. 4.4) sollten die Eigenfrequenzen eines resonanten Kraftsensors (Quartz-Doppelstimmgabel, DETF) und die zugehörigen Schwingungsformen grob bestimmt werden.

A.) Materialdaten:

Material: Quartz
 E-Modul: $8.9 * 10^{10} \text{ g/mm}^2$ (isotrop)
 Dichte: 2.648 g/ccm
 Poissonzahl: 0.122894

b.) Geometrie:

Die Abmessungen wurden der AutoCAD-Zeichnung (siehe Anhang) entnommen. Die Dicke wurde mit 200 μm festgesetzt. Aufgrund der zweifachen Symmetrie wurde der Sensor mit 19 Keypoints eingegeben und die somit erhalten Fläche A1 anschließend vervielfältigt (siehe Bildschirm-Hardcopy im Anhang).

c.) Annahmen:

Zur Vereinfachung wurden bei der Berechnung folgende Annahmen getroffen:

- unbelasteter Sensor (Zugkraft = 0)
- Isotroper Elastizitätsmodul
- freie, ungedämpfte Schwingung (ANSYS-Analysotyp KAN=2)
- Vernachlässigung der piezoelektrischen Schwingungsanregung (erfordert eine gekoppelte Feldberechnung: elektrisches Feld \leftrightarrow mechanische Spannung)
- Schwingungen wurden nur in der X-Y-Ebene zugelassen, aufgrund der Auswahl des Elementes STIF42
- Geometrie nicht vollständig erfaßt (Mittellöcher, Aufhängung zur Krafteinleitung)
- Randbedingungen z.T. idealisiert: für die Bereiche $x=0$ und $x=15 \text{ mm}$ wurden keine Schwingungen zugelassen.

d.) Modellaufbereitung:

- Pre-Processor: ANSYS-Standardpreprocessor PREP7
- Elementauswahl: STIF42 (2-D isoparametric solid),
Schalenelement mit vier Knoten
- Knotenanzahl: 297
- Elementanzahl: 216
- Automatische Netzgenerierung (AMESH), max. mittlere
Seitenlänge der Elemente betrug ca. 0.5 mm

e.) Ergebnisse:

Die FEM-Berechnung mit ANSYS, Version 4.4 durchgeführt, ergaben auf einer Mikro-VAX II (ca. 1 MIPS, Rechenzeit ca. 20 min) folgende Resultate:

R.M.S. Wavefront: 191 (entspricht einem kleinen Problem)

Eigenfrequenzen:

1. EF = 40.057 kHz
2. EF = 43.427 kHz
3. EF = 46.161 kHz
4. EF = 50.412 kHz
5. EF = 70.121 kHz

Die Eigenformen der obigen fünf Eigenfrequenzen sind den Bildschirm-Hardcopies des Anhangs zu entnehmen. Die Schwingungsamplituden sind zwecks besserer Darstellung z.T. erheblich vergrößert (Faktor DSCA).

Die vierte Eigenform, mit einer Resonanzfrequenz von 50.4 kHz stellt die gewünschte Schwingungsart des Sensors dar, in der nur die beiden mittleren Stege zueinander, entgegengesetzt schwingen.

Th.Fabula, 13.10.89

(Berechnet bei der Fa. CAD-FEM, Ebersberg)

2. Lauf : Modalanalyse

```

/COM,ANSYS REVISION 4.4    UP419    22    17.5649    10/13/1989
/PREP7
RESU
/COM,ANSYS REVISION 4.4    UP419    22    17.9931    10/13/1989
/PREP7
RESU
/COM,ANSYS REVISION 4.4    UP419    22    18.0508    10/13/1989
/PREP7
ET,1,63
ET,1,63
K,1
K,2,2.5
K,3,2.5,.42
K,4,2.6,.85
K,5,3,.85
K,6,3.1,.42
K,7,3.1
K,8,3.7
K,9,3.7,.295
K,10,7.5,.295
K,11,7.5,.775
K,12,3.7,.775
K,13,3.7,.897
K,14,4.9,1.108
K,15,7.5,1.108
K,16,7.5,1.347
K,17,4.9,1.347
K,18,4.9,1.439
K,19,,1.439
/SHOW,4115
KPLO
/PNUM,KPOI,1
KPLO
L,1,2
RP18,1,1
L,19,1
LPLO
AL,ALL
LOCAL,11,,,1.439
ARSYM,2,1
LOCAL,12,,,7.5
ARSY,1,ALL
APLO
NUMMRG,KPOI — punkte mergen
SAVE
APLO
LPLO
ELSI,.5
AMESH,1
APLO
AMESH,2,4
EPLO
/TITLE, QUARZ-DETE
ET,1,63
R,1,.2
EX,1,.89E5 ✓
NUXY,1,.122894 ✓
DENS,1,2.648E-6 ✓
DENS,1,2.648E-9
/WIND,1,-1,1,.5,1

```

STIF63 (quad. shell) → Si \updownarrow schw.

Key points eingeben

Linien einzeichnen

Fläche generieren und kopieren

Flächen vernetzen

Materialdaten

$E = 0.867 \cdot 10^5 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$

$\nu = 0.123$

$\rho = 2.6487 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kg}{mm^3} \right]$

LPLO
 /NOER
 /WIND,1,-1,1,0,.5
 /PNUM,KPOI
 /PNUM,AREA,1
 APLO
 /WIND,1,-1,1,-.5,0
 /PNUM,NODE,1
 NPLO
 /PNUM,NODE
 /SHOW,4115,,1
 /WIND,1,-1,1,-1,-.5
 EPLO

Darstellung
 in versch.
 Windows

/ERA
 NSEL,X
 D,ALL,ALL
 ET,1,42,,,3
 NSEL,X,15
 NSEL,X,14.9,15.1
 NLIST,154
 NALL
 NLIST,154
 NSEL,X,15
 NALL
 NLIST,154
 NUMCPR,ALL
 NLIST,154
 NSEL,X,14.9,16
 NALL
 NRSE,X,14.9,16
 NALL
 NLIST,154

← einschalten in Kart. KS

CSYS
 NSEL,X,15
 /PBC,ALL,1
 NPLO
 NALL
 NPLO
 /WIND,1,FULL
 DDEL,ALL
 NSEL,X
 D,ALL,ALL
 NSEL,X,15
 D,ALL,ALL
 NALL
 NPLO
 ET,1,63
 DDEL,ALL
 NPLO

neuen Elem.-typ wählen
 STIF42 (↔ Schwing.)
 für Quarte

ET,1,42
 NSEL,X
 NASE,X,15
 D,ALL,ALL
 NALL
 NPLO
 R,1,.2
 M,ALL,UY

← Dicke d. Platte

/TITLE,QUARTZ-DETE
 NPLO
 KAN,2

← Modalanalyse

KAY,2,5
AFWR
FINI

5 Eigenformen berechnen

/INP,27
/COM,ANSYS REVISION 4.4 UP419 22 18.5717 10/13/1989
/PREP7

RESU
NALL
EALL
AFWR

veringlichtes selbes auftrif (?)

/INP,27
FINI
/POST1
SET,1,1
PLDI,1

//

/SHOW,4115
PLDI,1
SET,1,2

SET,1,2

/EOF

/EOF
/COM,ANSYS REVISION 4.4 UP419 22 19.2192 10/13/1989

/POST1
/SHOW,4115
SET,1,1
SET,1,2
PLDI

/DSCA,1,1E-6
PLDI,1
/DSCA,1,.5E-4
PLDI

Skizzieren d. Anspielstellen

/DSCA,1,.2E-4
PLDI
/WIND,2,-1,1,0,.5
/DSCA,2,.2E-4
/WIND,1,-1,1,.5,1
/WIND,3,-1,1,-.5,0

verschied. Windows def.

STATUS
ELIST,ALL
/WIND,1,OFF
/WIND,2,OFF
SET,1,3

PLDI
/WIND,4,-1,1,-1,-.5
/WIND,3,OFF
SET,1,4

PLDI
SET,1,5
SET,1,4
SET,1,5

PLDI
/WIND,5,-1,1,-1,-.5
/WIND,4,OFF

/WIND,1,ON
SET,1,1
PLDI
/WIND,5,OFF
PLDI
/NOER
SET,1,2
/WIND,1,OFF
/WIND,2,ON
PLDI
/WIND,2,OFF
/WIND,3,ON
SET,1,3
PLDI
/WIND,3,OFF
/WIND,5,ON
SET,1,5
PLDI
/WIND,5,OFF
/WIND,4,FULL
/WIND,4,ON
SET,1,4
/ERA
PLDI
/DSCA,4,.1E-4
/WIND,4,TOP
PLDI
PLNS,SX
/WIND,4,FULL
/SHOW,4115,,1
PLDI
/WIND,4,TOP
/SHOW,4115
PLDI
/NOER
/WIND,4,BOT
/SHOW,4115,,1
PLDI
/EOF
/EOF