

Tab. 2: Parametereinflüsse beim Membran-Modell

Variation: Elementvernetzung und Anzahl der dynamischen Hauptfreiheitsgrade (MDOF)

FE-Modell: 3D-Platte, Viertelmodell, 1 Elementlage pro Schicht (STIF45)

Si/ZnO-Bimorphmembran: Abm.: 9,2 x 9,2 mm², $t_{\text{Si}} = t_{\text{ZnO}} = 20 \mu\text{m}$

f_s : Serienresonanzfrequenz, f_p : Parallelresonanzfrequenz

k_{eff} : effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor (Grundswingungsmode)

FEM-Modell:	Elemente / Knoten	MDOFs	Seiten- teilung	Aspektver- hält.	f_s [kHz]	f_p [kHz]	k_{eff}	Bemerkungen:
Nr. P1	200/363	300	10	23,0	4,016	4,143	0,2476	nur untere Knotenlage eingespannt
Nr. P2	200/363	300	10	23,0	5,196	5,298	0,1962	Si-Membran ganz eingespannt
Nr. P3	200/363	300	10	23,0	5,281	5,378	0,1899	Si <u>und</u> ZnO eingespannt
Nr. P4	450/768	300	15	15,3	4,971	5,075	0,2024	Si-Membran eingespannt, ZnO-Schicht seitlich frei
Nr. P5	800/1323	1000	20	11,5	4,928	5,033	0,2043	
Nr. P6	1250/2028	500	25	9,2	4,916	5,021	0,2045	
Nr. P7	1800/2883	500	30	7,7	4,911	5,016	0,2046	
Nr. P8	3200/5043	300	40	5,8	4,907	5,012	0,2047	

Tab. 2: Parametereinflüsse beim Membran-Modell

Variation: Elementvernetzung, Anzahl der dynamischen Hauptfreiheitsgrade (MDOF)

FE-Modelle: Plattenmodell mit unendlich steifer Einspannung (P1 - P8),

3D-Membran mit (111)-Einspannung, variable Elementunterteilung (M5 - M8)

Si/ZnO-Bimorphmembran: Abm.: 9,2 x 9,2 mm², $t_{\text{Si}} = t_{\text{ZnO}} = 20 \mu\text{m}$

f_s : Serienresonanzfrequenz, f_p : Parallelresonanzfrequenz, k_{eff} : effektiver Kopplungsfaktor (Grundswingungsmode)

FEM-Modell:	Elemente / Knoten	MDOFs	Seiten- teilung	Aspektver- hält.	f_s [kHz]	f_p [kHz]	k_{eff}	Bemerkungen:
Nr. P1	200/363	300	10	23	4,016	4,143	0,2476	nur <u>untere</u> Knotenlage eingespannt
Nr. P2	200/363	300	10	23	5,196	5,298	0,1962	Si: eingespannt ZnO- Schicht frei
Nr. P3	200/363	300	10	23	5,281	5,378	0,1899	Si-Membran <u>und</u> ZnO eingespannt
Nr. P8	3200/5043	300	40	ca. 6	4,907	5,012	0,2047	Si: eingespannt ZnO- Schicht frei
Nr. M5	450/795	100	13	ca. 18	5,015	5,117	0,2005	Sockel <u>und</u> Seitenteile fixiert
Nr. M6	450/795	100	13	ca. 18	4,836	4,931	0,1970	<u>nur</u> Sockel fixiert Breite: 1 mm
Nr. M7	578/999	100	13	ca. 18	4,871	4,967	0,1974	<u>nur</u> Sockel fixiert Breite: 5 mm
Nr. M8	1058/1767	300	19	ca. 12	4,745	4,842	0,2004	- " -

Tab. 4: 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 x 9,2 mm², $t_{Si} = 100 \mu m$
- Messungen: Si/ZnO-Bimorphmembran, Abm.: 9,2 x 9,2 mm², $t_{Si} = 50 \mu m$, $t_{ZnO} = 15 \mu m$
(k_{eff} : effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor)

Schwingungs- mode		analytisch		FEM		opt. Messung		elektr. Messung	
		isotrop [Pon91]	aniso. [Pon91]	2D isotrop	3D anisotro p	c_i	f_i [kHz]	c_i	k_{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