

STATUSBERICHT DER MotoMeter AG
ZUM VERBUNDPROJEKT:
EINSATZ DER MIKROMECHANIK ZUR HERSTELLUNG FREQUENZANALOGER SENSOREN
(DR.-RER.-NAT.-J.ERLEWEIN, W.HARTIG)
JANUAR 1990

I Ziel:

Grundlagenerarbeitung zur Gestaltung und Dimensionierung von Drucksensoren auf der Basis schwingender Quarzmembranen

1.Schritt:

Mit Hilfe der Finite Element Methode (FEM) soll ein Modell erstellt werden, mit dem des Verhalten einer Quarzmembran so realistisch wie nur möglich simuliert werden kann.

2.Schritt:

Am Simulationsmodell werden die physikalischen Verhaltensweisen und deren Abhängigkeiten untersucht.

3.Schritt:

Die Gestalt der Drucksensormembran (Form; Kristallschnitt; Einspannung;...) wird derart verändert, daß die für den Einsatz als Drucksensor relevanten Eigenschaften (aus dem 2. Schritt) optimal genutzt werden können. Dabei ist vielfaches Experimentieren erforderlich.

4.Schritt:

Generierung eines optimalen (sehr feingliedrig;...)Modells und umfassende (zeitaufwendige...) Berechnungen dessen Verhaltens (mechan.Spannung; Eigenfrequenzen; Schwingungsform ...).

5.Schritt:

Herstellung eines Musters, Inbetriebnahme, Ausmessung und anschließender Vergleich zwischen Meß- und Rechenergebniss.

II Kurze Aufgliederung der Finite Element Methoden Anwendung

Bild 1 zeigt ein einfaches Modell einer quadratischen Quarzmembran in räumlicher Darstellung. Beim FEM Program ANSYS gliedert sich die Anwendung in 3 Phasen:

A. Datenaufbereitung - Preprozessing:

zum Beispiel:

- | | | |
|----|----------------------------|---------------------|
| 1. | Analyseart | Dynamik |
| 2. | Elementtyp | Stif 42 |
| 3. | Materialwerte | E-Module;Dichte |
| 4. | Koordinatensystem | 35°rot.(AT-Schnitt) |
| 5. | Knotendefinition | 9 x 9 x 2 -162 |
| 6. | Elementdefinition | 8 x 8 x 1 -64 |
| 7. | Lasten und Randbedingungen | Freiheitsgrade |
| 8. | Elementdruck | 1 bar |

B. Berechnung - ANSYS stellt aus allen Eingaben eine komplexe Gesamtsteifigkeitsmatrix auf und löst diese.

C. Datenauswertung - Postprozessing:

1. Einlesen der Ergebnisdatei
2. Drucken der Ergebnisse
3. Graphische Darstellung
4. Lastfallüberlagerung

III Erstellung eines realistischen Modells

A. Vorbemerkungen

Zur bisherigen Berechnung stand nur die Schulungsversion 4.3 des FEM Programms ANSYS zur Verfügung. Dies hatte hauptsächlich 2 Nachteile.

- Die max. Wavefront betrug nur 200, d.h. es konnten nur grobe Modelle (wenig Elemente; wenig Schwingungsfreiheitsgrade ...) berechnet werden.
- Das bestgeeignete Element zur Simulation der anisotropen Quarzeigenschaften war nur das orthotrope Element Stif 45. Dies bedeutete, daß von den 6 verschiedenen Elastizitätskoeffizienten des Quarzkristalls nur 5 berücksichtigt werden konnten.

Beide genannten Nachteile haben eine starke Verfälschung der Rechenergebnisse zur Folge. Die nachstehenden Ergebnisse haben also nur relative, und keine absolute Bedeutung.

Seit Ende Januar steht der MotoMeter AG die neueste Full-Version 4.4 von ANSYS zur Verfügung mit einer Wavefront von 1500 und mit Elementen, die die volle Quarzanisotropie berücksichtigen. Damit treten diese starken Verfälschungen bei zukünftigen Berechnungen nicht mehr auf.

Bei den folgenden Versuchen wurden verschiedene Parameter des Modells verändert und mit einer einfachen Standardbelastung (z.B. Zugkraft) beaufschlagt. Das Simulationsergebnis wurde verglichen mit dem Ergebnis einer theoretischen Berechnung. Bei einer Abweichung wurde das Modell so lange geändert, bis diese annähernd Null wurde. Siehe dazu auch Bild 2.

1. Versuch:

Durch Eingabe der richtungsabhängigen Materialkonstanten konnten bei einer Zugbelastung die verschieden großen Dehnungen und Einschnürungen in den verschiedenen Richtungen nachgebildet werden.

2. Versuch:

Je feiner das Modellgitter strukturiert ist, desto genauer das Ergebnis.

3. Versuch:

Um ein homogenes Spannungsbild über den gesamten Querschnitt zu erhalten, muß man z.B. bei Zugbelastung, bei der die Knoten der eingespannten Seite ja in allen 3 Koordinatenrichtungen festgehalten werden, die Knoten der gezogenen Seite in den beiden Richtungen festhalten, die senkrecht zur Zugrichtung stehen.

4. Versuch:

Um eine Kraft auf einer Körperseite angreifen zu lassen, kann man die Gesamtkraft entweder gleichmäßig auf alle Knoten dieser Seite verteilen, oder gleichmäßig auf jede Elementfläche dieser Seite (also Druckbelastung) verteilen. Der Versuch zeigte widererwarten deutliche Unterschiede. Bei der Kraft je Knoten Belastung werden die Rand- und besonders die Eckzonen im Verhältnis zu der restlichen Fläche wesentlich stärker beansprucht (starke Spannungsüberhöhungen). Bei der Kraft je Fläche Belastung ergab sich eine gleichmäßige Beanspruchung über dem gesamten Querschnitt.

5. Versuch:

Das Stif 45 Element hat eine Quaderform. Wenn mit dem Element ein Körper aufgebaut wird, so muß man zwei Punkte beachten, die von ANSYS vorausgesetzt werden, damit die Rechnung korrekte Ergebnisse liefert:

A. Das Element darf nicht zu großen Winkelverschiebungen unterzogen werden!

B. Die Elementseitenlängen dürfen sich nicht mehr als im Verhältnis 1:2 unterscheiden!

Durch die kleine verfügbare Wavefront waren nur Modelle mit einer begrenzten Knotenzahl (ca. 100 bei dynamischer Berechnung) möglich. Um diese Knotenanzahl auf eine Membran mit den Außenmaßen 8000x8000x125 µm gleichmäßig zu verteilen, erhielt jedes Element die Seitenlänge 2000x2000x42.

Die fehlerhafte Einschnürberechnung bei diesem zu großen Seitenverhältnis zeigt der Zugversuch auf Bild 3. Die erwartete Kreissektorförmige Einschnürung der Seitenwand hat in der Mitte leider eine Aufbeulung. Erst bei dem Seitenverhältnis 2000x1000x2000 µm erhält man die gewünschte homogene Einschnürung (Bild 4).

IV Untersuchung der physikal. Abhängigkeiten von Quarzmembranen

6. Versuch:

Je dünner die Membran, desto niedriger die Eigenfrequenzen. Die 1. bis 6., 8. und 9. Eigenfrequenz sind in Bild 5 dargestellt.

7. Versuch:

Die Membran wurde ringsherum eingespannt und mit Druck beaufschlagt. Dann wurden die mechanischen Spannungen in den verschiedenen Körperschichten berechnet.

8. Versuch:

Bei der Variation der Einspannung zeigten sich starke Eigenfrequenzänderungen.

9. Versuch:

In diesem Versuch wurde die Membran mit 0,1,2,3,4 und 5 bar Flächendruck belastet und jeweils die ersten 30 Eigenfrequenzen berechnet (Bild 6). Ebenfalls wurden von den ersten sechs Eigenfrequenzen die Verformungsbilder berechnet. Obwohl die bereits erwähnten Modellungenauigkeiten keine exakten Ergebnisse ermöglichen, lassen sich dennoch einige Tendenzen ablesen.

A. Die Eigenfrequenzen nehmen bei steigendem Druck linear ab.

B. Bei bestimmten Eigenfrequenzmoden (hier z.B. die 22. und 26.) sind besonders starke Frequenzänderungen zu beobachten.

Zu erwähnen wäre noch, daß bei diesem Versuch Schwingungen in allen 3 Richtungsachsen erlaubt waren (ebenso Längs-, Scher- und Biegeschwingungen), so daß der zunächst sehr hochrangig erscheinende 22. Mode eventuell nur der 7. Mode einer bestimmten Richtung ist.

V Weiterführende Vorhaben

- A. Höhere Auflösung (feineres Netz)
- B. Modell-Geometrie Verkleinerung
- C. Freimachen eines Modell-Viertels (nur für Biegeschwing.)
- D. Anzahl der M.d.o.f.-Knoten
- E. Nur bestimmte Freiheitsgrade der M.d.o.f.-Knoten
- F. Goldkontaktierung berücksichtigen
- G. Plattenform variieren
- H. Temperaturexpansionskoeffizient berücksichtigen
- I. Vollständige anisotrope Quarz-Steifigkeits-Matrix berücksichtigen
- J. Quarzschnitt variieren, Eigenfrequenz beobachten
- K. Gekoppelte Feldberechnung (Piezo-Effekt)

VI Literatur- und Patentauswertung

Durchgeführt am Landesgewerbeamt Baden-Württemberg

A. Patente:

Datenbank : World Patents Index
1963 bis heute

Suchbegriffe: pressure transducer, piezoelectric transducer, piezoelectric resonators, pressure measurement, quartz diaphragm, diaphragm resonators

Gefundene Patente : 32 (9 vor 1980)

Für uns interessant : 5

B. Literatur:

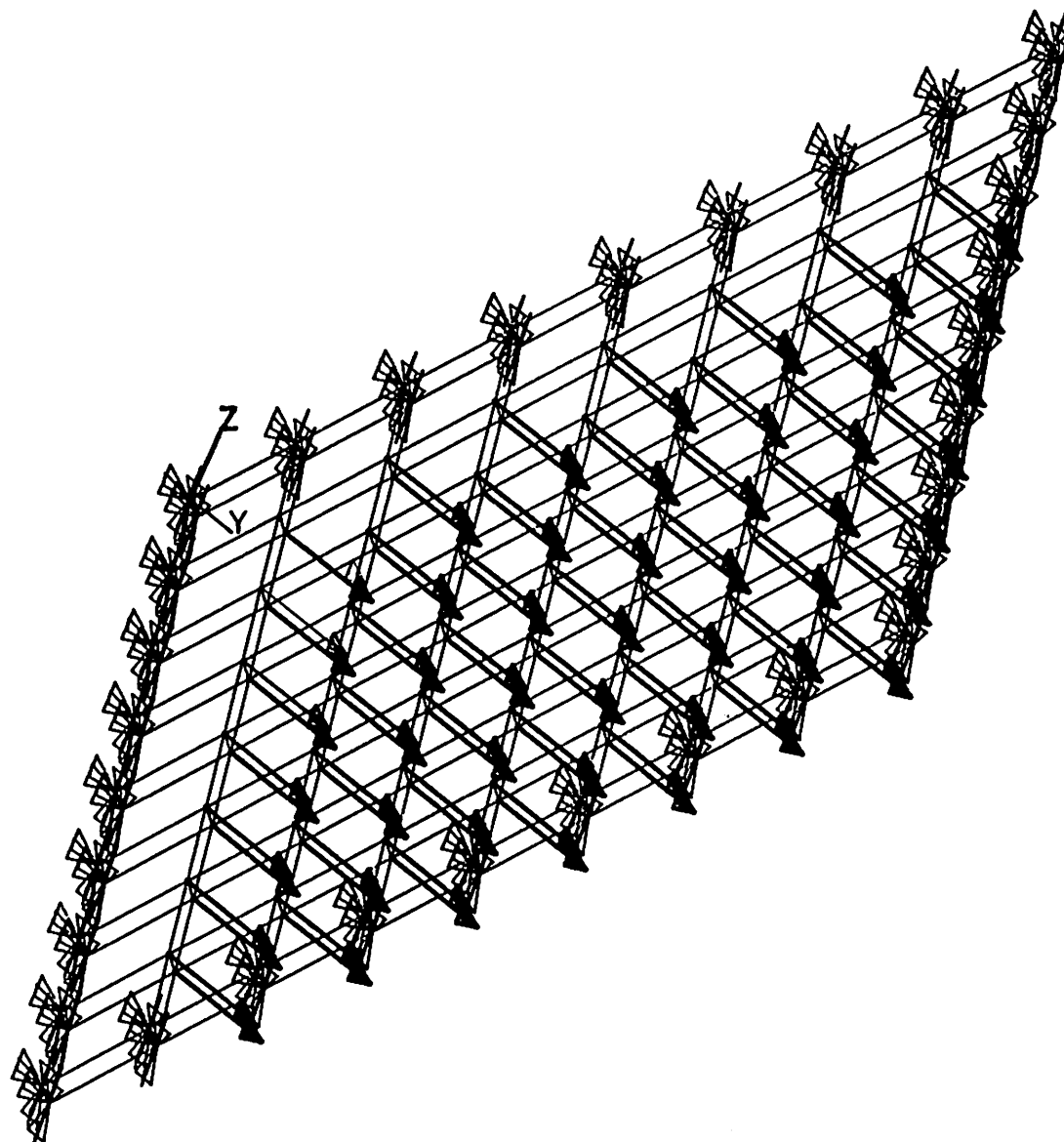
Datenbank : Institution of electrical engineers, London

Suchbegriffe : Wie bei den Patenten.

Gefundene Literaturstellen : 17

Für uns interessant : 9

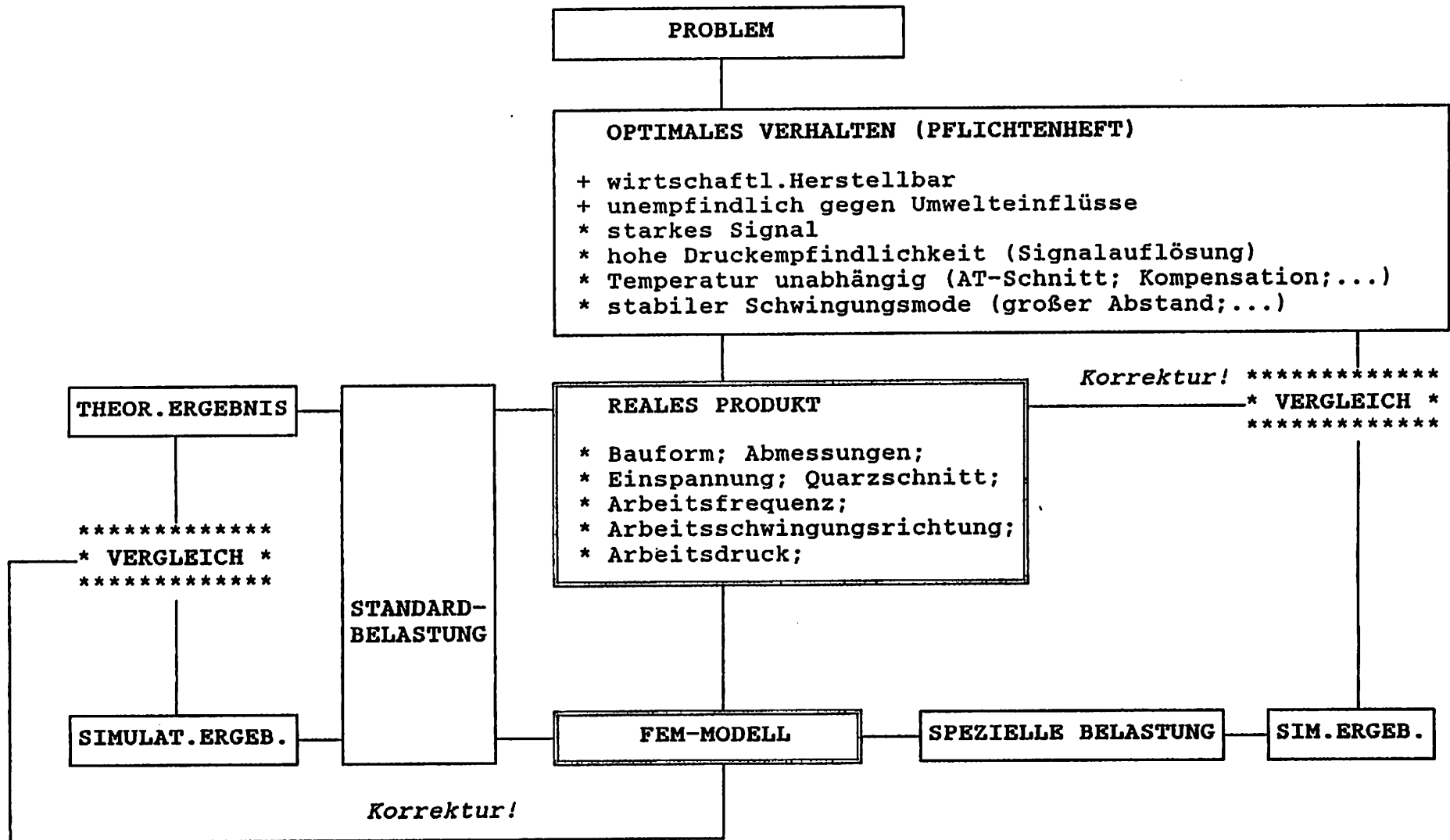
1



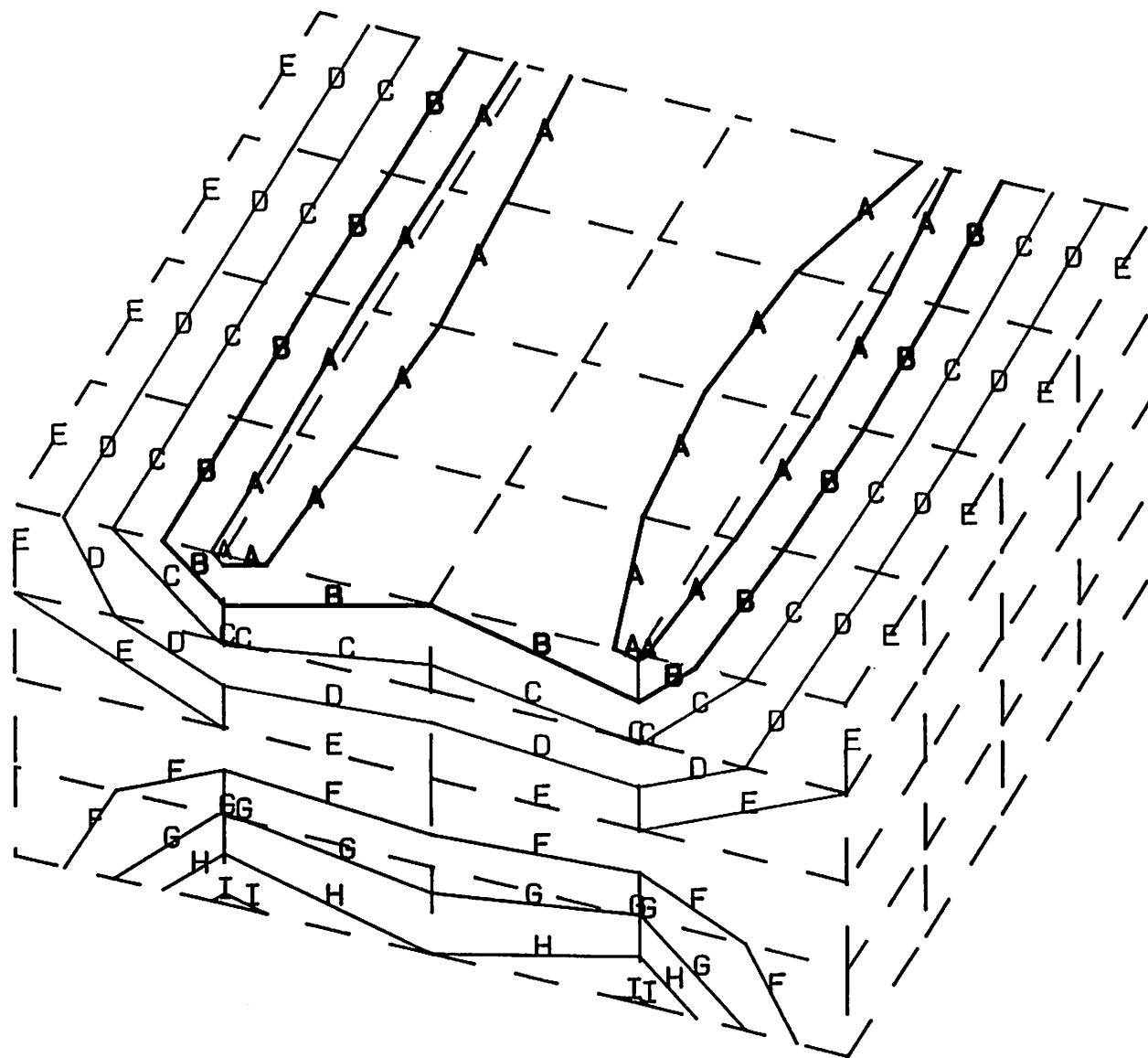
ANSYS 4.4
JAN 8 1990
17:20:13
PLOT NO. 1
PREP7 ELEMENTS
TYPE NUM
BC SYMBOLS

XV =10
YV =-1
ZV =5
*DIST=5500
*XF =4000
*YF =2360
*ZF =3230
ANGZ=-120
YRTO=1.4

Problemlösung mit FEM



1

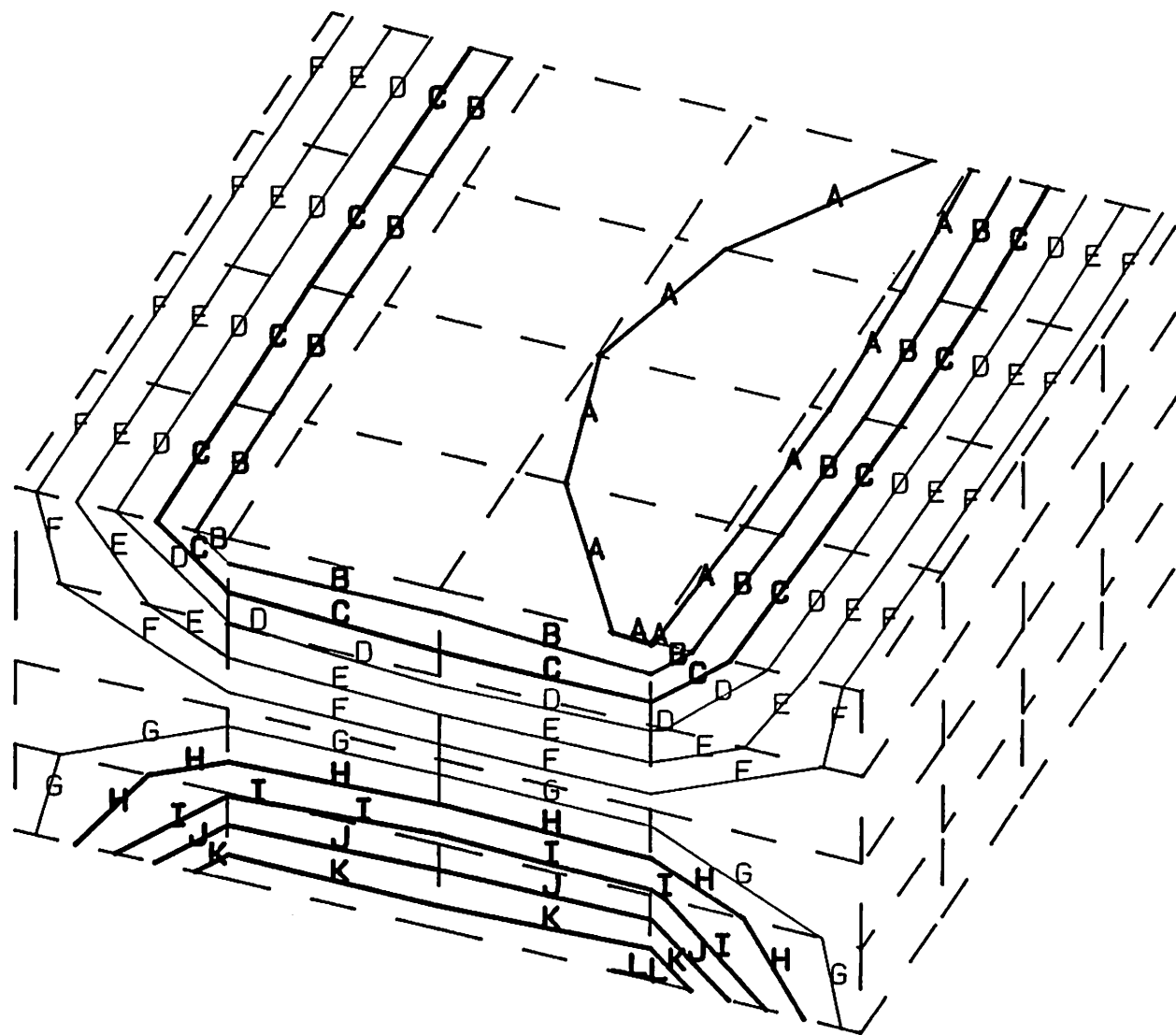


ANSYS 4.4
 DEC 1 1989
 12: 47: 07
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=1
 UY
 D GLOBAL
 DMX =10.327
 SMN =-0.195766
 SMX =0.195766

 XV =4
 YV =4
 ZV =10
 *DIST=6000
 *XF =4000
 *YF =1000
 *ZF =-6000
 YRTO=1.8
 PRECISE HIDDEN
 A =-0.174014
 B =-0.130511
 D =-0.043504
 E =-0.505E-14
 G =0.087007
 I =0.174014

Bild 3: QUADERELEMENTE SIND 2000 X 500 X 2000

1

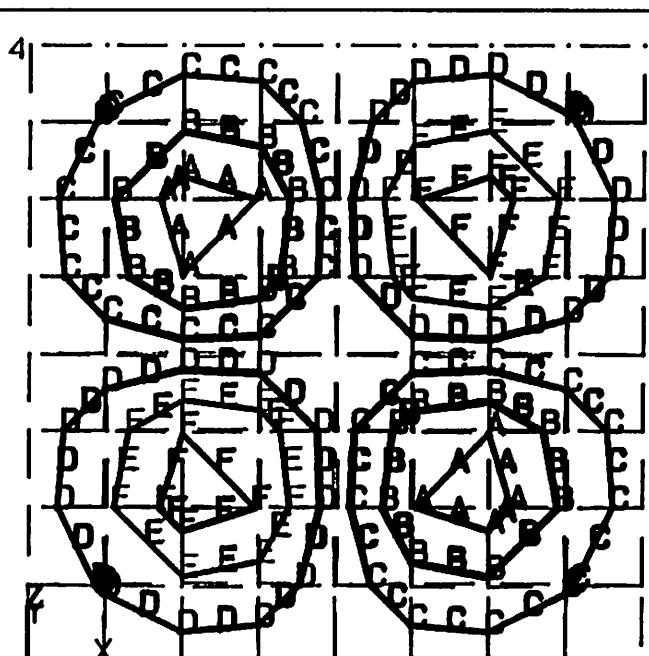
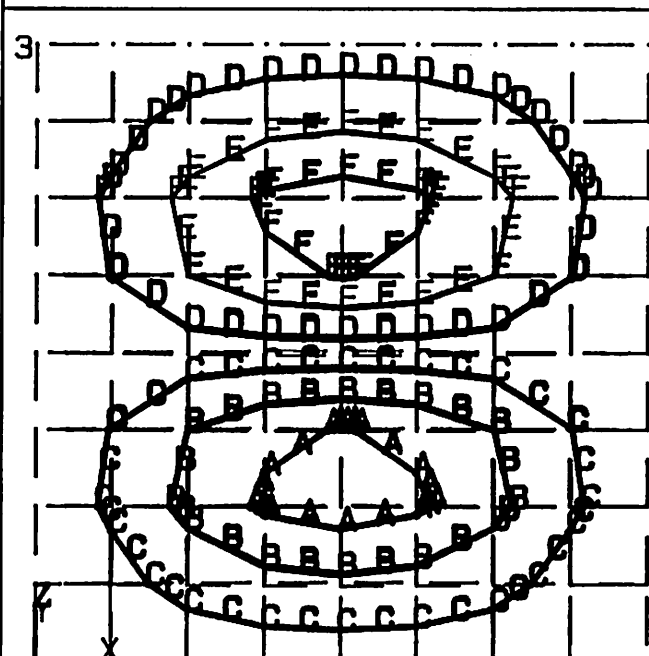
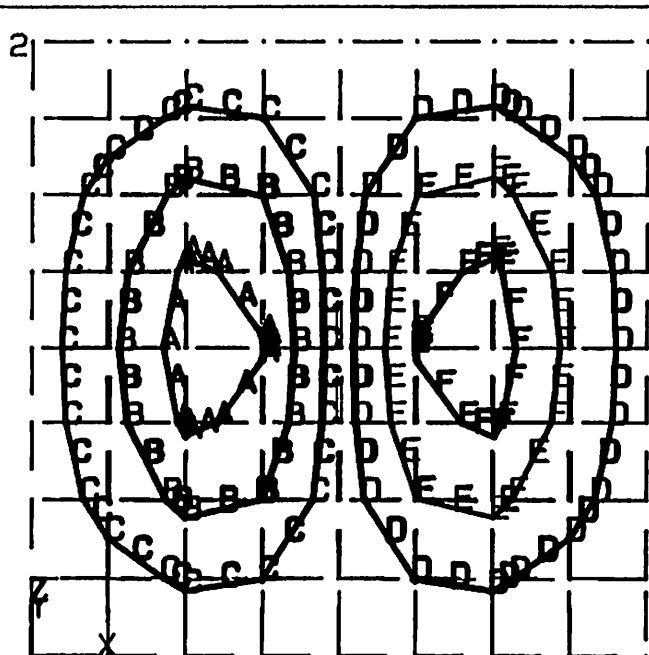
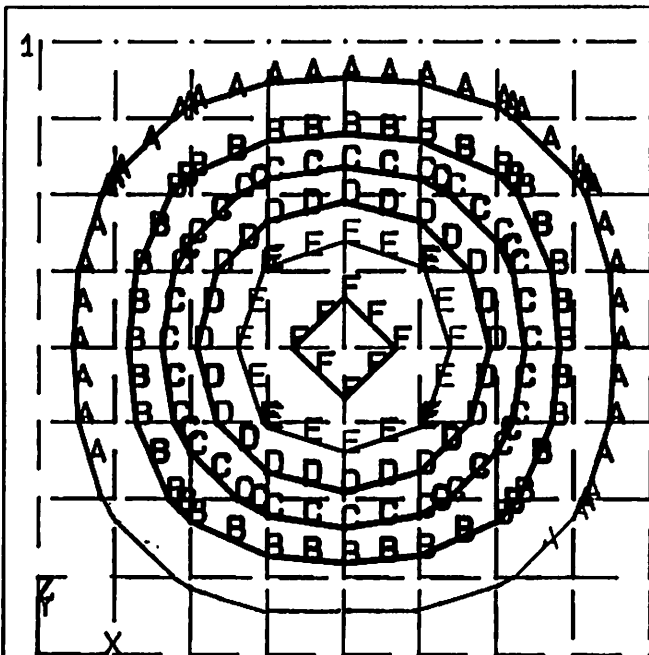


PT3T4: wh
 DEC 13 1989
 11: 44: 33
 PLOT NO. 2
 STRESS
 STEP=1
 ITER=1
 UY
 D NODAL
 DMX =10.355
 SMN =-0.357423
 SMX =0.357423

XV =4
 YV =8
 ZV =10
 DIST=6000
 XF =4000
 YF =2000
 ZF =-6000
 PRECISE HIDDEN
 A =-0.327638
 B =-0.268067
 C =-0.208497
 D =-0.148926
 E =-0.089356
 F =-0.029785
 G =0.029785
 H =0.089356
 I =0.148926
 J =0.208497
 K =0.268067
 L =0.327638

Bild 4:

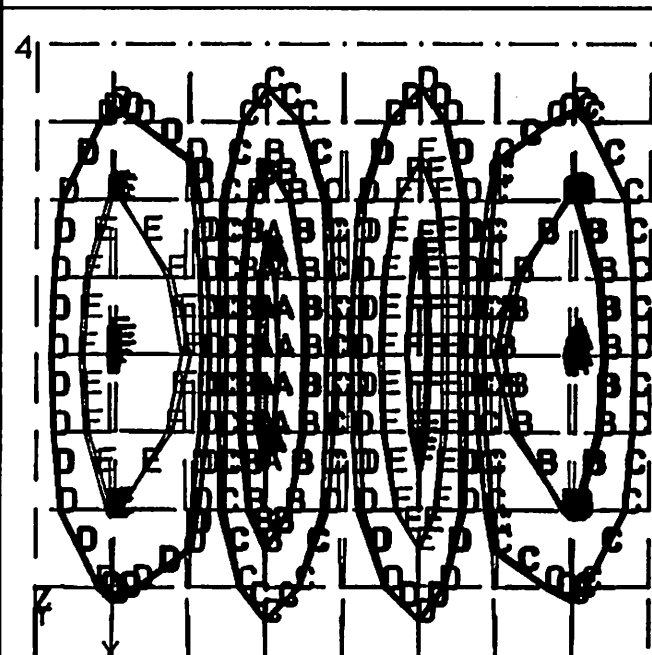
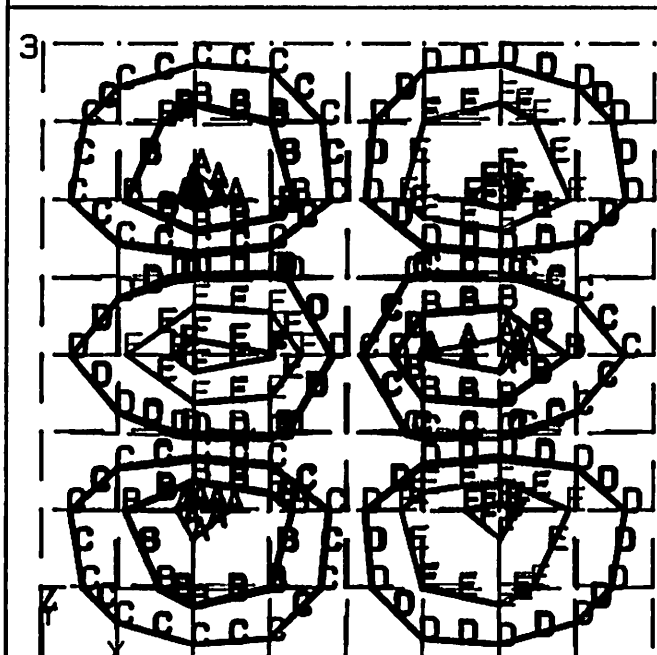
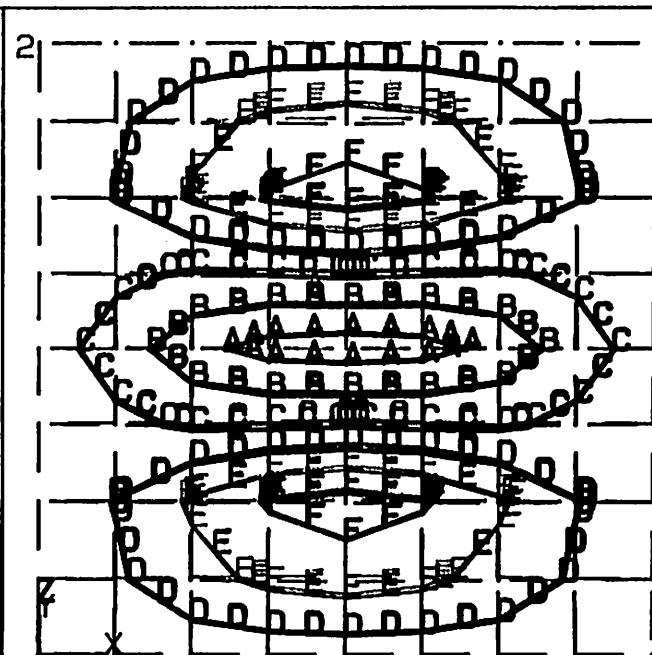
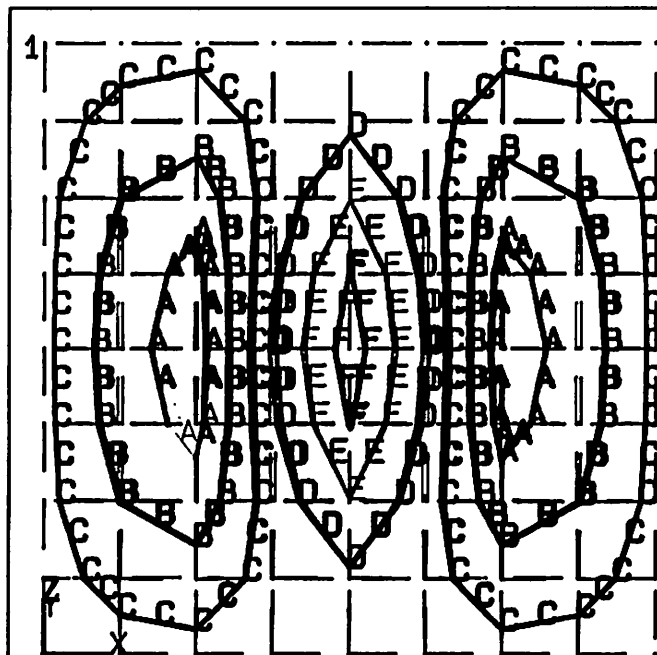
WURFEL FLEMENTE STND 2000 X 1000 X 2000 LANG



ANSYS 4.4
 JAN 10 1990
 09: 25: 48
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=1
 FREQ=23177
 UY
 CSYS=11
 DMX =17.593
 SMX =17.593

YV =-10
 ZV =7
 DIST=4465
 XF =4000
 YF =2360
 ZF =3230
 A =1.466
 B =4.398
 C =7.33
 D =10.263
 E =13.195
 F =16.127

POST1 STRESS
 STEP=1



ANSYS 4.4
 JAN 10 1990
 09:26:23
 PLOT NO. 2
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=5
 FREQ=102708
 UY
 CSYS=11
 DMX =18.825
 SMN =-15.847
 SMX =18.825

YV =-10
 ZV =7
 DIST=4465
 XF =4000
 YF =2360
 ZF =3230
 A =-12.958
 B =-7.179
 C =-1.4
 D =4.378
 E =10.157
 F =15.936

POST1 STRESS

Eigenfrequenzen über dem Belastungsdruck

SP2:	SP4:	SP5:	SP6:	SP7:	SP8:	Diff. je bar in Hz:	Haupt- schwing- richtung:	Eigen- frequenz Ordnung:
0 bar:	1 bar:	2 bar:	3 bar:	4 bar:	5 bar:			
59933	59930	59927	59925	59923	59920	3	Y	1
184765	184760	184755	184751	184746	184742	4	Y	2
206356	206352	206348	206344	206340	206336	4	Y	3
407920	407911	407902	407893	407884	407875	9	X	4
443656	443648	443639	443631	443622	443614	8	Z	5
496305	496303	496301	496299	496297	496295	2	Y	6
643075		643075	643075	643075	643075	0		7
731702		731702	731702	731702	731702	0		8
773652		773651	773651	773651	773651	0		9
886848		886844	886842	886839	886837	2		10
902784		902784	902784	902784	902784	0		11
944852		944826	944812	944799	944785	14		12
		1028454	1028432	1028410	1028388	22		13
		1041023	1041023	1041023	1041023	0		14
		1070052	1070015	1069978	1069941	37		15
		1108340	1108340	1108339	1108339	1		16
		1194668	1194607	1194545	1194484	62		17
		1237089	1237089	1237089	1237089	0		18
		1262293	1262293	1262293	1262293	1		19
		1354851	1354851	1354850	1354849	1		20
		1464336	1464336	1464336	1464336	0		21
		1505733	1505329	1504924	1504519	405		22
		1513561	1513481	1513401	1513321	80		23
		1521984	1521984	1521983	1521983	1		24
		1712676	1712674	1712671	1712669	3		25
		1737932	1737582	1737232	1736881	351		26
		1744805	1744736	1744666	1744597	70		27
		1762185	1762183	1762181	1762179	2		28
		2230078	2230074	2230071	2230068	4		29
		2655411	2655408	2655405	2655402	3		30

Verbundvorhaben "Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung
frequenzanaloger Sensoren"

Statusbericht Februar 1990/Gebr. Staiger GmbH

Plasma-CVD-Schichten zur Ätzmaskierung beim Siliziumätzen

Als erster Schritt wird bei Gebr. Staiger die "Technologie auf der Basis von Si-substraten untersucht. Hierzu ist eine Siliziumnitrid oder Siliziumoxidschicht zur Ätzmaskierung notwendig. Die Schichten werden im Plasma-CVD-verfahren hergestellt.

In der bisherigen Untersuchung hat sich gezeigt, daß ein entscheidender Parameter bei der Schichtabscheidung die Substrattemperatur ist. Eine zu hohe Temperatur (300 C) führt zur Rissbildung, eine zu geringe Temperatur (100 C) führt zu mangelnder Schichthaftung. Die besten Ergebnisse erhält man bei einer Abscheidetemperatur von 150 C. Oxidhaltige Schichten sind wegen zu großer Ätzraten in Kalilauge (80 C/30%) weniger geeignet, sodaß auch die ursprüngliche Vorstellung, die inneren Schichtspannungen über das O/N-verhältnis einzustellen fragwürdig erscheint.

Als Problem erwies sich das naßchemische Strukturieren der Si_3N_4 -schichten. In den HF-haltigen Ätzlösungen trat eine starke Unterätzung um ein Vielfaches der Schichtdicke auf. Durch eine zusätzliche Chrom-Haftschrift zwischen Si_3N_4 -und Fotolackschicht konnte die starke Unterätzung vermieden werden.

Neben der Untersuchung der Schichten auf die Eignung als Ätzmaskierung wurde damit begonnen die Schichten auf Eignung als freitragende Isolierschicht zu untersuchen.

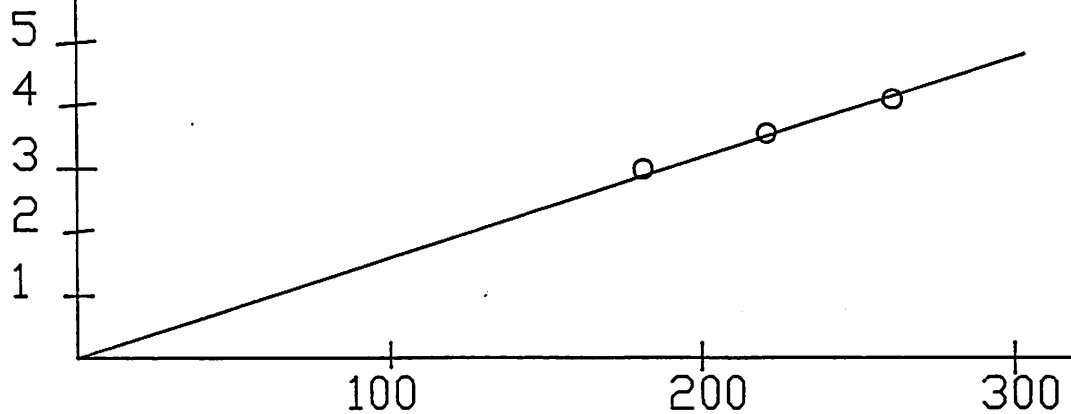
Durch Herstellung einer Si_3N_4 -Membran mit einer Kantenlänge von 2,5 mm und einer Dicke von 3 μm , sowie einer Brückenstruktur über einer V-grube konnte die prinzipielle Tauglichkeit der Plasmanitridschichten für diese Anwendung gezeigt werden.

Jedoch müssen die Schichten bzw. der Prozess noch optimiert sowie die Reproduzierbarkeit getestet werden.

Schichtdicke

[μm]

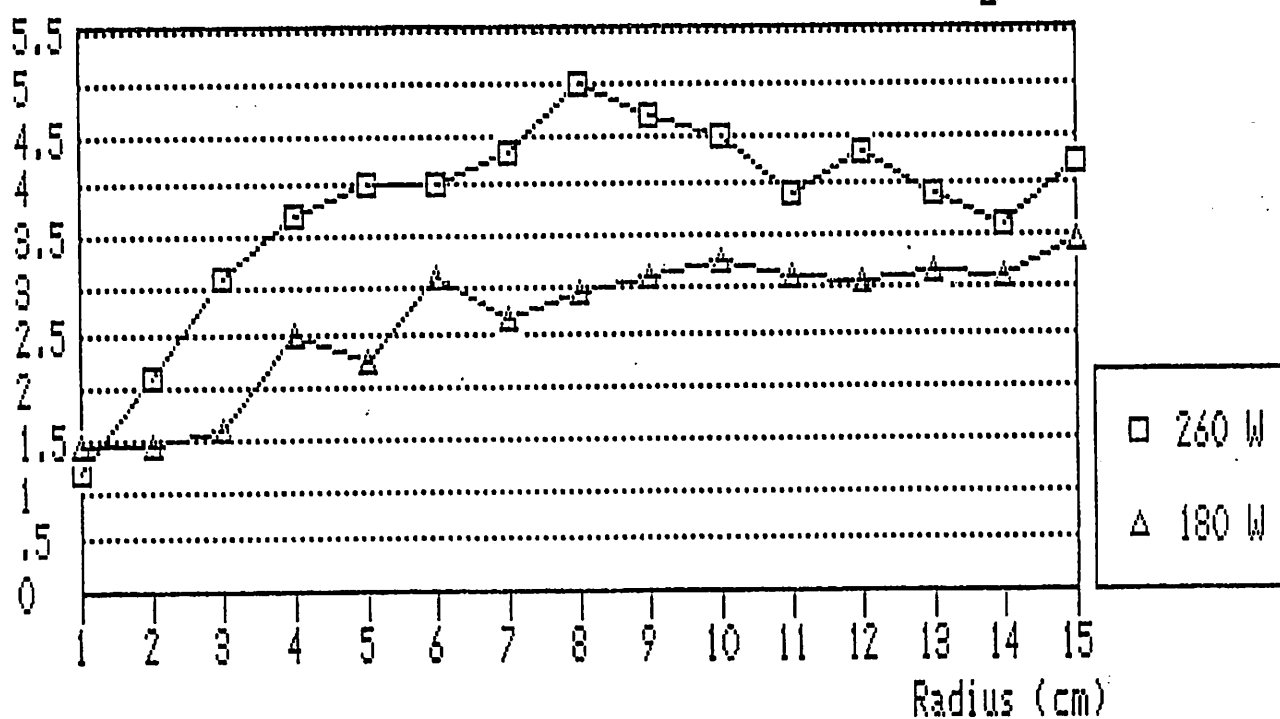
SiH₄ 24 sccm/min
N₂ 976 sccm/min
NH₃ 120 sccm/min
p = 1 mbar
T = 100 C
t = 60 min



Plasmaleistung
[W]

Dicke
(μm)

radiale Schichtverteilung



Nr.	Flow SiH4	Flow NH3	Flow N2O	Druck	Temp.	Leist.	Schicht	Ätzrate KOH 30% 80°C	Unter- ätzung (111)	Bemerk.
	sccm	sccm	sccm	mbar	°C	W		Å/min	µm/h	
1	1000	120	-	1	300	180	Si3N4			Risse
2	1000	120	-	1	100	180-260	Si3N4	9-12	ca. 20	
3	1000	120	-	1	150	220	Si3N4	22?	3,7	Bruecke
4	1000	-	40	1	150	220	SiO2	76,6		
5	936	120	40	1	150	220	SiOxNy	59,3		
6	1000	120	-	1	150	220	Si3N4	11	4,8	
7	1000	120	-	1	150	220	Si3N4		2,1	Membran
8	1000	120	-	1	150	220	Si3N4			Membran