

3. Zwischenbericht
zum
BMFT-Verbundprojekt
"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung
frequenzanaloger Sensoren"

Förderkennzeichen 13 AS 01180

Berichtszeitraum: 1.7. bis 31.12.1990

MotoMeter AG
Daimlerstraße 6
7250 Leonberg

Projektleiter: Dr. J. Erlewein

Überblick

Bis Juni 90 wurden FEM-Simulationen von unstrukturierten Membranen durchgeführt.

Im 4. Quartal 90 bearbeiteten wir dann folgende Themen

1. FEM - Simulationen von strukturierten Membranen zur Erzeugung von Schwingungen im strukturierten Randbereich
 - 2 dimensionale Modellierung eines Balkenquerschnittes (*Bild 1*)
 - Ziel: Separierung von Zugspannungen im Balkenbereich
 - * durch Variation der Form
 - * durch Optimierung der Abmessungen
 - 3 dimensionale Modellierung (*Bild 2*)
 - * Variation der Position des schwingenden Balkens in der Membran
 - * Berechnung der Resonanzfrequenzen
 - Auswertung der Ergebnisse
2. FEM - Simulationen von strukturierten Membranen zur Erzeugung von Schwingungen in der unstrukturierten Membranmitte
 - 2.1. physikalische Grundlagen
 - 2.2. Modellstruktur
 - 2.3. Aufbau und Wirkungsprinzip
 - 2.4. Ausführungsbeispiel in Quarz
 - 2 dimensionale Modellierung des Membranquerschnittes (*Bild 3*)
 - 2.5. Schwingungsanregung in Quarz
 - 2.6. Ätzmaskenentwurf
 - 2.7. Modellierung in Silizium (*Bild 4*)
 - 2.8. Diskussion der Ergebnisse (*Bild 5*)
 - 2.9. Ausblick

1. FEM - Simulationen von strukturierten Membranen zur Erzeugung von Schwingungen im strukturierten Randbereich

Beim letzten Statusbericht wurde schon deutlich, daß nur durch die Strukturierung der Membranfläche das angestrebte Ziel einer deutlichen Frequenzänderung durch Einwirkung eines äußeren Druckes erreicht werden kann. Auf der Membran werden definierte Balkenbereiche herausgeätzt, deren resonante Biegeschwingungen in der Membranebene als Sensorsignal verwendet werden soll.

Bild 1 zeigt verschiedene grundsätzliche Ätzformen. Es wird dabei die linke Hälfte des Membranquerschnittes überhöht dargestellt. Die 3 Dreiecke am rechten Strukturrand symbolisieren die Symmetrieebene der Platte. Das oberste Teilbild zeigt die unstrukturierte Platte. Mit der untersten Struktur wurden die besten Wirkungen erzielt, weil bei Druckbelastung von oben in dem Balken (Bereich zwischen den zwei Einätzungen) eine reine Zugspannung entsteht.

Nach der Modellvorstellung sollte sich damit auch die Biegeresonanzfrequenz dieses Balkens erhöhen.

Bei der dreidimensionalen dynamischen Simulation konnte die Resonanzfrequenz des Balkenteiles leider nicht als separater Mode ermittelt werden. Dadurch wurde auch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Druckänderung und Frequenzänderung im Balken festgestellt.

Auswertung:

Die Ursache für dieses Verhalten liegt vermutlich darin, daß jede Resonanzfrequenz von den beweglichen Massenanteilen bestimmt wird. Der schwingende Balkenbereich nimmt jedoch im Vergleich zur Reststruktur einen zu kleinen Massenanteil ein (*Bild 2*). Falls die Balken einen mit FEM nicht nachgewiesenen eigenständigen Schwingungsmodus haben, wird ihre Frequenz sicherlich ein mehrfaches höher sein als die erste Resonanzfrequenz der Gesamtstruktur. Gleichzeitig werden sicherlich noch viele andere Moden mit angeregt, deren Frequenzen nahe beieinanderliegen und deshalb eine Separierung des gewünschten Meßsignales nahezu unmöglich machen.

An den eingeätzten Stellen ergaben sich Spannungsspitzen, wodurch die maximal erreichbare Zugspannung im Balken ca. 1/10 der maximal zulässigen Spannung (Wechselbiegefestigkeit von Quarz) betrug. Dies hat zur Folge, daß die frequenzbeeinflussende Zugspannung sich nur geringfügig ändert und somit auch die Frequenzänderung gering ausfällt.

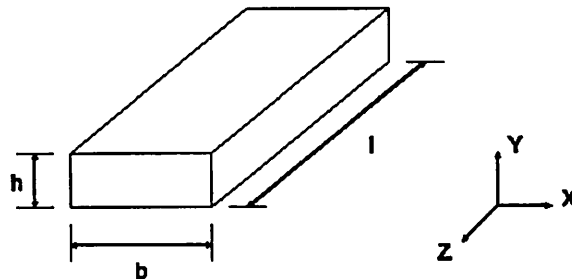
Es mußten also neue Ideen entwickelt bzw. die alten Vorstellungen erweitert werden, damit die gerade genannten Nachteile aufgehoben wurden.

2. FEM - Simulationen von strukturierten Membranen zur Erzeugung von Schwingungen in der unstrukturierte Membranmitte

2.1. Physikalische Grundlage

Die Eigenresonanzfrequenz f eines Körpers ist u.a. von seiner Masse m und Steifigkeit c abhängig, die wiederum bestimmt wird durch den Elastizitäts-Modul E , die geometrischen Abmessungen $A=b \cdot h$ u. l sowie der Schwingungsart bzw Richtung. Greifen nun Kräfte an dem Körper an, so werden dadurch sowohl die geometrischen Abmessungen des Körpers als auch u.U. die Rückstellkräfte während der Schwingungsauslenkung verändert.

Die nachstehenden Gleichungen beziehen sich auf das folgende quaderförmigen Bauteil, das an den Enden der Längsachse fest eingespannt ist.



Allgemein gilt, daß sich die Resonanzfrequenz proportional zur Wurzel der Steifigkeit verhält.

$$f \sim \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (1)$$

für die Längssteifigkeit (bei Schwingung in Z-Richt.) gilt

$$c_z = \frac{E \cdot A}{l} \quad (2)$$

und damit für die Resonanzfrequenz

$$f_z \sim \sqrt{\frac{E \cdot b \cdot h}{m \cdot l}} \quad (3)$$

Wenn nun in dem in Längsrichtung schwingende Balken (Z-Richtung) eine Druckspannung in X-Richtung erzeugt wird,

- wird die Breite b kürzer
- wird die Höhe h über die Querdehnung geringfügig größer
- wird die Länge l ebenfalls geringfügig größer
- bleibt der Elastizitätsmodul E konstant
- bleibt die Masse $m = \text{Dichte} \cdot \text{Volumen}$ konstant

Nach Formel (3) kann also die Resonanzfrequenz durch eine Druckspannung in X-Richtung verringert werden. Ist das quaderförmige Bauteil in eine Membran integriert, so muß der Einfluß der Einbindung bei der Berechnung mit berücksichtigt werden.

Anmerkung zum zugbelasteten Biegeschwinger (z.B. ETA-Kraftsensor):

Bei ihm wird die Kraft an den Enden starr eingeleitet wodurch sich die Rückstellkräfte bei Zugbelastung während der Biegeschwingung stark erhöhen. Diese bewirken die zu beobachtenden Frequenzerhöhungen. Die sich aus der Geometrieänderung ergebende Biegesteifigkeitsänderung (Verlängerung von l und Verjüngung von b und h) hat einen frequenzverringenden Einfluß, ist jedoch in Bezug auf die Rückstellkräfte betragsmäßig zu vernachlässigen. Zur Beeinflussung des Kennlinienverlaufes (Linierität) ist diese gegenläufige Frequenzbeeinflussung möglicherweise verwendbar.

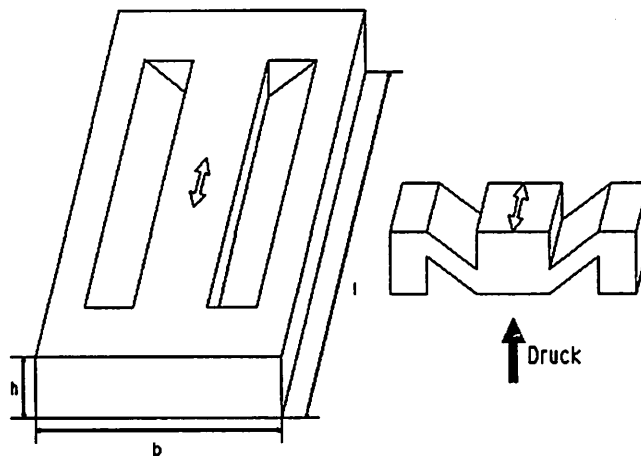
Der Vollständigkeit halber sei hier noch die Biegesteifigkeit in X-Richtung und die davon abhängige Resonanzfrequenz

$$c_x = \frac{E * b^3 * h * 16}{l^3} ; \quad f_x \sim \sqrt{\frac{E * b^3 * h * 16}{m * l^3}} \quad (4)$$

nachgetragen.

Die durch eine Zugkraft entstehenden Rückstellkräfte werden dabei nicht berücksichtigt. (Die Zusammenhänge dazu sind u.a. dem 2. Statusbericht der anderen Verbundpartner zu entnehmen.)

2.2. Modellstruktur



Im linken Teil der obigen Abbildung ist das gesamte Sensorelement abgebildet, rechts ein Ausschnitt aus dem mittleren Bereich. Die Höhe des Elementes ist wegen der besseren Übersicht im Vergleich zur Länge und Breite stark überhöht dargestellt. Die schrägen Bereiche, die durch die beidseitige Strukturierung entstehen, werden im folgenden Stege genannt. Der dicke Doppelpfeil in der Plattenmitte deutet die Longitudinalschwingung an, die durch entsprechende Anregung erzeugt werden kann.

Die Maße h , b und l liegen ungefähr in der Größenordnung von 0,125 mm, 3 mm und 12 mm; der Steg ist ca 0,015 mm dick.

2.3. Aufbau und Wirkungsprinzip

Das abgebildete Sensorelement wird am Rand ringsum druckdicht durch Thermokompression oder anodisches Bonden befestigt. Der von unten wirkende Druck bewegt den mittleren Plattenbereich etwas nach oben. Da die Stege schräg angeordnet sind (Kniehebelprinzip), wird bei dieser Aufwärtsbewegung eine horizontale Kraftkomponente in den Plattenmittenbereich eingeleitet. Es wird also durch diesen internen Hebelübersetzer eine Kraftumlenkung ins Sensorelement erreicht. Diese Horizontalkraft erzeugt eine Querschnittsverkleinerung, aus der die oben angesproche Abnahme der Steifigkeit und daraus wiederum eine Resonanzfrequenzerniedrigung folgt.

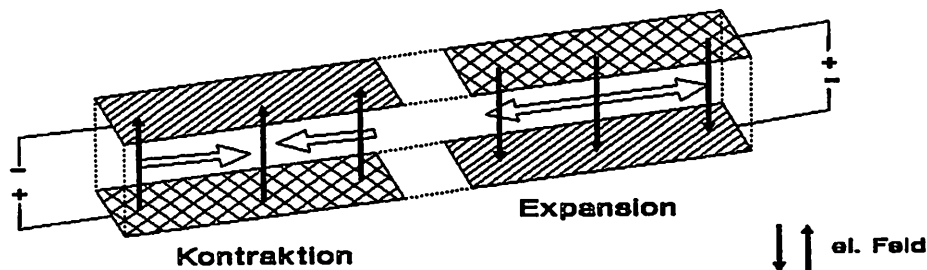
Der erzeugten Horizontalkraft überlagern sich jedoch noch die Biegespannung des Plattenrandes, des Steges und der Plattenmitte. Durch eine Variation der geometrischen Maße mit Hilfe von FEM-Simulationen wird angestrebt, daß die Horizontalspannungskomponente im Vergleich zu den Biegespannungen optimiert wird. Die Simulationen sind dazu jedoch noch nicht abgeschlossen.

2.4. Ausführungsbeispiel in Quarz

Bild 3 zeigt einen Schnitt durch eine zweidimensional modellierte Quarzplatte. Deutlich sind die Biegespannungen in der Plattenmitte zu erkennen (Dunkler Bereich oben = Zugspannung, heller Bereich unten = Druckspannung), wenn die Platte mit einem Druck von unten belastet wird. Die Stegbereiche sind fast vollständig hell, d.h. in den Stegen wirkt überwiegend eine Druckspannung.

2.5. Schwingungsanregung in Quarz

Bei dem verwendeten Flächendehnungsschwinger (z.B. GT-Schnitt) wird eine Verkürzung bzw. Ausdehnung des Balkenmittenbereiches dadurch erreicht, daß ein elektrisches Feld senkrecht zur Plattenebene durch den Plattenmittenbereich angelegt wird. Das Feld wird bei dem quaderförmigen Körper durch zwei gegenphasig angeregte Elektrodenpaare erzeugt.

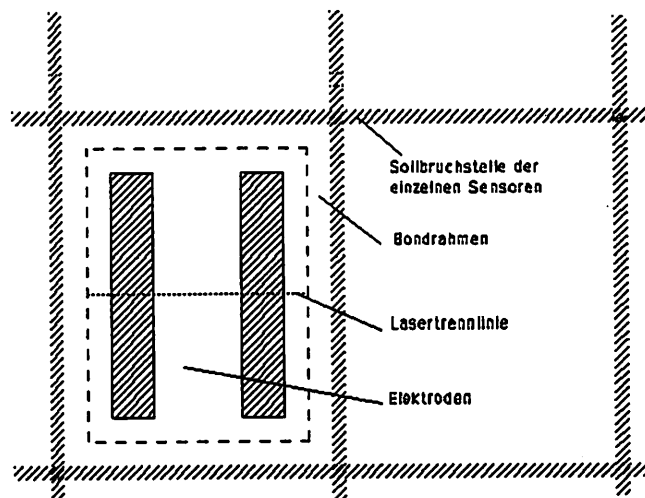


Durch die Möglichkeit der großflächigen Elektrodengestaltung erzielt man einen sehr hohen Wirkungsgrad bei der Anregung der Schwingung. Die gleichzeitige Kontraktion und Expansion an den Plattenenden bewirkt, daß sich die Plattenmitte hin- und herbewegt, und somit die Longitudinalschwingung im ersten Grundmode angeregt wird.

Um die dabei entstehende "Unwucht" so klein wie möglich zu halten, ist auch die Verwendung des zweiten Longitudinalmodes denkbar.

Als eine Alternative zum Flächendehnungsschwinger könnten auch Längs-Dehnungsschwinger, Flächenscherschwinger und unter Umständen Dickenscherschwinger durch Wahl eines entsprechenden Quarzschnittes eingesetzt werden.

2.6. Ätzmaskenentwurf



Als Ausgangsmaterial dient ein Quarzblank mit Goldauflage. Die schraffierten Flächen markieren die Stellen, an denen die Goldschicht entfernt wird. Beim Eintauchen des Quarzblanks in die Ätzlösung entstehen dann an diesen Stellen Einkerbungen. Die Einkerbungen an den gitterförmig angeordneten schraffierten Linien können als Sollbruchstelle genutzt werden, um die im Nutzen hergestellten einzelnen Sensorelemente leichter voneinander trennen zu können.

Die Einätzungen innerhalb der beiden Rechteckflächen erzeugen die Stege. Der Winkel dieser Stege ist abhängig von der Breite der Rechteckflächen, dem Quarzschnitt und der Orientierung der Maske zum Quarzblank. Da die Größe der herstellbaren Ätzwinkel noch nicht genügend erforscht ist, müssen im Vorfeld der Realisierung des vorgestellten Sensorkonzeptes noch Ätzversuche durchgeführt werden.

Die Strukturierung der Elektroden gestaltet sich sehr einfach. Man braucht nur für eine Trennung der Goldfläche im Plattenmittelenbereich zu sorgen (z.B. mit Hilfe eines Lasers). Um keine elektrische Verbindung zum Befestigungselement (Gehäuse) zu erhalten wird eine zweite, parallel zu den Außenkanten verlaufende, Lasernaht angebracht. Der Bereich außerhalb der Lasernaht wird druckdicht mit dem Gehäuse verbunden (anodisches Bonden, Thermokompression). Innerhalb der Lasernaht werden die Anschlußleitungen der Elektroden gebondet.

2.7. Modellierung in Silizium

Bild 4 zeigt einen Schnitt durch eine zweidimensional modellierte Siliziumplatte. Wieder sind die hellen Druckspannungsbereiche in den Stegen sichtbar. Beim Silizium sind die Ätzwinkel weitestgehend bekannt. Beim $\langle 100 \rangle$ Schnitt beträgt der kleinste herstellbare Winkel 45 Grad ($\langle 111 \rangle$ Stopebene). Die Optimierungssimulationen zeigen, daß zur Erreichung einer hohen Horizontaldruckspannung ein wesentlich flacherer Winkel notwendig ist (ca 5 Grad bis 25 Grad). Durch eine Anpassung der Geometrie an speziell diese Winkel sind durchaus auch Realisierungen in Silizium denkbar. Diese Anpassungsoptimierungen sind jedoch noch nicht durchgeführt.

2.8. Diskussion der Ergebnisse

Im Bild 5 sind die Resonanzfrequenzen einer dreidimensional modellierten Quarzmembran über dem angelegten Belastungsdruck aufgetragen. Die Grundbiegeschwingung in Y-Richtung ist die erste auftretende Resonanzfrequenz der Gesamtstruktur und liegt bei 67kHz mit einem Frequenzshift von 1300 Hz (bezogen auf den max. anlegbaren Druck). Der Grundmode der Longitudinalschwingung liegt bei 382kHz mit einem Frequenzshift von ca. 250 Hz. Die Druckbelastung nimmt dabei Werte von 0 bar bis ± 2 bar an.

Während die Frequenzänderung bei der Längsschwingung linear verläuft, ist bei der Biegeschwingung ein nichtlineares Verhalten zu beobachten.

Die nachstehende Tabelle zeigt einen Empfindlichkeitsvergleich verschiedener Sensoren, wobei der erreichte relative Frequenzshift $\Delta f / f$ bei maximal zulässiger Bruchspannung ermittelt wurde. (siehe 2 Statusbericht MotoMeter)

	Grundfrequenz in kHz	$\Delta f / f$
ETA Zugsensor	47	0.0294
ETA Drucksensor	28	-0.0033
MotoMeter Long.Schw.	382	-0.00063
MotoMeter Biegeschw.	67	-0.020

Die Biegeschwingung in Richtung der Druckbelastung ist deutlich empfindlicher. Es sind jedoch stärkere Einflüsse durch die dämpfende Wirkung des umgebenden Mediums zu erwarten. Ausserdem ist die Anregung dieser Schwingungsform in Quarz problematisch. Lösungsansätze sind wohl vorhanden, müssen jedoch noch näher untersucht werden.

In Silizium sind dagegen Biegeschwingungen mittels aufgebrachtener Zink-Oxidschichten anregbar. Die höhere Frequenzempfindlichkeit dieses Schwingungsmoden kann dabei den Nachteil des geringeren Effektes der Krafteinleitung durch die ungünstige Anisotropie beim Ätzen (2.7) ausgleichen.

2.9. Ausblick

Unsere nächsten Schritte sind

- erarbeiten eines Zusammenhangs zwischen geometrischen Größen und der dadurch beeinflussbaren Frequenzänderung bei Druckbelastung.
- Untersuchung von Ätzwinkeln bei Quarz in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Hahn-Schickhard-Gesellschaft (HSG).
- Herstellung von Sensorelementen aus Quarz in Zusammenarbeit mit der HSG.
- Anregung von Schwingungen in Quarzmembranen.

Bild 1

Die verschiedenen Ätzformen:

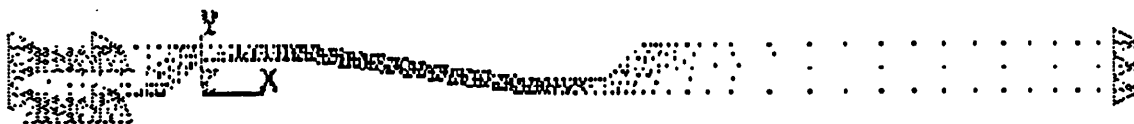


Bild 2

Gesamtgestaltung des Sensors. Ober-, Seiten- und Unteransicht:

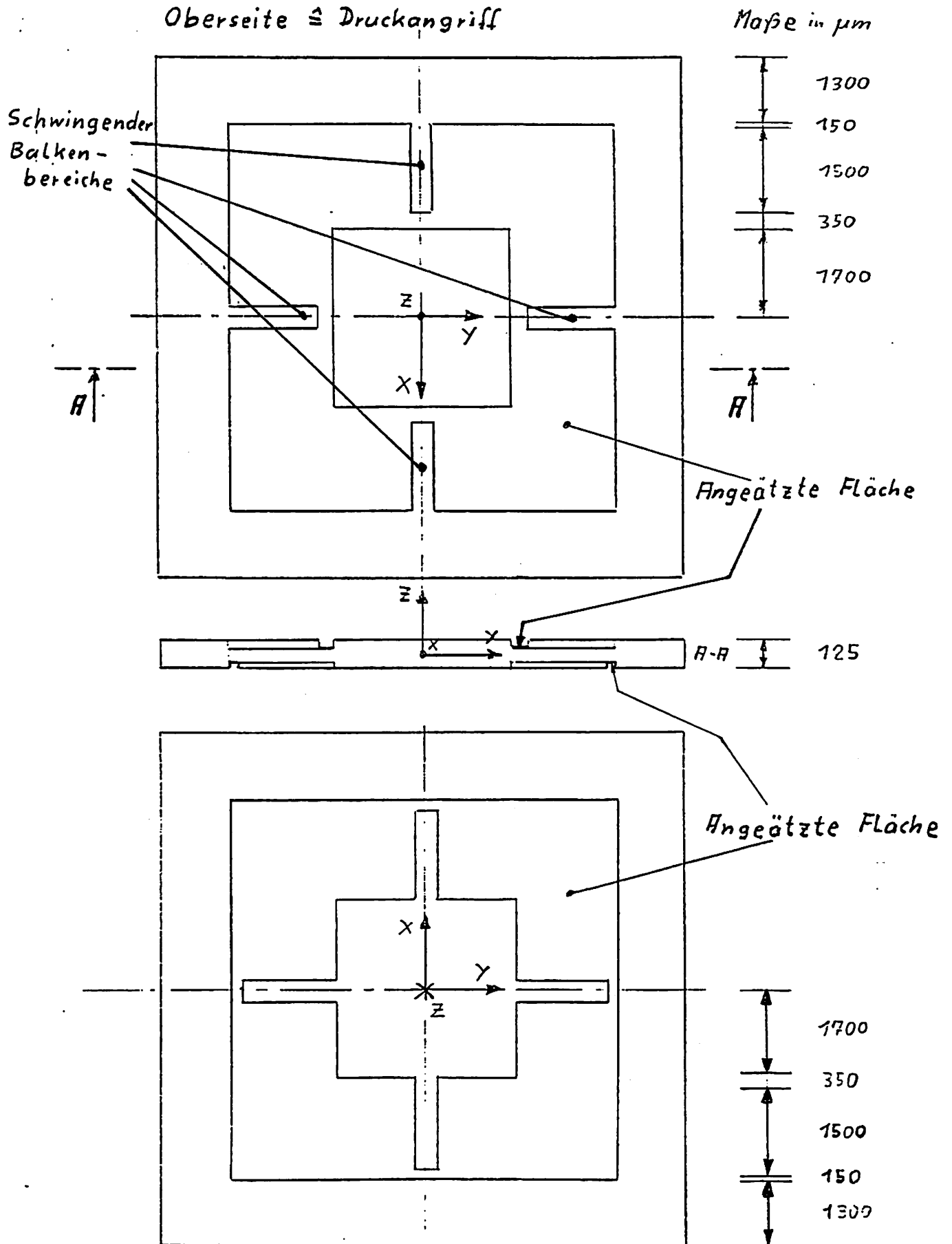
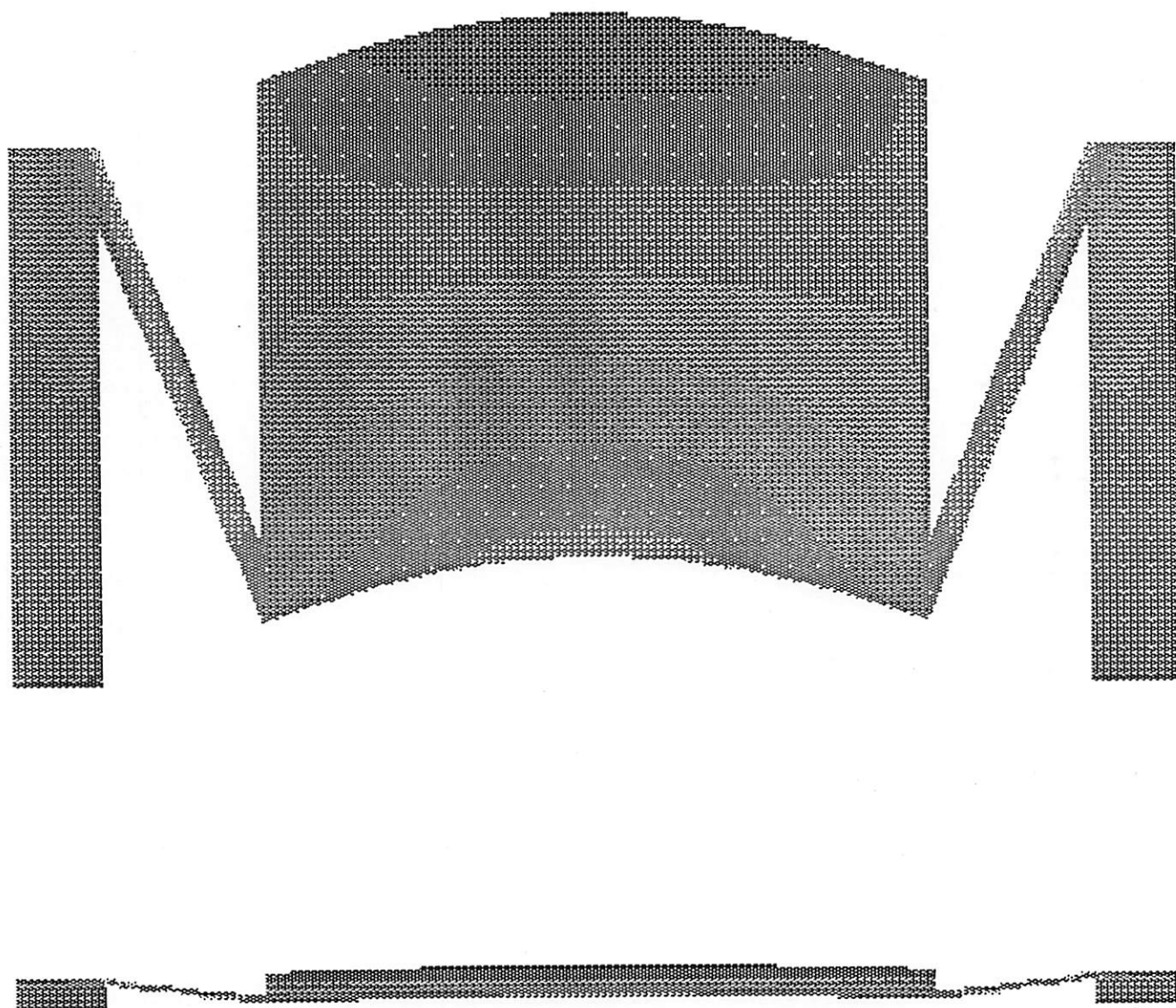


Bild 3

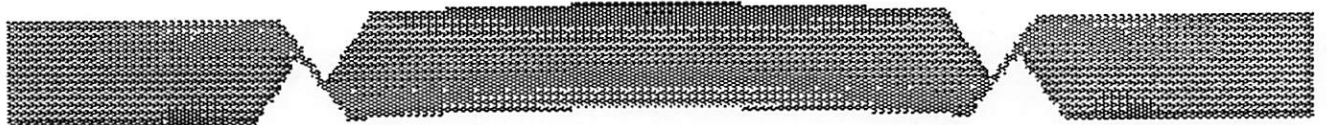
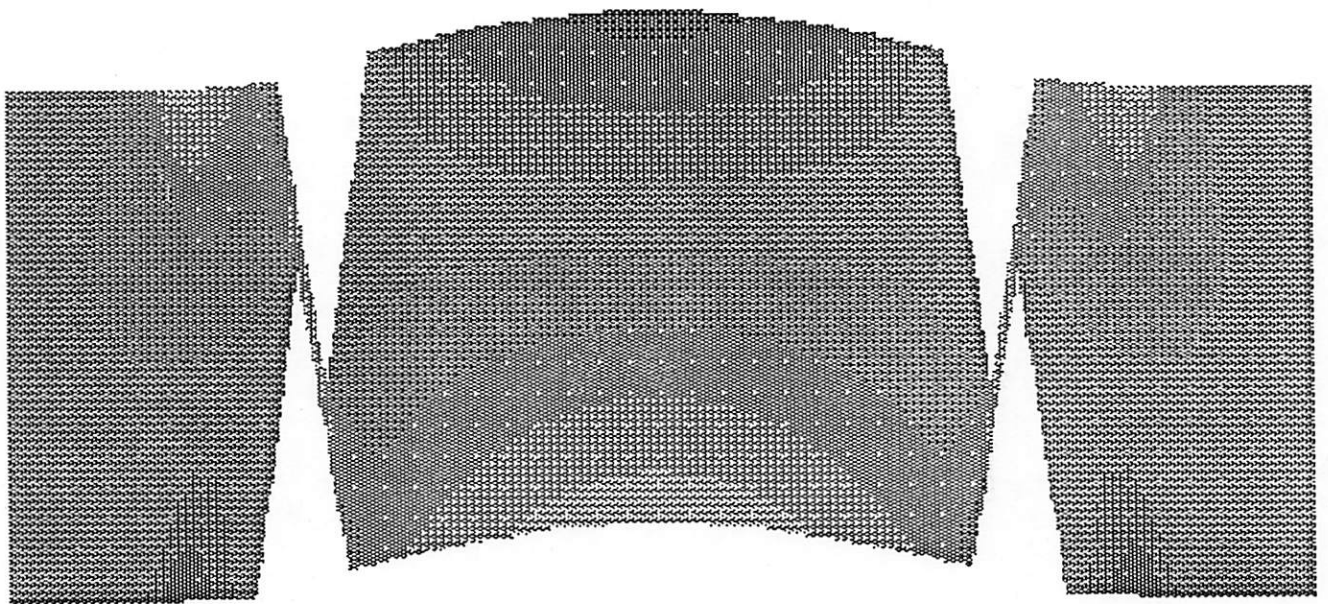
Horizontalspg. im Plattenquerschnitt bei Druckbelastung



unten: Originalgrosse; oben: 20fache Ueberhoehung

Bild 4

Horizontalspannung im Plattenquerschnitt bei Druckbelastung



unten: Originalgroesse; oben: 5fache Ueberhoehung

Bild 5

Resonanzfrequenzen = $f(\text{Druckbelastung})$

0,13x3x12 mm Quader; mit Goldauflage

