

Bericht Nr. 1 / 1991 zum BMFT - Verbundforschungsprojekt  
Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung  
frequenzanaloger Sensoren

BIZERBA Werke Balingen

TE-MS

25.06.1991

## Inhaltsverzeichnis

1. Gegenüberstellung verschiedener Anregungsmechanismen
  - 1.1 Allgemeines
  - 1.2 Matrixdarstellung denkbarer Mechanismen
  - 1.3 Berechnung von Kräften und Auslenkungen für eine gegebene Resonatorstruktur
  - 1.4 Abschätzung der Grösse der erzeugten Kräfte
  - 1.5 Berechnung zur thermischen Anregung von Resonatoren
  - 1.6 Versuchsergebnisse zur magnetischen Anregung
  - 1.7 Weitergehende Versuche
2. Versuche zur Ermittlung der Zugfestigkeit
3. Anwendung eines Kraftaufnehmers mit Quarz-Doppelstimmgabel zur Messung der Erdbeschleunigung

## Anhang

- A In diesem Bericht verwendete Materialparameter
- B Literaturstellen

## 1. Gegenüberstellung verschiedener Anregungsmechanismen

### 1.1 Allgemeines

Frequenzanaloge Sensorelemente in Form von Miniatur-Stimmgabelstrukturen erfordern eine Art der Erregung, die in die Stimmgabel integrierbar ist. Die Anregung solcher Sensorelemente durch aufgesetzte Erreger, wie dies bei grossen Stimmgabeln bekannt ist, ist wegen der kleinen Abmessungen nicht oder nur mit erheblichen Einschränkungen möglich.

Die piezoelektrische Eigenschaft von einkristallinem Quarz ermöglicht bei Stimmgabelresonatoren, die aus diesem Material gefertigt sind, eine leichte Anregung dieser Elemente.

Bei Verwendung anderer Resonatormaterialien, wie zum Beispiel Silizium oder hochfeste metallische Werkstoffe ist eine solche einfache Anregung nicht möglich, da diese Stoffe nicht piezoelektrisch sind.

Eine Möglichkeit, solche Resonatoren anzuregen, ist die Verwendung dünner, auf das Sensorelement aufgebrachtter Schichten, die piezoelektrisch sind. Über dieses Verfahren wird an anderer Stelle dieses Verbundforschungsvorhabens berichtet.

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse von Untersuchungen zusammen, welche anderen Mechanismen zur Erregung von Stimmgabelresonatoren herangezogen werden können. Es wird über rechnerische Abschätzungen und über Versuchsergebnisse berichtet. Weitere experimentelle Untersuchungen von thermischer Anregung an Silizium-Strukturen zusammen mit Firma GMS befinden sich in Vorbereitung, sie sind jedoch nicht mehr Bestandteil dieses Berichts.

## 1.2 Matrixdarstellung denkbarer Mechanismen

Zur Erregung von Stimmgabelresonatoren in Form einer selbstschwingenden rückgekoppelten Schaltung sind für die Erregung zwei Prozesse notwendig.

Dies ist zum einen der Antrieb, d.h. die Erzeugung von Kräften um eine Schwingung aufrechtzuerhalten, zum anderen ist es die Abnahme eines Signals, um mit Hilfe einer Rückkopplungsschaltung überhaupt eine selbstständige Schwingung zu erzeugen.

Diese beiden Prozesse müssen nicht notwendigerweise, wie dies bei der piezoelektrischen Erregung der Fall ist, auf dem gleichen physikalischen Mechanismus beruhen. Aus diesem Grund ist in der nachfolgenden Aufstellung Antrieb und Signalabnahme getrennt dargestellt.

In Bild 1 ist erkennbar, dass nicht alle Matrixplätze ausgefüllt sind; dies rührt daher, dass nicht alle Effekte sowohl für Anregung als auch für Abtastung geeignet sind.

Die piezoelektrische Anregung soll hier nicht näher behandelt werden da dies Bestandteil eines anderen Berichtes ist; die Magnetostriktion wird ebenfalls nicht behandelt, da zur Nutzung dieses Effekts relativ grosse Wechselfeldstärken notwendig sind, deren Erzeugung bei dem kleinen Entmagnetisierungsfaktor, den eine langgestreckte Probe im parallelen Feld besitzt, schwierig ist.

Abnahme → Antrieb ↓							
	Thermisch	Elektrodynamisch	Elektromagnetisch	Optisch	Elektrostatisch	Piezoresistiv	Piezoelektrisch
Thermisch	X	X	X	X	X	X	X
Elektrodynamisch	X	X	X	X	X	X	X
Elektromagnetisch	X	X	X	X	X	X	X
Optisch							
Elektrostatisch	X	X	X	X	X	X	X
Piezoresistiv							
Piezoelektrisch	X	X	X	X	X	X	X
Magnetostruktiv	X	X	X	X	X	X	X

Bild 1: Anregungsmechanismen für Stimmgabelresonatoren

### 1.3 Berechnung von Kräften und Auslenkungen für eine gegebene Resonatorstruktur

Zur Klassifizierung der Tauglichkeit der im vorigen Kapitel zusammengestellten Mechanismen zur Erregung von Stimmgabelresonatoren wird in diesem Kapitel zunächst die Federsteifigkeit für eine vorgegebene Struktur berechnet, und zwar für die Materialien Quarz, Silizium und zum Vergleich für Stahl.

Dabei wird eine Doppelstimmgabel mit folgenden Dimensionen angenommen:

- Länge  $l = 10.0 \text{ mm}$
- Breite  $b = 0.5 \text{ mm}$
- Dicke  $d = 0.3 \text{ mm}$

Für einen beidseitig festeingespannten Stab ergibt sich für das Flächenträgheitsmoment  $I$  (siehe etwa [1]) :

$$I = d * b^3 / 12 \quad (1)$$

und die maximale Auslenkung

$$y(\max) = F * l^3 / (384 * E * I). \quad (2)$$

Hierbei ist  $E$  das Elastizitätsmodul des Stimmgabelmaterials und  $F$  die auslenkende Kraft.

Hieraus erhält man die Federkonstante  $D$

$$D = F / y(\max) \quad (3)$$

Einsetzen von materialspezifischen Parametern (siehe Anhang A) ergibt:

	Quarz	Silizium	Stahl
$D \text{ [N/}\mu\text{m]}$	0.104	0.228	0.25

Nach der einfachen Biegetheorie ist die Dehnung  $\epsilon$

$$\epsilon = a * M / (E * I) \quad (4)$$

Hierbei ist  $M$  das wirkende Biegemoment und  $a$  der Abstand von der neutralen Fläche. Drückt man das Moment durch die Kraft und den Abstand zur Einspannstelle aus, so erhält man

$$\epsilon = F * l / (4 * E * d * b^2) \quad (5)$$

und für die Spannung  $\sigma$

$$\sigma = F * l / (4 * d * b^2) \quad (6)$$

Nimmt man eine maximale Auslenkung von  $10\text{ }\mu\text{m}$  an, so ergeben sich für die genannten Materialien folgende maximalen Spannungen und Dehnungen :

	Quarz	Silizium	Stahl
$\epsilon$ [ppm]	400	400	400
$\sigma$ [N/qmm]	34	75	83

Es ist deutlich, dass bei einer Auslenkung von  $10\text{ }\mu\text{m}$  die auftretenden Spannungen für die Materialien Quarz und Silizium bereits eine erhebliche Belastung darstellen sodass die Schwingungsamplituden in der Praxis deutlich unter diesem Wert bleiben müssen.

Hiermit ist bereits eine Bewertung der in Kap. 1.3 zusammengestellten Anregungsmechanismen möglich:

- a. Der Nachweis einer Dehnung von nur 10 % des in obiger Tabelle erhaltenen Wertes ist piezoresistiv ohne grossen Aufwand möglich, d.h. Auslenkungen der Resonatorschenkel von  $1\text{ }\mu\text{m}$  sind hiermit detektierbar.
- b. Selbst bei einer Amplitude von  $10\text{ }\mu\text{m}$  wäre bei einer optischen Abnahme ein erheblicher Justieraufwand notwendig, was die Realisierbarkeit einer optischen Abnahme einschränkt.

#### 1.4 Abschätzung der Grösse der erzeugten Kräfte

Im folgenden wird die Grössenordnung der erzeugten Kräfte für die Mechanismen

- elektrostatisch
- elektrodynamisch
- thermisch

rechnerisch abgeschätzt. Die entsprechenden Werte der elektromagnetischen Anregung können auf einfache Weise nicht berechnet werden; an anderer Stelle dieses Berichts sind experimentelle Werte für diese Anregungsart wiedergegeben.

Sowohl die elektrostatischen wie auch die elektrodynamischen Kräfte erhält man aus der Lorentzkraft pro Ladungsträger [2] :

$$\vec{f} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (7)$$

Zur Berechnung der elektrostatischen Kraft modelliert man die Zinken der Krafteinleitung durch zwei parallele Drähte und erhält aus der Formel für das Paralleldrahtsystem [3] für die Kapazität / Längeneinheit

$$C' = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln(a/r)} \quad (8)$$

Über die Ladung / Längeneinheit und das elektrische Feld erhält man dann für die Kraft / Längeneinheit

$$F' = \frac{\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot U^2}{\ln(a/r) \cdot a} \quad (9)$$

Hierbei ist  $r$  der 'Radius' der Stimmgabelzinken und  $a$  deren Abstand.

Mit  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $r = 0.5 \text{ mm}$  und  $U = 100 \text{ V}$  erhält man

$$F' = 1 \cdot 10^{-4} \text{ N/m} \quad (10)$$

Ein Vergleich mit den in Kap. 1.3 errechneten Federkonstanten zeigt, dass elektrostatisch erzeugte Kräfte für die hier zugrundegelegten Randbedingungen für eine Anregung von Resonatoren zu gering sind.

Aus dem zweiten Summanden von Gl. (7) erhält man die elektrodynamisch erzeugte Kraft / Längeneinheit durch Multiplikation mit der Ladungsträgerdichte  $n$  und dem Leiterquerschnitt  $A$  :

$$\vec{F}/LE = e n A (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (11)$$

Da die Stromdichte  $J$  dem Produkt  $env$  entspricht, folgt

$$\vec{F}/LE = A (\vec{j} \times \vec{B}) \quad (12)$$

Bei einer Stromdichte von 10 A/qmm ergibt dies

$$F/LE = 10^{-2} \text{ N/m} \quad (13)$$

Für die in Kap. 1.3 beschriebenen Dimensionen einer Doppelstimmgabel ist dieser Wert zwar immer noch etwas zu klein, wegen der starken Abhängigkeit der Federsteifigkeit von der Länge  $l$  und der Zinkenbreite  $b$  könnte diese Erregungsart bei etwas anders dimensionierten Stimmgabeln durchaus zum Einsatz kommen.

Zur Abschätzung der Grössenordnung des thermischen Effektes ist es einfacher, nicht die erzielbaren Kräfte, sondern die Dehnungen zu berechnen.

Setzt man als minimale Dehnung zur Erzielung eines brauchbaren Signals bei piezoresistiver Abnahme einen Wert von

$$\epsilon \approx 10^{-4}$$

voraus, so ergibt sich mit

$$\epsilon = \alpha \cdot dT \quad (14)$$

und einem linearen Ausdehnungskoeffizienten von  $10^{-5} / \text{grad}$  eine Temperaturdifferenz über die Breite einer Stimmgabelzinke von

$$dT = 10^\circ \text{C} \quad (15)$$



1.5 Berechnungen zur thermischen Anregung von Resonatoren

Die thermische Anregung von Resonatoren stellt einen Kreisprozess dar, der sich durch periodische Temperaturänderungen in bestimmten Zonen des Resonators auszeichnet; zur Aufrechterhaltung dieses Kreisprozesses sind Wärmeströme notwendig, die zum einen durch einen geeigneten Heizer erzeugt, zum anderen aber auch an eine Senke abgeführt werden müssen; eine Abschätzung der Charakteristika dieser Wärmeströme ist Inhalt dieses Kapitels.

Für die weitere Betrachtung ist es nützlich abzuschätzen, welcher Teil der Wärme über die Oberfläche abgegeben wird, und welcher Teil im Material des Stimmgabelzinkens abgeführt wird. Für den Oberflächenwärmewiderstand  $R_{th}(1)$  erhält man [3]:

$$R_{th}(1) = (\alpha A)^{-1} \quad (16)$$

wobei  $\alpha$  den Wärmeübergangskoeffizienten Festkörper - Luft und  $A$  die Oberfläche darstellt. Mit einem Übergangskoeffizienten von ca. 5 W/qm°C (siehe etwa [3]) erhält man

$$R_{th}(1) \approx 1.25 \cdot 10^4 \text{ K/W} \quad (17)$$

Der Wärmewiderstand im Material ergibt sich mit

$$R_{th}(2) = 1/(2bd\Gamma) \quad (18)$$

wobei  $\Gamma$  die Wärmeleitfähigkeit des Materials darstellt. Setzt man Materialwerte ein (Anhang A), so ergibt sich

$$R_{th}(2) \approx 3.3 \cdot 10^3 \text{ K/W} \quad (\text{Quarz}) \quad (19a)$$

$$R_{th}(2) \approx 2.1 \cdot 10^2 \text{ K/W} \quad (\text{Si}) \quad (19b)$$

Man erkennt, dass diese Wärmewiderstände erheblich unter dem Wert  $R_{th}(1)$  der Oberfläche liegen, sodass im folgenden der Anteil der Oberfläche am Wärmefluss vernachlässigt wird.

Der Rest dieses Kapitels beschäftigt sich mit der Abschätzung der thermischen Relaxationszeit. Zur Abschätzung dieser Grösse ist es notwendig, die Wärmeleitungsgleichung für eine Stimmgabelzinke bei gegebenen Rand- und Anfangsbedingungen zu lösen; da der Oberflächenwärmeübertrag vernachlässigt werden kann, genügt es, die eindimensionale Gleichung zu lösen:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = b \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

Die Konstante  $b$  setzt sich hierbei zusammen aus der Wärmeleitfähigkeit  $\Gamma$ , der Dichte  $\delta$  und der spezifischen Wärme  $c$ :

$$b = \delta c / \Gamma \quad (21)$$

Die Wärmeleitungsgleichung (20) ist zu lösen für eine isotherme Randbedingung am festen Ende des Stimmgabelzinkens und für eine adiabatische Randbedingung im mittleren (geheizten) Bereich.

Bei dem zunächst gewählten Lösungsverfahren über die Laplacetransformation führten diese Randbedingungen zu schwer handhabbaren Faltungsintegralen; dieser Lösungsweg wurde deshalb nicht weiter beschritten, sondern es wurde die Euler'sche Gitterpunktmethod zur Lösung der Gleichung (20) benutzt.

Die so erzielten Lösungen sind in Bild 2 graphisch dargestellt. Auf der Abszissenachse ist die Längskoordinate aufgetragen, wobei  $x = 0$  der Zinkenmitte entspricht und  $x = 6$  dem festen Ende. Die dargestellte Temperaturverteilung wurde für folgende Rand- und Anfangsbedingungen berechnet :

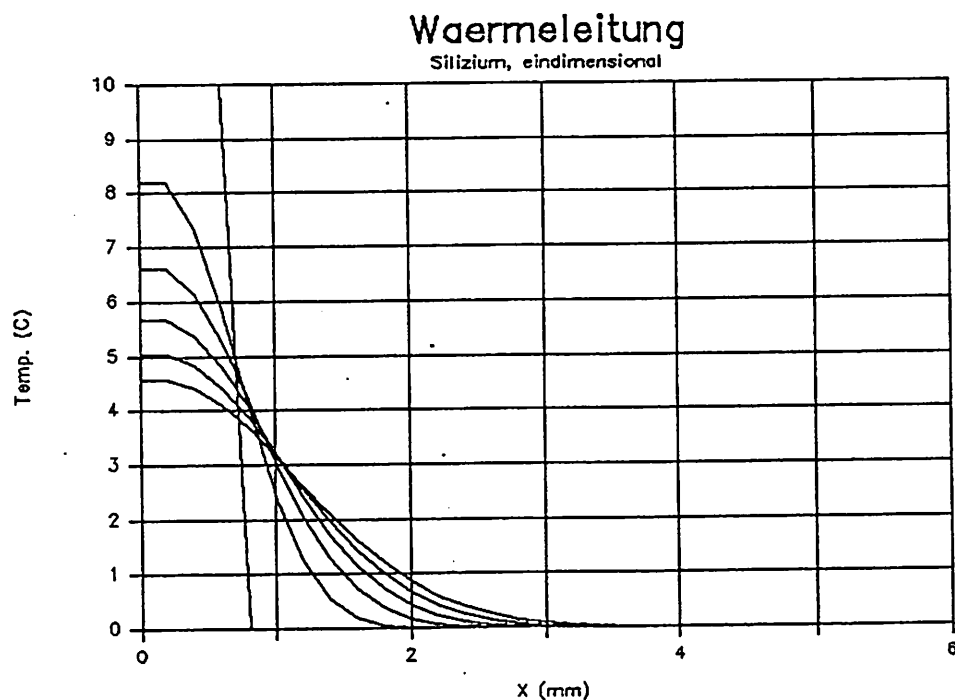
$$T(t=0, x=0) = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T(t=0, x=6) = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$x = 0 : \text{adiabatisch}$$

$$x = 6 : \text{isotherm}$$

Die 6 dargestellten Kurven entsprechen den Temperaturverteilungen für die Zeiten  $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  msec.



**Bild 2 :** Räumliche Temperaturverteilung im Stimmgabelzinken für die Zeiten  $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  msec nach Abschalten der Heizung .

## 1.6 Versuchsergebnisse zur magnetischen Anregung

### A) Anregung mit Hilfe der elektromagnetischen Kraft

Bei diesem Anregungsverfahren wird die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem statischen Magnetfeld ausgenutzt. Es kann sich hierbei um ein beliebiges Stimmgabelsubstratmaterial handeln, auf dem sich eine stromleitende Schicht befindet. In der nun folgenden Versuchsanordnung wurde experimentell die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem statischen Magnetfeld untersucht. Zu diesem Zweck wurde auf eine Titanfolie mit einer Dicke von  $50\text{ }\mu\text{m}$  ein Kupferlackdraht und zwei DMS aufgeklebt.

Die Titanfolie stellt hiermit einen empfindlichen Magnetfeldsensor dar. Senkrecht zur Stromrichtung wurde ein Stahljoch mit einem statischen Magnetfeld aufgestellt. Das Magnetfeld wurde mit Hilfe von starken Dauermagneten erzeugt. Das Titanplättchen wurde auf einer Seite horizontal im Gravitationsfeld der Erde befestigt. Auf der anderen beweglichen Seite befand sich das Magnetfeld. Die zwei DMS wurden zu einer Vollbrücke zusammengeschaltet und mit einer Batterie bzw. einem Oszilloskop verbunden. Vor dem eigentlichen Versuch wurde der Magnetfeldsensor zuerst geeicht. Bei ausgeschaltetem Strom durch den Kupferlackdraht wurde die bewegliche Seite des Ti-Streifens mit Hilfe von Milligramm-Eichgewichten belastet und der entsprechende Ausschlag am Oszilloskop notiert. Somit entstand eine Beziehung zwischen Auslenkungskraft und der Anzeige auf dem Bildschirm.

Beim eigentlichen Versuch wurde nun der Strom im Kupferlackdraht angeschaltet und anschliessend erhöht. Aufgrund der elektromagnetischen Kraft bog sich der ganze Magnetfeldsensor. Auf ein Kupferlackdrahtstück der Länge  $10\text{ mm}$  (homogener Feldverlauf) wirkt bei einem Strom von  $804.3\text{ mA}$  eine Kraft von  $0.7\text{ mN}$ .

## B) Anregung mit Hilfe eines Tonkopfes

Bei diesem Anregungsverfahren wird die Kraft eines stromdurchflossenen Tonkopfes auf ein ferromagnetisches Stück Stahl zur Schwingungserzeugung ausgenutzt. Bei dem Stahlstück kann es sich zum Beispiel um einen kompletten Schenkel einer Stahlstimmgabel handeln. Wieder fand eine 50  $\mu\text{m}$  dicke Titanfolie mit aufgeklebten DMS Verwendung. Das leicht dauermagnetische Stück Stahlblech beträgt in den Dimensionen L 10 mm x B 2 mm x H 30  $\mu\text{m}$ . Entsprechend zum Abschnitt A) wurde auch dieser Magnetfeldsensor zuerst mit Hilfe von Milligramm-Eichgewichten geeicht. Beim eigentlichen Versuch wurde diejenige Kraft bestimmt, bei der die Titanfolie vom stromdurchflossenen Tonkopf über eine Distanz von 2 mm angezogen wurde. Als Ergebnis kann man heute festhalten: Ein Strom von 15.15 mA erzeugt in einem Abstand von 2 mm eine Kraft von 0.29 mN. Der geringere Strom im Gegensatz zu Versuch A) ist mit dem Einfluss des Magnetfeldgradienten leicht zu erklären. Mit dem Verfahren B) kann man also leichter eine Stimmgabel zum Schwingen bringen, als mit dem Verfahren A).

## 1.7 Weitergehende Versuche

Ausgehend von den in Kapitel 1.6.B) gewonnenen Erkenntnissen wurden verschiedene Stahlstimmgabeln mit Hilfe eines Tonkopfes zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Das Verfahren funktionierte folgendermassen:

Mit Hilfe eines durchstimbaren Frequenzgenerators und eines daran angeschlossenen kleinen Leistungsverstärkers

wurde mit dem Ohr die individuelle Resonanzfrequenz ermittelt. Die erzwungene Schwingung war so stark, daß man bei manchen Stimmgabeln sogar den Schenkel schwingen sah! Insbesondere galt dieser Sachverhalt für eine bei BIZERBA

entwickelte und hergestellte Doppelstimmgabel aus Stahl mit den Dimensionen  $L\ 54\text{ mm} \times B\ 10\text{ mm} \times H\ 0.8\text{ mm}$ . In der Nähe des anderen Schenkels, welcher im Resonanzfall ebenfalls er-

zwungene Schwingungen ausführt, wurde bei den Experimenten ein zweiter Tonkopf befestigt. Dieser diente als Aufnehmer. Die aufgenommenen Schwingungen konnte man auf dem am Tonkopf angeschlossenen Oszilloskop sehr gut sehen!

Bei einer anderen, von der Firma HERZ hergestellten Doppelstimmgabel aus Stahl mit den Dimensionen  $L\ 25\text{ mm} \times B\ 5\text{ mm} \times H\ 0.1\text{ mm}$  konnte die angeregte Schwingung bis heute nicht sicher am Oszilloskop detektiert werden, da der Empfänger-tonkopf durch das Streufeld des Sendetonkopfes beeinflusst wurde.

Auch eine Trennung von Sende- und Empfangstonkopf um 90 Grad brachte bis heute nicht den gewünschten Erfolg. Zusätzlich besitzt diese Stimmgabel mehrdeutige Schwingungsmoden, d.h. sie besitzt keine eindeutige, starke Grundschwingung wie die bei BIZERBA hergestellte. Bei den gerade beschriebenen Versuchen handelt es sich nicht um Mikro-mechanik im eigentlichen Sinn, doch zeigen diese Versuche auch auf dem Gebiet der Kraftsensoren aus Stahl die ersten Erfolge. Eine Verkleinerung der Stimmgabelabmessungen in die Dimensionen der Mikromechanik ist sicherlich denkbar und sinnvoll. Zusätzlich arbeiten derzeit drei Verbundpartner (die Firma GMS, die Firma BIZERBA und das Hahn-Schickard-Institut) an Kraftsensoren mit thermischer Anregung zusammen. Hierbei ist folgende Aufgabenteilung vereinbart worden:

Die Firma BIZERBA stellt die zum Betrieb des Sensors notwendige Elektronik (Anregungs- und Auswertungsschaltung) zu Verfügung. Später soll der Sensor für Versuche auch in einen Lenker eingebaut werden. Das Hahn-Schickard-Institut führt FE-Berechnungen durch und die Firma GMS stellt den Kraftsensor her. Der Sensor besteht aus Silizium und wird mit Cr/Ni-Widerständen (Heizer) zu Schwingungen angeregt. Die Signalaufnahme der Schwingungen erfolgt mit Hilfe von DMS. Die Schwingfrequenz des Kraftsensors soll zwischen 4.4 und 48 kHz liegen. Momentan werden erste Testversionen des Sensors bei GMS hergestellt (aufgrund von Berechnungen im Hahn-Schickard-Institut) und die Firma BIZERBA beschäftigt sich mit der Herstellung der Anregungselektronik. Genaue Abmessungen, Details und experimentelle Ergebnisse werden in späteren Berichten wiedergegeben.

## 2. Versuche zur Ermittlung der Zugfestigkeit

Ein Schwerpunkt im Verbundprojekt bei BIZERBA stellt die Untersuchung der Schockbelastung der Resonatorwägezelle dar. Die hierbei am Sensor auftretende Kraft beträgt typischerweise bis zu 50 Newton. Aus diesem Grund wurden im Verlaufe des Verbundprojekts ausser Quarz auch andere Sensormaterialien wie Silizium und Stahl untersucht. Die reinen Zugbelastungstests wurden auf die Materialien Quarz und Silizium beschränkt. Da es bei solchen Untersuchungen genau auf die exakte Krafteinleitung an der Probe ankommt, wurden zu diesem Zweck zwei viereckige Metallplättchen mit jeweils einer Gelenkstruktur hergestellt. Die Messungen fanden nicht im Lenker statt und die Probe wurde beidseitig an ihrem Ende auf jeweils ein Metallplättchen aufgeklebt. Die Mitte der Probe liegt, im Querschnitt gesehen, exakt in der Ebene der Krafteinleitung. So wird an der Probe eine Kraft senkrecht zur Zugenebene verhindert (diese würde die Probe damit zerstören und die Messung verfälschen). Die einzelnen Proben wurden, wie schon gesagt an beiden Seiten auf den jeweiligen Klebeflächen der Metallplättchen mit einem Epoxidharz-Kleber aufgeklebt. Beide Plättchen inklusive der Probe wurden dann in eine Zugbelastungsanordnung eingehängt. Die Zugbelastungsanordnung besteht aus einem Gehänge zum Aufstellen der Belastungsgewichte, einer Umlenkrolle (über diese Rolle wird die Zugkraft bez. das Zugseil um 90 Grad gedreht), den beiden Metallplättchen mit der Probe und einem Befestigungshaken. Die gerade beschriebenen einzelnen Bestandteile der Zugbelastungsanordnung wurden mit einem strapazierfähigen Seil miteinander verbunden. Somit wurde die Probe horizontal gezogen, während man vertikal im Gehänge vorsichtig die einzelnen Gewichte aufstellte. Damit konnte man die maximale Zugkraft an der Probe unter den real gegebenen Befestigungsbedingungen bestimmen. Die einzelnen Proben wurden jeweils bis zum Bruch belastet.

Ein Teil der Zugbelastungsanordnung wurde mit einer Plexiglashaube (Splitterschutz!) überstülpt. Die Proben wurden von der Firma BOSCH bereitgestellt. Vorstellung der einzelnen Probentypen:

Probe 1: Siliziumquader mit den Abmessungen  
L 15mm x B 2.9mm x H 525µm.

Probe 2: Siliziumquader mit den Abmessungen  
L 15mm x B 2.9mm x H 380µm.

Die Proben 1 und 2 wurden aus Silizium-Wafer ausgesägt, hierbei sind seitlich an den einzelnen Proben leichte Bearbeitungsspuren zu erkennen.

Probe 3: Siliziumstimmgabel (ein schwingender Balken, zwei seitliche Verstärkungsstege) mit den Abmessungen L 20mm x B 8.0 mm x H 500 µm. Bei den Proben 3 handelt es sich um geätzte Strukturen.

Und hier nun die Ergebnisse der Zugfestigkeitsmessungen in Form einer Tabelle:

Probentyp	Bruchgrenze[N/mm*mm]	Zugkraft[N]
*****		
1	68.53	104.33
1	100.74	153.38
2	103.56	114.12
2	121.38	133.76
3	14.85	11.14
3	124.38	93.29
3	41.01	30.76

Im nächsten Zugexperiment wurden weitere Proben von der Firma Bosch auf ihre Zugfestigkeit hin untersucht.

Vorstellung der einzelnen Probentypen:

Probe 1: Siliziumquader mit den Abmessungen  
L 15 mm x B 2.9 mm x H 525  $\mu$ m.

Probe 2: Siliziumquader mit den Abmessungen  
L 15 mm x B 2.9 mm x H 380  $\mu$ m.

Die Proben 1 und 2 wurden sehr vorsichtig aus Silizium-Wafer ausgesägt, sie zeigen seitlich keine Bearbeitungsspuren mehr auf.

Im Experiment wurden nun auch diese Proben belastet. Es gelang jedoch nicht die einzelnen Proben bis zu ihrer Zerstörung zu belasten. Die maximale Belastung von 25 kg wurde aufgrund der Gefahr der Zerstörung der Gelenkstrukturen und des Zugseils nicht überschritten.

Und hier das Ergebnis in Form einer Tabelle  
(Angabe ist die maximale Belastung der einzelnen Proben):

Probentyp	Zugbelastung[N/mm*mm]	Zugkraft[N]
*****		
1	157.77	240.20
2	209.07	230.39

Aus den gerade beschriebenen Zugbelastungsexperimenten geht ein Sachverhalt deutlich hervor: Die Siliziumquader mit den glatten (unbeschädigten) Seiten- und Oberflächen sind belastbarer als diejenigen mit den rauen. Die in der Literatur angegebenen Werte bezüglich der Bruchgrenze von Silizium belaufen sich auf 200 bis 300 N/mm\*mm. Eine der Proben vom Typ 3 zeigt eine relativ hohe Zugkraft bis zu ihrem Bruch auf. Dies ist jedoch nicht die Regel, wie die anderen Proben vom Typ 3 zeigen.

Bei einem weiteren Zugbelastungsexperiment wurde eine Quarzdoppelstimmgabel (DETF-Sensor) von ETA statisch in einem Lenker für die Resonatorwaage mit Eichgewichten belastet. Der DETF-Sensor hält 29 kg statische Last auf der Lastschale aus. Dies entspricht einer Kraft am Sensor von 5.68 N. Die Bruchzugfestigkeit vom Sensor ist somit größer als 83.67 N/mm\*mm.

In weiteren zukünftigen Zugbelastungsexperimenten sollen auch Quarzquader auf ihre Bruchgrenze hin systematisch untersucht werden. Die Ergebnisse sind nicht Gegenstand dieses Berichts.



### 3. Die g-Referenzwaage

Wie im letzten Jahresbericht Nr.2/1990 beschrieben, dient die g-Referenzwaage zur Bestimmung der lokal vorherrschenden Erdbeschleunigung g. In diesem Bericht ist auch ihr Aufbau beschrieben. Die g-Referenzwaage ist jetzt betriebsbereit. Anfänglich hat es beim Zusammenbau Schwierigkeiten gegeben. Es war nicht einfach, die Quarzdoppelstimmgabel mit dem an der Stimmgabel angeklebten Gewicht von exakt 53.6 g ohne Bruch der Stimmgabel in das Aluminiumröhrchen zu bekommen! Dieses Problem ist mittlerweile gelöst, dennoch entwickelte man damals aus diesem Grund eine weitere Modifikation einer g-Referenzwaage, welche den gerade geschilderten Sachverhalt umgeht. Heute existieren somit zwei Typen von g-Referenzwaagen. Wie sieht denn nun die zweite, alternative Wägezelle aus?

Sie besteht aus einem rechteckigen Aluminiumrahmen mit den Dimensionen L 60 mm x B 20 mm x H 40 mm. Im Rahmeninneren befindet sich ein mit dem Rahmen über ein Gelenk verbundener einarmiger Hebel. Auf der freien Seite des Hebels ist ein kleines Gewicht über ein Gelenk mit dem einarmigen Hebel verbunden. Im Gravitationsfeld der Erde zieht somit das Gewicht am einseitigen Hebel. Eine Quarz-Doppelstimmgabel ist einerseits mit dem einseitigen Hebel und andererseits mit dem starren Aluminiumrahmen verbunden. Ändert sich jetzt die örtliche Gravitationsbeschleunigung g, so ändert sich die Zugkraft an der Stimmgabel. Beide g-Referenzwaagen müssen noch temperaturabgeglichen werden. Bei den Nachweisexperimenten bezüglich der Änderung der örtlichen Fallbeschleunigung wird man der alten, runden und verkapselten Version den Vorzug geben. Sie ist gegenüber Erschütterungen unempfindlicher.

## Anhang A : Verwendete Materialparameter

	Quarz	Silizium	Stahl
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2650	2330	7800
E-Modul [N/m <sup>2</sup> ]	87 E9	190 E9	210 E9
$\alpha$ [ppm/°C]	13	2.3	11
c [J/kg°C]	700	703	460
$\Gamma$ [W/mK]	10	157	17

Hierbei ist

- $\alpha$  der lineare Ausdehnungskoeffizient
- c die spezifische Wärme
- $\Gamma$  die Wärmeleitfähigkeit

## Anhang B : Literaturverzeichnis

- [1] R. Drath, technische Mechanik, Fikentscher Verlag  
Darmstadt, 1982
- [2] Lorrain/Corson, Electromagnetic Fields and Waves,  
Freeman Verlag San Francisco, 1972
- [3] H. Ebert, Physikalisches Taschenbuch, Vieweg Verlag 1978