

**Bericht Nr. 2 / 1991 zum BMFT Verbundforschungsprojekt**  
**Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung**  
**frequenzanaloger Sensoren**

**BIZERBA Werke Balingen**

**TE-MS**

**28.01.1992**

## Inhaltsverzeichnis

1. Thermisches Verfahren zur Anregung von Silizium-Resonatoren
  - 1.1 Prinzipieller Aufbau des Resonators
  - 1.2 Prinzipien der verwendeten Oszillatorschaltungen
2. Messungen mit thermisch angeregten Resonatoren
  - 2.1 Ergebnisse mit den unterschiedlichen Anregungsarten
  - 2.1 Thermographiemessungen an einem Resonator
3. Modell eines thermisch angeregten Resonators
4. Folgerungen aus den Ergebnissen zur thermischen Anregung
5. Messungen an einem Resonator mit dem Amplituden-Phasen-analysator
6. Bestimmung der Empfindlichkeit eines GMS-Resonators durch mechanisches Antasten
7. Langzeitversuche mit Aufnehmern zur Messung der Erdbeschleunigung

## Anhang

- A Literaturliste
- B Daten der Si-Resonatoren
- C Schaltbild der Erregerschaltung

## 1. Thermisches Verfahren zur Anregung von Silizium-Resonatoren

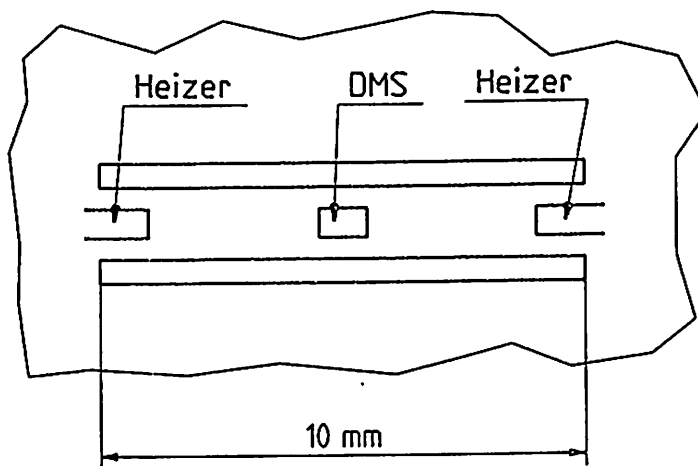
### 1.1 Prinzipieller Aufbau des Resonators

Die Verwendung von Silizium als Ausgangsmaterial zur Realisierung von Resonatoren mit Methoden der Mikromechanik ist mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, da Silizium nicht piezoelektrisch ist, und eine einfache Anregung des Resonators (wie etwa bei Quarzresonatoren üblich) nicht möglich ist.

Ausgehend von einer Voruntersuchung verschiedener alternativer Anregungsmethoden, die kein piezoelektrisches Grundmaterial benötigen, wurde das Verfahren der thermischen Anregung ausgewählt und experimentell untersucht.

Das Prinzip der hierfür von der Firma GMS entwickelten und hergestellten Si-Resonatoren ist in Bild 1 dargestellt. Die Zunge dieses Resonators ist im mittleren Bereich mit 4 Dehnungsmessstreifen versehen. Zwei dieser Dehnungsmessstreifen sind in Längsrichtung der Zunge angeordnet zur Aufnahme der Biegedehnungen, die zwei quer angeordneten Dehnungsmessstreifen sind (bis auf die durch die Querkontraktion bedingte Dehnung) passiv und dienen zur Komplettierung einer Brückenschaltung.

An beiden Enden der Zunge befinden sich zwei Heizelemente, die durch Erzeugung eines Temperaturgradienten als Antriebselemente dienen.



$$\begin{aligned} b &= 0.5 \text{ mm} \\ d &= 0.05 \text{ mm} \\ f_0 &= 4.4 \text{ kHz} \\ R_H &= 200 \text{ } \Omega \\ R_{DMS} &= 300 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

Bild 1: Schematischer Aufbau des GMS-Resonators

## 1.2 Prinzipien der verwendeten Erregerschaltungen

Der erste Schritt zum Funktionsnachweis der thermischen Anregung von Si-Resonatoren bestand zunächst in einer Anordnung zur erzwungenen Anregung des Resonators mit Hilfe eines in der Frequenz durchstimmbaren Oszillators und einer Treiberstufe für die Heizelemente. Für diesen Versuch wurde ein Resonator gewählt, dessen Resonanzfrequenz im hörbaren Bereich liegt (zu den Daten der verwendeten Resonatoren siehe Anhang B), sodass der Nachweis mit Hilfe des menschlichen Gehörs geführt werden konnte.

Mit diesem einfachen Verfahren konnte in der Tat zunächst der qualitative Nachweis geführt werden, dass das thermische Antriebskonzept prinzipiell funktioniert; zur Erzeugung hörbarer Amplituden mussten jedoch hohe Heizleistungen verwendet werden, die bis an die Zerstörungsgrenze der Resonatoren gingen.

Der nächste Schritt bestand in der Entwicklung einer herkömmlichen Rückkopplungsschaltung, wie sie in ähnlicher Weise bei den Quarzresonatoren verwendet wurde.

Mit dieser Schaltung war es nicht möglich, eine stabile und stationäre Schwingung anzuregen. Es wurde vermutet, dass bei dieser Schaltung die durch parasitäre Kapazitäten oder Induktivitäten bedingten Eingangsspannungen der Rückkopplungsschaltungen grösser waren, als die durch die Dehnungsmesstreifen erzeugte Nutzspannung. Auf diese Schaltung soll hier nicht näher eingegangen werden.

Im nächsten Schritt wurde eine Erregerschaltung auf Basis eines mitgeführten Oszillators entwickelt (im folgenden PLL-Erreger (für Phase locked loop) genannt).

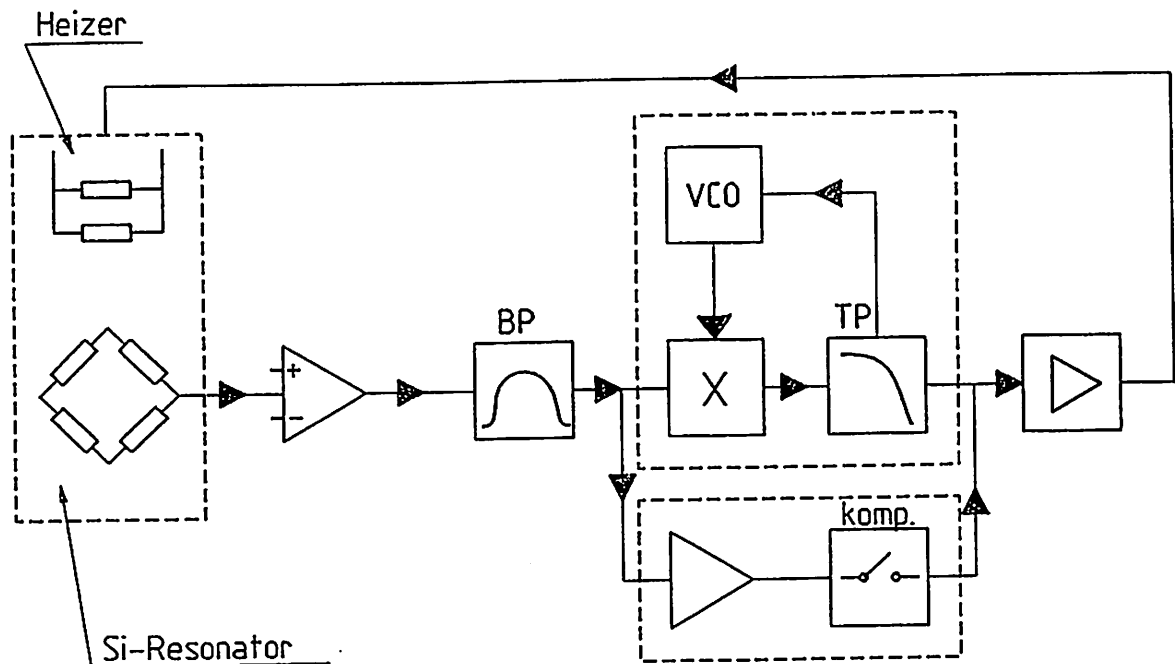
Das Prinzip dieser Rückkopplungsschaltung ist in Bild 2 skizziert.

Im linken Teil dieses Bildes ist zunächst der Resonator mit seinen beiden Heizwiderständen und der DMS-Brückenschaltung zu erkennen. Das von der DMS-Brücke erzeugte Signal wird zunächst einem Vorverstärker zugeführt, der zur Unterdrückung unerwünschter eingestreuter Signale als symmetrisch Differenzverstärker aufgebaut ist. Ein nachfolgender Bandpass BP begrenzt die übertragenden Frequenzen auf den dem jeweiligen Resonatortyp entsprechenden Bereich.

Die eigentliche PLL-Schaltung ist in Bild 2 in dem oberen gestrichelten Bereich angedeutet (der untere gestrichelte Bereich konnte wahlweise an Stelle der PLL-Schaltung verwendet werden und wird weiter unten diskutiert).

Die PLL-Schaltung besteht im wesentlichen aus einem Oszillator, dessen Frequenz durch eine Steuerspannung variiert werden kann (VCO = Voltage Controlled Oszillator), einem Mischer (in Bild 2 mit X gekennzeichnet), der im mathematischen Sinne das Produkt der vom Bandpass kommenden Spannung mit der Frequenz  $f_1$  und der vom VCO kommenden Spannung mit der Frequenz  $f_2$  bildet, sowie einem Tiefpass TP.

Das dem Tiefpass zugeführte Signal enthält Komponenten mit der Summenfrequenz  $f_1 + f_2$  und der Differenzfrequenz  $f_1 - f_2$  (siehe Hierzu etwa [1]). Nur die Komponente mit der Differenzfrequenz wird dem VCO als Steuerspannung für dessen Frequenz zugeführt.



**Bild 2:** Prinzipschaltbild der verwendeten Erregerschaltung.

Befindet sich zunächst die Differenz  $f_1 - f_2$  in einem durch die Schaltung gegebenen Fangbereich, so wird durch die interne Rückkopplung der PLL-Schaltung erzwungen, dass der interne VCO mit seiner Frequenz phasenstarr auf die dem Resonatorsignal entsprechende Frequenz gezogen wird.

Ein solches System kann als sehr schmalbandiges Filter angesehen werden, das Stör- und Rauschsignale sehr effektiv unterdrückt.

Mit einer solchen Schaltung war es möglich, einen Si-Resonator mit thermischer Anregung in einer stabilen, selbsterregten Betriebsart zu betreiben.

Nachdem mit dieser Schaltung die Resonanzstelle des Resonators aufgefunden wurde, war es Ziel eines zweiten Versuches, auch ohne PLL-Schaltung im Erreger auszukommen (die PLL-Schaltung hat für einen praktischen Betrieb auch Nachteile, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll).

Bei dieser zweiten Erregerschaltung wurde der PLL-Block in Bild 2 durch den unteren, gestrichelten Block ersetzt. Dieser Block besteht im wesentlichen aus einem weiteren linearen Verstärker und einem Komparator.

Auch mit dieser einfacheren Schaltung war es möglich, den Si-Resonator in einer stabilen, selbsterregten Betriebsart zu betreiben. Die mit beiden Verfahren gemessenen Ergebnisse sind im nächsten Kapitel beschrieben, das Detailschaltbild des Erregers findet man im Anhang C.

## 2. Messungen mit thermisch angeregten Resonatoren

Für die Versuche mit den unter 1.2 beschriebenen Anregungsschaltungen wurde ein Si-Resonator mit einer Zungenlänge von 10 mm auf einen Aluminiumträger geklebt; dieser Träger diente nur zur Fixierung des Resonators, eine definierte Krafteinleitung war bei Verwendung dieses Trägers nicht vorgesehen, man konnte aber für qualitative Tests eine mechanische Spannung auf den Resonator ausüben.

Die mit den beiden Erregerschaltungen erzielten Ergebnisse sind im folgenden tabellarisch dargestellt:

### a. gemeinsame Daten

- DMS-Speisung : 12 V entspr. 285 mW
- Heizerleistung : 2 x 70 mW
- DMS-Signalspannung : 70  $\mu$ V
- Dehnung in Zungenmitte : 6 ppm
- Auslenkung in Zungenmitte : 1  $\mu$ m

### b. PLL-Anregung

- Resonanzfrequenz : 3.76 kHz
- Freq. Änderung bei leichtem  
mech. Druck : 0.05 kHz
- Freq. Änderung bei leichter  
Luftbewegung : 0.1 kHz

### c. Geschaltete Anregung

- Resonanzfrequenz : 3.80 kHz
- Freq. Änderung bei leichtem  
mech. Druck : 0.1 kHz
- Freq. Änderung bei leichter  
Luftbewegung : 0.1 kHz

In beiden Fällen brach die Schwingung ab, wenn die Zunge des Resonators mit einem Wattestäbchen leicht berührt wurde; dies bestätigt, dass die stationäre Schwingung tatsächlich durch den Resonator bestimmt wurde und keinen parasitären Effekt der verwendeten Erregerschaltung darstellt.

In beiden Fällen stimmt die gemessene Resonanzfrequenz recht gut mit dem berechneten Wert von 4.38 kHz überein.

Die maximale Auslenkung in der Mitte der Zunge wurde über die bekannten Beziehungen beim beidseitig eingespannten Balken berechnet (siehe etwa [2]).

Bei beiden Anregungsarten war auffallend, dass eine sehr starke Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von Bewegungen der Umgebungsluft vorhanden war. Als Ursache dieser starken Querempfindlichkeit kann man Temperaturänderungen vermuten, die durch Änderung des Wärmeübergangswiderstandes an die Umgebungsluft verursacht werden.

Die Versuche und Berechnungen zur Untersuchung dieses Effekts sind in den nächsten Kapiteln beschrieben.

## 2.1 Thermographiemessungen an einem Resonator

Zur Überprüfung der thermischen Verhältnisse am Resonator wurden Thermographiemessungen mit Hilfe einer Infrarotkamera durchgeführt. Zur Einstellung des Gerätes wurde als Emissionskoeffizient der Wert 0.6 gewählt; dieser Wert gilt sowohl für Silizium als auch für Siliziumoxyd. Das Ergebnis dieser Messungen ist im den Bild 3 dargestellt.

Die Temperatur an der Stelle des eingeblendeten Fadenkreuzes ist unten am Bild angegeben.

Als wichtigstes Ergebnis kann diesem Bild entnommen werden, dass die Temperatur in der Mitte der Zunge im Bereich der Dehnungsmesselemente ca. 170°C beträgt. Die Temperatur am Zungenende im Bereich der Heizer lässt sich aus diesen Bildern nicht entnehmen, da in diesen Bildern das Zungenende nicht eindeutig zu lokalisieren ist.

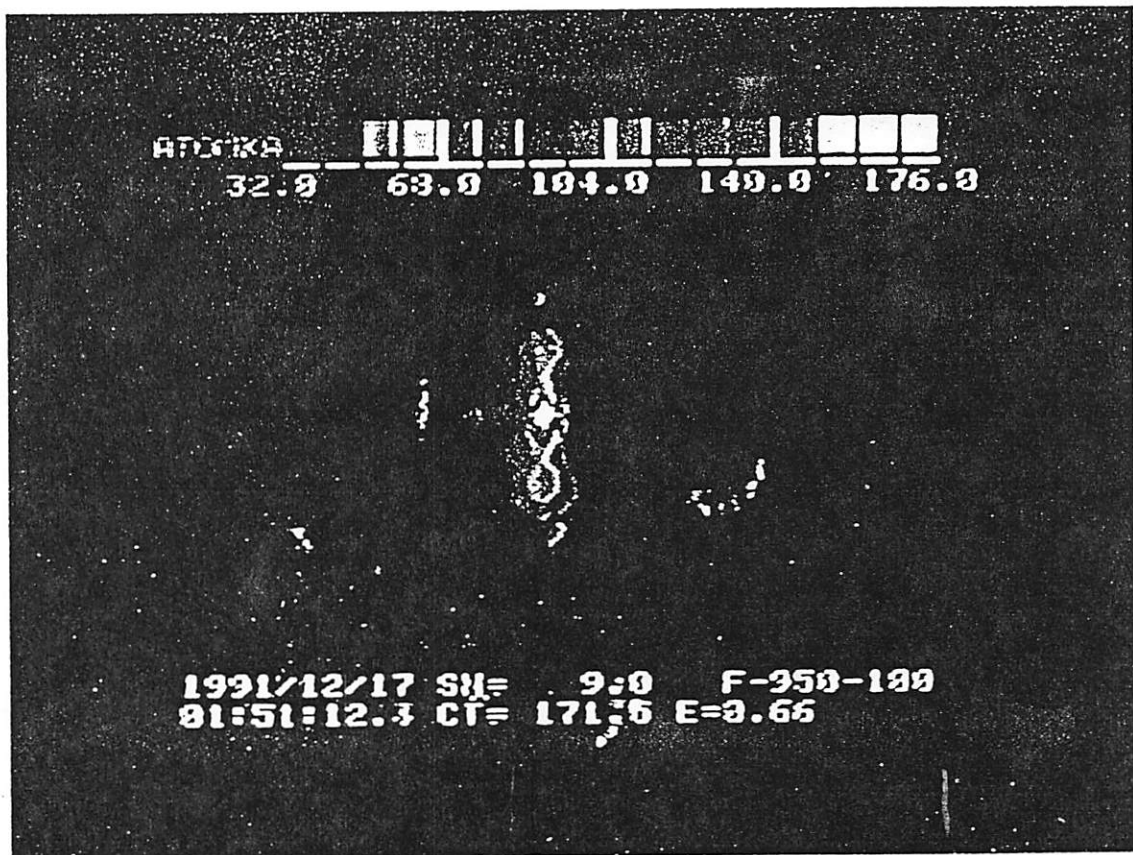


Bild 3: Thermographiaufnahme eines im Betrieb befindlichen thermisch angeregten Si-Resonators; die Temperatur in der Zungenmitte beträgt etwa 170°C.



### 3. Modell eines thermisch angeregten Resonators

Ausgehend von den Ergebnissen der Thermographiemessungen wurde ein Modell entwickelt, um die gemessene starke Querempfindlichkeit der thermisch angeregten Resonatoren gegenüber Bewegungen der Umgebungsluft nachzuvollziehen.

Dieses Modell gestattet die Berechnung der Temperaturverteilung über der Resonatorzunge bei einer in der Mitte der Zunge befindlichen Wärmequelle für den stationären Fall. Das Modell berücksichtigt bei der Berechnung der Temperaturverteilung die Wärmeleitung, den Wärmeübergang an die Umgebungsluft und (wegen der hohen gemessenen Temperaturen) auch die Wärmestrahlung.

Auf Details der Ableitung wird in diesem Bericht verzichtet, lediglich der Weg sei im folgenden kurz skizziert.

Greift man sich ein Volumenelement  $Q \cdot dx$  aus der Resonatorzunge heraus ( $Q$  = Querschnitt), ergibt eine Bilanz der in das Volumenelement einfließenden Leistung  $P_1 = P(x)$  :

$$P(x) = k \cdot U \cdot dx \cdot (T(x) - T_u) + \Gamma \cdot Q \cdot dT/dx + S \cdot U \cdot dx \cdot T^4(x) \quad (1)$$

Hierbei ist

$k$	: Wärmeübergangskoeffizient Si - Luft (ca. 10 W/(qm·K))
$U$	: Umfang der Zunge
$T$	: Temperatur
$T_u$	: Umgebungstemperatur
$\Gamma$	: Wärmeleitungskoeffizient
$Q$	: Querschnitt der Zunge
$S$	: Stefan-Boltzmann-Koeffizient

Durch Oberflächenverluste kommt an der Stelle  $x$  nur ein Teil der in der Zungenmitte erzeugten Leistung an:

$$P(x) = P_0 - k \cdot U \cdot \int_0^x (T(\tau) - T_u) d\tau - S \cdot U \cdot \int_0^x T^4(\tau) d\tau \quad (2)$$

Ableiten nach oberer Integrationsgrenze und einmaliges Differenzieren ergibt die Differentialgleichung:

$$d^2T/dx^2 = C_1 \cdot T(x) - C_1 \cdot T_u + C_2 \cdot T^4(x) \quad (3)$$

mit

$$C_1 = 2 \cdot k \cdot U / (\Gamma \cdot Q) \quad (4)$$

$$C_2 = 2 \cdot S \cdot U / (\Gamma \cdot Q) \quad (5)$$

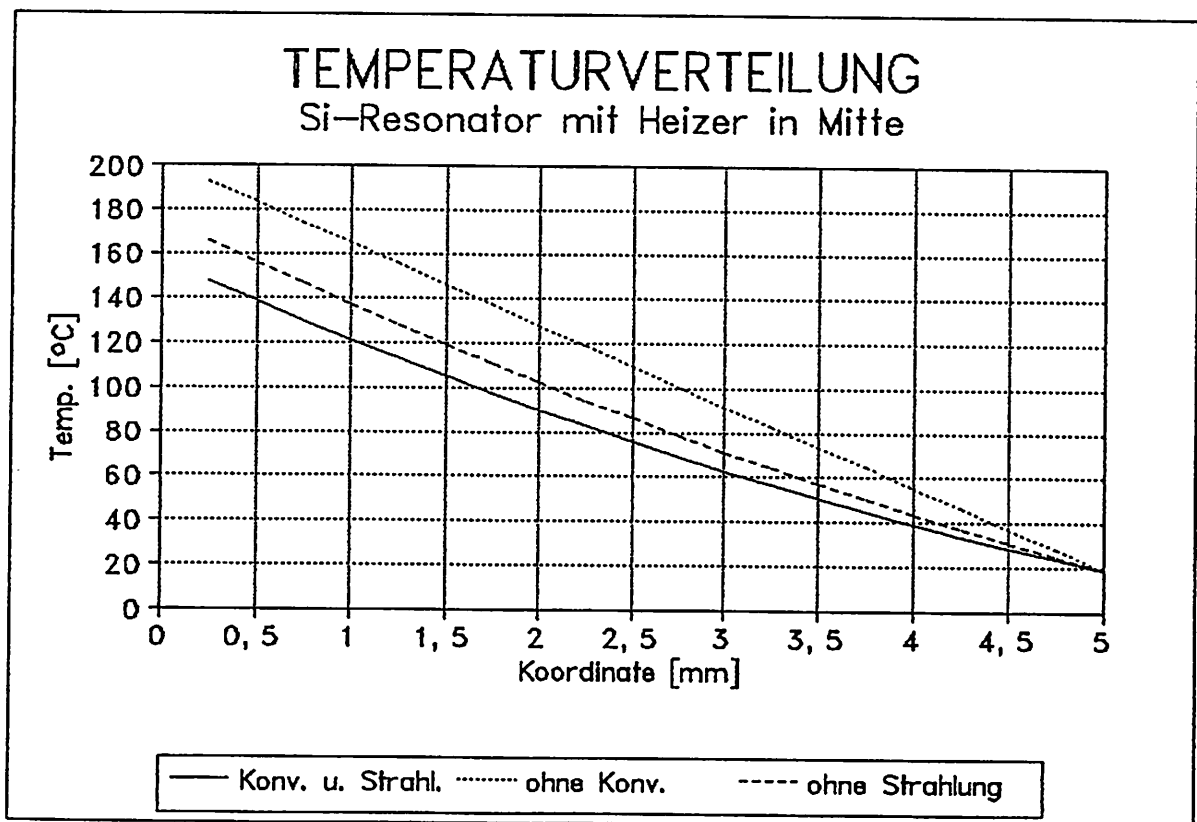
Die Lösung der Differentialgleichung (3) erfolgte wegen des nichtlinearen Terms mit einem modifizierten Runge-Kutta-Verfahren [3].

Die Lösung der DGL ist in Bild 4 dargestellt, und zwar für die drei Fälle

- a. Wärmeleitung + Konvektion + Strahlung
- b. Wärmeleitung + Strahlung
- c. Wärmeleitung + Konvektion

Die Koordinate Null entspricht der Mitte der Zunge, die Koordinate 5 mm entspricht dem Übergang der Zunge in den festen Teil.

Als Randbedingungen wurden die Temperatur am festen Teil (Umgebungstemperatur) und die Steigung bei  $x = 0$  (berechnet aus Leistung und Wärmeleitfähigkeit) vorausgesetzt.



**Bild 4:** Berechnete Temperaturverteilung; die Koordinate  $x = 0$  entspricht der Zungenmitte

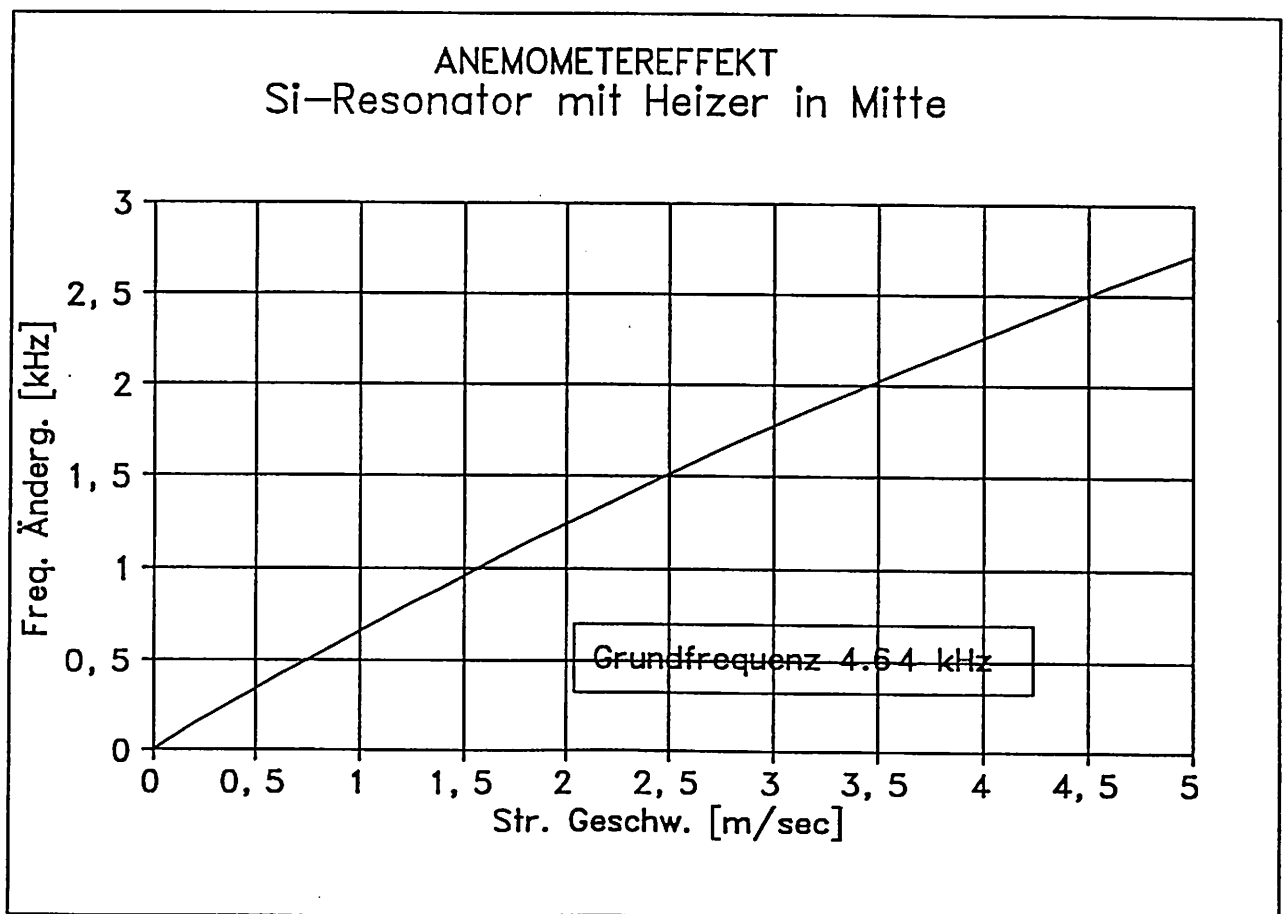
Es ist zu erkennen, dass die Konvektion etwa einer mittleren Temperaturänderung von  $10^{\circ}\text{C}$  entspricht. Eine solche Temperaturänderung bewirkt erhebliche durch den Ausdehnungskoeffizienten bedingte Spannungen in der Zunge.

Da die Wärmeabgabe über die Oberfläche an die Umgebungsluft von der Strömung der Luft abhängig ist [5], hat eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit eine Änderung der Spannung und damit eine Änderung der Resonanzfrequenz der Zunge zur Folge.

Durch Lösen der DGL (3) für verschiedene Werte des Wärmeübergangskoeffizienten  $k$  kann die Abhängigkeit der durch die thermische Ausdehnung erzeugten Spannung von der Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft berechnet werden. Über die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Spannung (z.B. [6]) erhält man dann die Resonanzfrequenz als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft. Hierbei wurde zugrundegelegt, dass eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/sec eine Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten von 4 W/(qm·K) bewirkt [5].

Dieser Zusammenhang ist in Bild 5 dargestellt. Hierbei ist die Änderung der Resonanzfrequenz über der Strömungsgeschwindigkeit der Luft aufgetragen.

Dieses Modell bestätigt die bei den Messungen bemerkten starken Querempfindlichkeiten der Resonanzfrequenz bei Luftbewegungen.



**Bild 5:** Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft.

#### 4. Folgerungen aus den Ergebnissen zur thermischen Anregung

Die obigen Messungen und Modellrechnungen zur thermischen Anregung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a. Es wurde nachgewiesen, dass bei der thermischen Anregung von Si-Resonatoren ein stationärer, selbsterregter Betrieb möglich ist.
- b. Es wurden zwei funktionsfähige Konzepte für die Erregerschaltung entwickelt; zum einen war dies das Prinzip des gezogenen Oszillators, zum anderen wurde eine geschaltete Rückkopplung verwendet.
- c. Es zeigte sich, dass die Resonanzfrequenz der thermisch angeregten Resonatoren stark von den Verhältnissen der Wärmeabgabe an die Umgebung abhängt.  
Die Grösse dieser Querempfindlichkeit bei den hier verwendeten Exemplaren lässt eine direkte Anwendung in Kraftaufnehmern nicht zu. Da diese Querempfindlichkeit im wesentlichen durch die Wärmeerzeugung der DMS-Brücke bedingt ist, sind hier folgende Verbesserungen denkbar:
  - Verringerung der Speisespannung (nur begrenzt möglich, da die nutzbare Signalspannung sehr klein ist)
  - Erhöhung des DMS-Widerstandes
  - Verwendung von DMS mit wesentlich höherem k-Faktor bei gleichzeitiger Reduzierung der Speisespannung

Weiterhin bietet der grosse gemessene Effekt der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Strömungsgeschwindigkeit der umgebenden Luft die Möglichkeit der Entwicklung eines Aufnehmers zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten mit frequenzanalogem Ausgangssignal.

### 5. Experimente mit einem Amplituden-Phasenanalysator

Bei dem Verbundpartner Bosch wurden drei Proben der Firma GMS auf ihren Amplituden- und Phasenverlauf hin in Abhängigkeit von der Frequenz untersucht. Bei den Proben handelt es sich um thermisch angeregte Kraftsensoren aus Silizium (ein schwingender Balken in der Mitte mit zwei seitlich angebrachten Überlaststegen). Die drei Proben (Muster) sollen kurz vorgestellt werden:

Probe 1: Balkenlänge 8 mm; Balkenbreite 1 mm und  
Balkendicke 70  $\mu\text{m}$ .  
Berechnete Resonanzfrequenz rund 7 kHz.

Probe 2: Balkenlänge 6 mm; Balkenbreite 1 mm und  
Balkendicke 70  $\mu\text{m}$ .  
Berechnete Resonanzfrequenz rund 12 kHz.

Probe 3: Balkenlänge 4 mm; Balkenbreite 1 mm und  
Balkendicke 70  $\mu\text{m}$ .  
Berechnete Resonanzfrequenz rund 27 kHz.

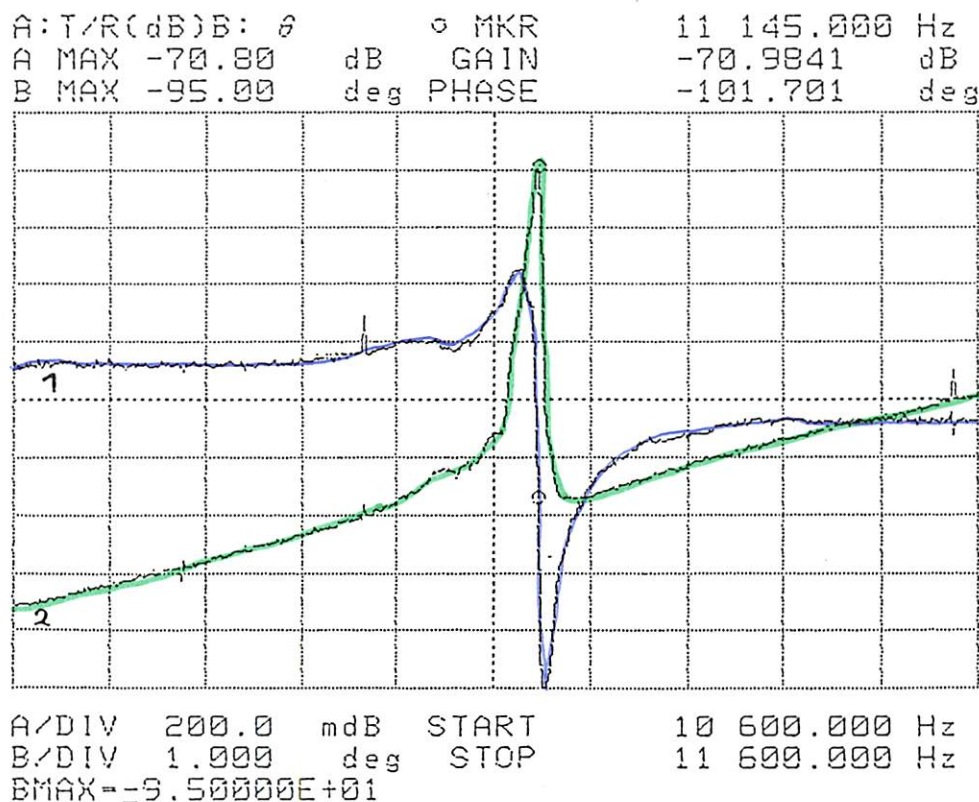


Bild 6 : Amplitude und Phase in Abhängigkeit von der Frequenz bei der Probe 2.

Im Frequenzbereich 1 kHz bis 50 kHz besaßen die Proben 1 und 2 bei ihren berechneten Resonanzfrequenzen charakteristische Strukturen im Amplituden- und Phasenverlauf. Weitere starke und damit eindeutige Resonanzstellen wurden nicht gefunden. Bei den einzelnen Amplitudenkurven beträgt die Güte  $Q$  rund 300. Bei der Probe 3 sah man im oben beschriebenen Frequenzbereich keine charakteristischen Kurven, welche auf mechanische Resonanzen schließen lassen. In Bild 1 ist das Ergebnis einer Messung an der Probe 2 aufgezeichnet. Die obere Kurve 1 stellt den Phasenverlauf, die untere Kurve 2 den Verlauf der Amplitude dar.

#### 6. Antasten eines GMS-Kraftsensors mit einer Spitze

Bei diesem Experiment wurde der zentrale Balken von einem thermisch angeregten Kraftsensor aus Silizium vorsichtig mit Hilfe einer Mikrometerschraube, an deren Ende eine Metallspitze befestigt war, aus der Ruhelage ausgedehnt. Die Spitze am Ende der Mikrometerschraube berührte den bei diesem Experiment nicht schwingenden Balken genau in seiner Mittelachse, d.h. jeweils exakt 0.5 mm vom Balkenrand weg. Der Grund für die Versuchsdurchführung war folgender:

Bei der Entwicklung der Rückkopplungselektronik kam die Frage auf, ob die Dehnungsmessbrücke in der Mitte von dem normalerweise schwingenden Balken (hier wird das Eingangssignal für eine Oszillatorschaltung abgenommen) ein genügendes Signal liefert. Zu diesem Zweck wurde die DMS-Vollbrücke mit einer Batterie und einem Oszilloskop verdrahtet. Nun wurde der mittlere Balken vorsichtig aus seiner Ruhelage ausgedehnt und die Signaländerung am Oszilloskop abgelesen. Als Mittelwert ergab sich eine Empfindlichkeit von  $18.4 \mu\text{m/mV}$ . Die Auslenkung betrug typischerweise  $70 \mu\text{m}$ . Eine später bei Bizerba entwickelte Elektronik war mit diesem vom Sensor gelieferten Ausgangssignal in der Lage den Sensor seinerseits über die Heizwiderstände wieder zum Schwingen anzuregen.

## 7. Langzeitversuche mit den g-Referenzwaagen

Mit beiden Versionen der g-Referenzwaage wurden im Zeitraum August bis Dezember 1991 Langzeitversuche bezüglich der Signalstabilität in Abhängigkeit von der Zeit bei Bizerba durchgeführt. Die Experimente fanden im Temperaturschrank statt. Bei der einen g-Referenzwaage handelt es sich um eine Version mit einem einseitigen Hebel, bei der anderen g-Wägezelle handelt es sich um die Version mit dem runden Belastungsgewicht im Aluminiumrohr. Als Sensor dient immer eine DETF-Quarzstimmgabel. Als Ergebnis kann man festhalten:

Das frequenzanaloge Wägezellensignal der Version mit dem einseitigen Hebel ist nicht langzeitstabil! Im Mittelwert lief pro Woche das Signal um 0.12 Hz weg! Die Messtemperatur betrug konstante 23°C. Die soeben erwähnte Drift liegt in der Größenordnung vom Messeffekt, d.h. Änderung von g bezüglich der Strecke Stuttgart Rom bezogen auf die hier beschriebene Wägezelle. Die Ursache für die Frequenzverschiebung liegt in der Verwendung eines sehr weichen Hebelgelenks. Zusätzlich ist diese Wägezelle empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen. Eine Abschätzung liefert einen Wert von 0.9 Hz/°C. Der Grund für die Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen liegt wiederum in der Verwendung der weichen Gelenkstruktur. Aufgrund der nicht gegebenen Langzeitstabilität fällt diese Version der g-Referenzwägezelle zur Messung der örtlich vorherrschenden Fallbeschleunigung leider aus. Mögliche Driftgründe für das frequenzanaloge Wägezellensignal: Kriechen vom Kleber und Verschmutzung des Sensors. Die g-Referenzwägezelle im Aluminiumzylinder ist mit ihrem Gewicht empfindlich gegenüber Erschütterungen. So bekam bei den Experimenten die DETF-Quarzstimmgabel im Temperaturschrank bzw. allgemein durch die hängende Anordnung zwischen der Fertigstellung der Wägezelle und der ersten Messung im Temperaturschrank regelmäßig kleine Risse, wobei bei der Messung das Wägezellensignal unerwartet nicht mehr eindeutig war und sprunghaft sehr stark "umherdriftete". Teilweise passierte der gerade geschilderte Sachverhalt sofort bei der 1. Messung, teilweise erst im Verlauf der 1. Messung. Um die am Temperaturschrank eingestellte Temperatur von 23°C zu halten, muss der Schrank laufend den Prüfraum kühlen bzw. erwärmen. Hiermit ist unweigerlich ein leichtes Rütteln des Schranks verbunden. Zusätzliche Temperatureinwirkung verstärken die Mikrorisse in der Stimmgabel. Bei der anschließenden Fehlersuche fiel bei vorsichtiger Behandlung der Wägezelle regelmäßig das konstante Belastungsgewicht deutlich hörbar auf den Aluminium-Bodenstopfen an der unteren Seite vom Alurohr (Behandlung der Wägezelle wie beim Transport zwischen dem Aufbewahrungsort vor der ersten Messung und der ersten Messung im Temperaturschrank. Beim Transport fiel das Gewicht jedoch nie ab). Bei den Experimenten wurde das konstante Belastungsgewicht von 54 g auf 20 g geändert.

Die Stimmgabel bekam wieder kleine Risse. Die Stimmgabel ist immer an den Berührungspunkten zwischen den schwingenden Doppelbalken und den Befestigungsenden abgebrochen. Alle Zuleitungsdrähte und die Oszillatorschaltung waren nach dem Bruch der Stimmgabel in Ordnung. Ebenso wurde die g-Referenzwaage nach ihrer Fertigstellung sofort auf ihre Funktion hin überprüft. Offensichtlich ist die bisherige Version in ihrer Entwicklung noch nicht genügend ausgereift. Die Verbindung "Quarzstimmgabel - Deckelteil" und "Quarzstimmgabel - rundes Belastungsgewicht" ist einfach noch zu steif. Diese Steifigkeit ist im Prinzip sehr gut, denn somit wird ein wildes Umherzittern der gesamten Anordnung unterbunden. Dies zeigt sich sicherlich in einer erhöhten Signalstabilität. Dennoch muß man sich der Wirklichkeit beugen! In weiteren Experimenten wird versucht sowohl die Verbindung "Quarzstimmgabel - Deckelteil" als auch die Verbindung "Quarzstimmgabel - rundes Belastungsgewicht" mit Hilfe von Gelenkstrukturen gegenüber Erschütterungen unempfindlich zu machen, d.h. beide Verbindungen werden mit Hilfe von dünnen (rund 50  $\mu\text{m}$  dicken) nichtmagnetischen, nichtrostenden Metallfolienstreifen realisiert. Hierbei wird die Stimmgabel als auch der Deckelteil bez. das runde Belastungsgewicht und die Stimmgabel mit je einer Gelenkfolie verbunden. Man erhofft sich hierbei eine Verkleinerung der Bruchgefahr der Quarzstimmgabel in ihrem Übergangsbereich zwischen den schwingenden Doppelbalken und den Befestigungsenden.



Anhang A : Literaturhinweise

- [1] Bronstein-Semendjajew, Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, 1972
- [2] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag 1986, Kapitel 2.4.8 .
- [3] Handbuch zu Turbo Pascal Numerical Methods Toolbox, BORLAND International, USA
- [4] Kuchling, Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt

Anhang B : Technische Daten der Silizium-Resonatoren

Balkenlänge des Resonators [mm] (Schwingbalkens)	Frequenz [kHz]	Kraftempfindlichkeit [1/N]
10	4.38	1.39
8	6.85	0.89
6	12.17	0.50
4	27.39	0.22

Alle Sensoren besitzen folgende gemeinsame Eigenschaften:

Balkenbreite des Resonators 1 mm.  
Balkendicke des Resonators 50  $\mu$ m.  
Balkenbreite des Verstärkungssteiges 1 mm.  
Balkendicke des Verstärkungssteiges 0.38 mm.  
Widerstand des Heizerelements 200 Ohm.  
Widerstand eines DMS-Brückenelements 300 Ohm.  
Berechnete Bruchbelastung des Kraftsensors 50 N.  
Gesamtbreite des Kraftsensors 3 mm.

