

6 Thermisch angeregte resonante Siliziumsensoren mit DMS

H. BARTUCH

GMS GESELLSCHAFT FÜR MIKROTECHNIK UND SENSORIK MBH, ST. GEORGEN

6.1 Aufgabenbeschreibung

Die thermische Anregung stellt eine technologisch relativ unkompliziert zu verwirklichende Möglichkeit des Antriebes resonanter Strukturen dar und wird auch theoretisch gut verstanden. Letzteres wird insbesondere aus den umfassenden Untersuchungen von allerdings sehr dünnen, ca. $2\text{ }\mu\text{m}$ dicken resonanten Si-Brücken deutlich [1/].

Das Ziel der vorliegenden Arbeiten bestand im wesentlichen darin, zu überprüfen, inwieweit dieses Antriebsprinzip für massereichere Balkenstrukturen eingesetzt werden kann. Dazu wurden Si-Balken (Dicke: ca. $50\text{ }\mu\text{m}$, Breite: 1 mm) unterschiedlicher Länge ($3\text{--}10\text{ mm}$) mittels anisotroper Ätztechnik in thermisch oxidierten (100)-Si-Wafern hergestellt und mit an den Balkenenden positionierten NiCr-Mikroheizern versehen. Auf dem Balken befinden sich weiterhin vier zu einer Vollbrücke verschaltete NiCr-Meßwiderstände. Infolge Impulsbeheizung wird der Balken zu Eigenschwingungen angeregt. Die periodische Dehnung bzw. Stauchung der Meßwiderstände führt zu einem frequenzanalogen Brückensignal, das sehr gut geeignet ist, um Veränderungen im Resonanzverhalten nachzuweisen. Abbildung 6-1 macht das Prinzip deutlich.

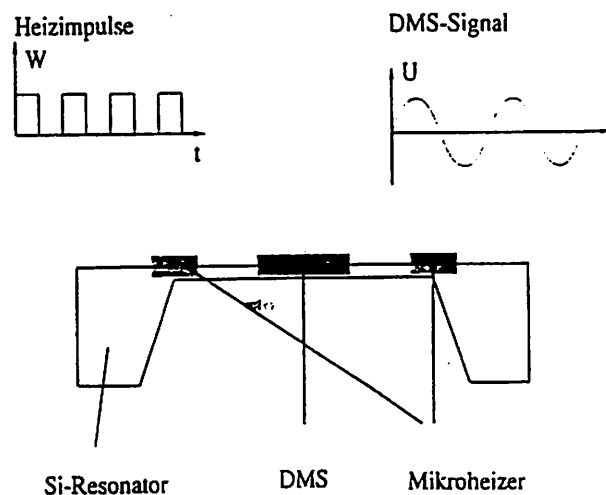


Bild 6-1 Wirkprinzip des elektrothermischen Antriebs

Arbeitsschwerpunkte bildeten

- die Entwicklung einer Labortechnologie , insbesondere die Einführung der anisotropen Ätz-technik, zur Musterfertigung;
- Layoutentwicklung auf der Basis statischer und dynamischer FEM-Berechnungen;
- Entwicklung einer elektronischen Ansteuerschaltung ;
- die Charakterisierung des Schwingungsverhaltens der Si-Balken im Ergebnis elektrothermischer und Fremdanregung und
- Untersuchungen zum sensitiven Verhalten der Resonanzfrequenzen.

6.2 Herstellung und Charakterisierung anisotrop geätzter resonanter Balkenstrukturen

Aus Bild 6-2 wird die geometrische Form der Si-Resonatoren ersichtlich. Mittels anisotropen Ätzens in KOH wurden auf der Vorderseite von beidseitig polierten (100)-Wafern 50 µm tiefe V-Gruben paarweise im Abstand von 1mm erzeugt. Zwischen Breite b_V der V-Gruben und ihrer Tiefe t_V gilt hierbei der einfache Zusammenhang

$$b_V := \frac{t_V}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

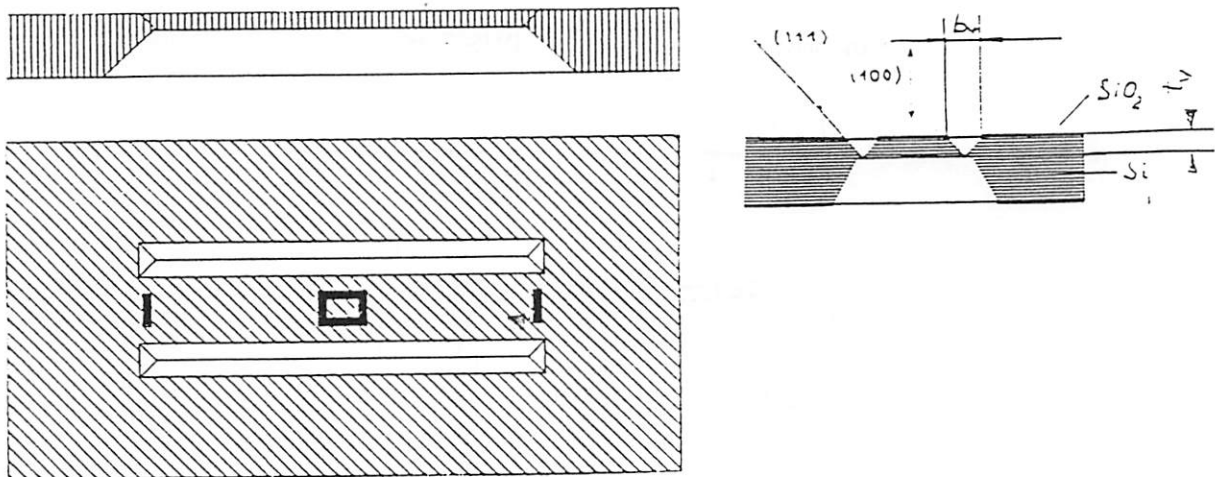
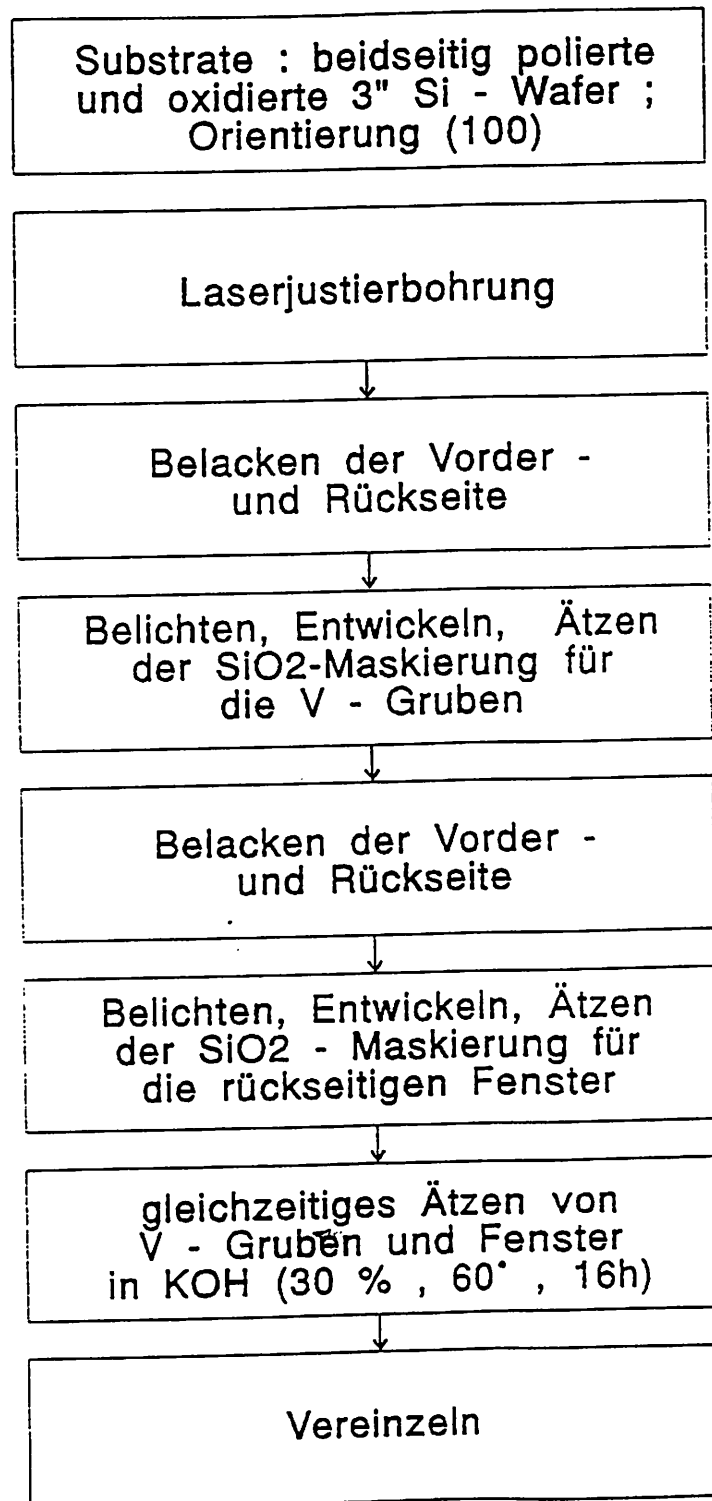


Bild 6-2 Geometrische Form der Si-Resonatoren (schematisch)

Die Länge der V-Gruben variierte zwischen 3, 4, 6, 8, 10 mm. Durch rückseitiges Fensteröffnen bis an ihre Spitzen entstanden schließlich Balken mit den gewünschten Abmessungen. Als Maskierungsschicht gegenüber dem Ätzangriff der KOH-Lauge wurde thermisch erzeugtes SiO_2 mit einer Dicke von ca. $1.5 \mu\text{m}$ genutzt. Nachfolgend ein vereinfachtes Flußdiagramm des technologischen Ablaufs:



Gemäß der Beziehung

$$f_0 := 1.026 \cdot \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E_{110}}{\rho}} \quad (2)$$

für einen an beiden Seiten fest eingespannten Balken mit

Balkendicke $t = 50 \mu\text{m}$

reduziertem E-Modul $E_{110} = 1.7 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$

Dichte $\rho = 2.329 \text{ g/cm}^3$

sind für die verschiedenen Balkenlängen l die in Tabelle 6-1 zusammengestellten Resonanzfrequenzen für die Grundmode zu erwarten.

<u>Balkenlänge l /mm/</u>	<u>Resonanzfrequenz f_0 /Hz/</u>
10	4380
8	6850
6	12170
4	27390

Tabelle 6-1 Analytisch berechnete Resonanzfrequenzen der Grundmoden für verschiedene Balkenlängen

Durch FEM-Rechnungen, die darüberhinaus noch die Eigenfrequenzwerte für die erste und zweite Obermode lieferten, wurde die analytischen Werte für f_0 bestätigt und bei Fremdanregung mit piezoelektrischen Dickenschwingern und Aufnahme des Frequenzspektrums mittels Laservibrometer und Spektrumanalyzer in guter Übereinstimmung auch tatsächlich gefunden [2]. Den experimentellen Messungen gingen sorgsame Untersuchungen über den Einfluß der Einspannung und der piezoelektrischen Ankopplung voraus.

In Tabelle 6-2 sind die Werte zusammengestellt. Abbildung 6-3 zeigt ein typisches Spektrum für einen 10mm-Schwinger mit zusätzlichen Frequenzpeaks, die auf die Einspannung zurückgeführt werden können.

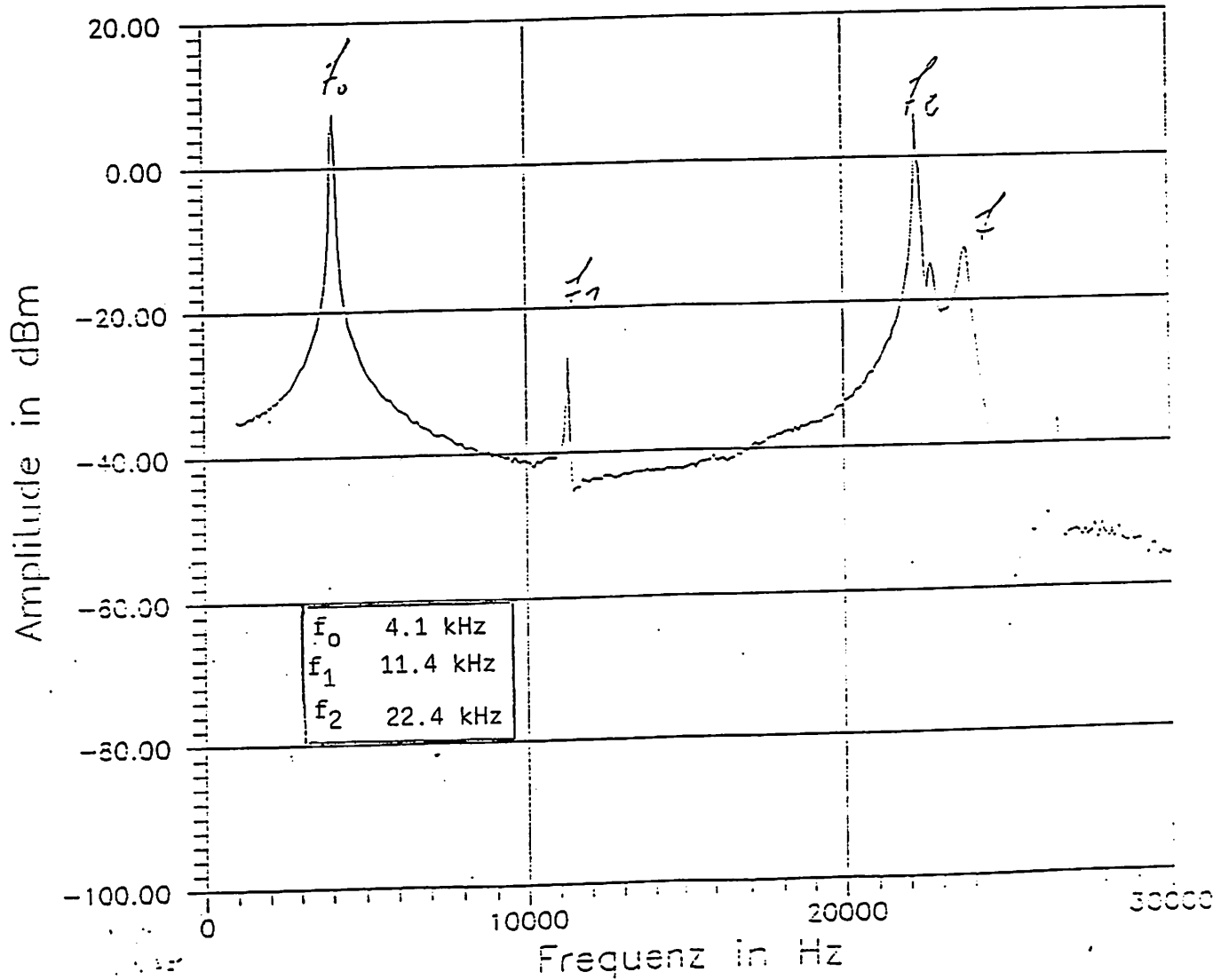


Bild 6-3 Frequenzspektrum eines fremdangeregten 10mm-Schwingers

Tabelle 6 -2 Mittels FEM berechnete und während piezoelektrischer Fremdanregung gemessene Resonanzfrequenzen von Si-Resonatoren unterschiedlicher Länge

1	Berechnung			Messung			
	f_i [Hz]	berechnet	Verhältnis	Balken #	gemessen	Güte	Verhältnis
10	f_0	4380	1,00	1	4150	296	1,00
				2	-	-	-
	f_1	12050	2,75	1	11390	872	2,75
				2	-	-	-
	f_2	23560	5,38	1	22410	442	5,40
				2	-	-	-
8	f_0	6850	1,00	1	7180	377	1,00
				2	7330	488	1,00
	f_1	18840	2,75	1	19900	836	2,77
				2	18990	950	2,59
	f_2	36850	5,38	1	36610	610	5,10
				2	36260	1133	4,95
6	f_0	12170	1,00	1	14080	140	1,00
				2	13740	138	1,00
	f_1	33470	2,75	1	38320	50	2,73
				2	37580	257	2,73
	f_2	65470	5,38	1	-	-	-
				2	-	-	-
4	f_0	27390	1,00	1	26860	290	1,00
				2	26120	523	1,00
	f_1	75320	2,75	1	-	-	-
				2	-	-	-
	f_2	147350	5,38	1	-	-	-
				2	-	-	-
3	f_0	48700	1,00	Eigenfrequenzen nicht eindeutig detektierbar			
	f_1	133930	2,75				
	f_2	262000	5,38				

6.3 Realisierung des thermischen Anregungsprinzips

6.3.1 Technologie und Layout

Zusätzlich zu den unter Pkt. 6.2 aufgeführten zwei Strukturierungsebenen zum Ätzen der Si-Balken sind weitere drei Ebenen notwendig, um aus dem (vor der Si-Ätzung) mittels PVD-Verfahren aufgetragenen Metallschichtsystem NiCr-Ti/Pd/Au (für lötbare Außenkontakte) bzw. NiCr-Ti/Pd/Au /Au galv. (für bondbare Außenkontakte) die Heizer- und DMS-Widerstände sowie das Kontaktsystem durch übliche naßchemische Prozesse zu strukturieren. Das vereinfachte Technologieablaufschaema findet sich in Bild 6-4.

Als wenig günstig erwies sich die im 1. Layout gewählte Anordnung der DMS-Brückenwiderstände, da in dieser Anordnung nur zwei der vier Widerstände zur Signalspannung beitragen und außerdem eine stark inhomogene Wärmeverteilung im Balken auftritt. Im Redesign wurden deshalb zwei Widerstände in die Nähe der Balkenenden positioniert (Bild 6-5). Die Verbesserung der Werte geht aus Tabelle 6-4 hervor, wobei zur Schwingungsanregung die in Bild 6-6 als Blockschaubild dargestellte Erregerschaltung genutzt wurde. Hierbei handelt es sich um eine Schaltung auf der Basis eines mitgeführten Oszillators (PLL-Schaltung) /3/. Das

Tabelle 6-4 Charakteristische Parameter thermisch angetriebener 10mm-Resonatoren für
1. Layout und Redesign

Balkenlänge: 10mm	1. Layout	Redesign
elektr. Leistung /mW/:		
Heizer	600	640
Brücke	1120	1280
Temperaturdifferenz /°C/		
Mitte/Rand	60	30
Tmax	100	68
DMS-Signal /mV/		
(Spitze/Spitze; Verst. 250)	40	200
Auslenkung /µm/	ca. 1	ca. 1

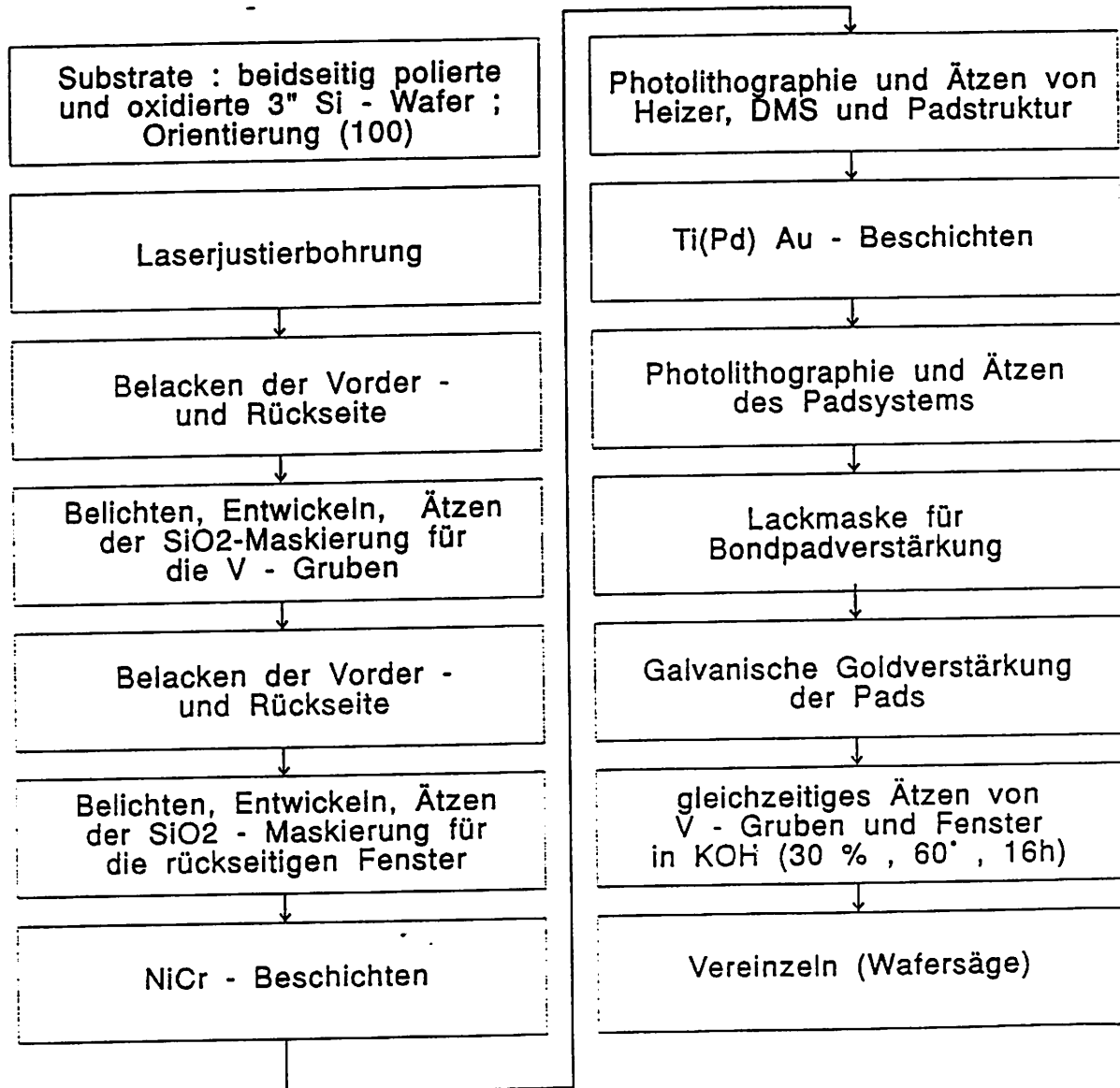


Bild 6- 4 Technologieablaufschemata zur Realisierung des thermischen Anregungsprinzips auf der Basis von Metalldünnschichtprozessen

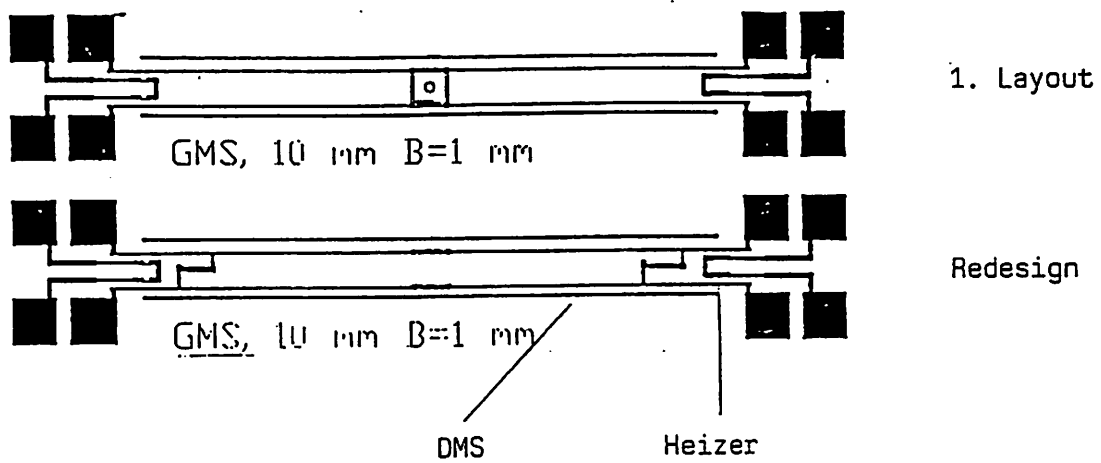


Bild 6-5 Anordnung von Mikroheizer und DMS-Brückenwiderständen im 1. Layout und im Redesign (schematisch)

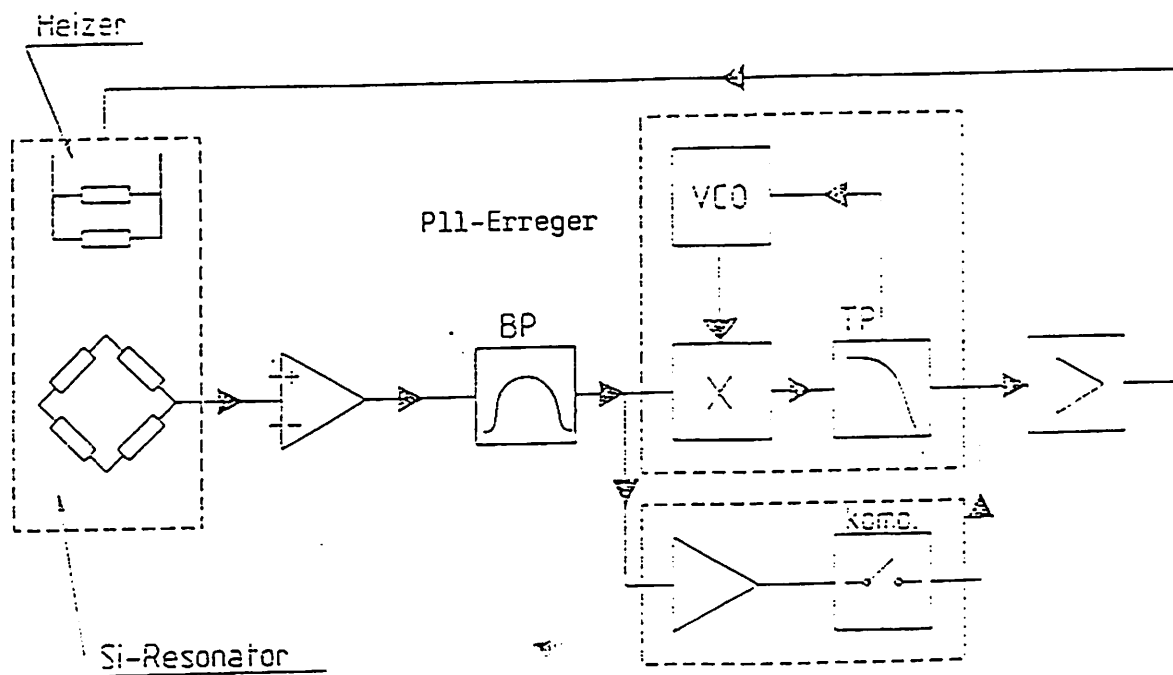


Bild 6-6 Blockschaltbild der PLL-Erregerschaltung

von der DMS-Brücke (Speisespannung $\pm 12\text{V}$, Brückenwiderstand ca. $450\ \Omega$) erzeugte Signal wird zunächst einem Vorverstärker zugeführt. Ein nachfolgender Bandpaß BP begrenzt die übertragenen Frequenzen auf den jeweiligen Resonatortyp. Der PLL-Schaltkreis sorgt nun dafür, daß der interne VCO (Voltage Controlled Oscillator) phasenstarr auf die dem Resonatorsignal entsprechende Frequenz gezogen wird. Eine nachgeschaltete Transistorendstufe versorgt dann die Mikroheizer (Heizwiderstand $300\ \Omega$) des Si-Resonators mit Rechteckimpulsen von 12V Spitzenspannung.

6.3.2 Untersuchungen zur Stabilität des Kontaktschichtsystems

Beim Betreiben thermisch angeregter Resonatoren können u. U. je nach Design und AVT hot-spots mit Temperaturwerten deutlich über 120°C auftreten. Während von NiCr-Schichten eine Fülle experimentellen Materials darüber vorliegt, daß sie in diesem Bereich und darüberhinaus eine hohe thermische Stabilität besitzen [4,5], mußten diesbezügliche Untersuchungen am in Frage kommenden Kontaktschichtsystem Ti/Pd/Au, welches ansonsten solche Forderungen wie

- Niederohmigkeit
 - Löt- und Bondbarkeit
 - Ätzresistenz gegenüber KOH
- erfüllt, durchgeführt werden.

Dazu wurden die in Tabelle 6-5 zusammengestellten Schichtsystemvarianten betrachtet. Ihre Abscheidung erfolgte in Vakuumfolge mittels Elektronenstrahlverdampfen. Zur Kontaktformierung wurden zwei Tempervarianten gewählt

V1 : 280°C , 2.5h Luft V2 : 350°C , 24h N₂

Tabelle 6-5 Schichtsystemvarianten für Optimierungsuntersuchungen am Kontaktsystem (Angaben in Klammern: Schichtdicke in nm)

lfd. Nr.	Haftschicht/ Diffusionsbarriere	Lötschicht	Bondgrundsicht
1 (Standard)	Ti (50)	Pd (448)	Au (160)
2	Ni (50)	Pd (448)	Au (160)
3	Ni (50)/Ti (60)	Pd (448)	Au (160)
4	-	Ni (400)	Au (160)

Die Veränderungen im Kontakt wurden mittelbar durch Auswertung der Widerstandsänderung niederohmiger ($< 200 \text{ Ohm}$) NiCr-Testwiderstände mit bekannter Schichtalterung nach Impulsbelastung und Ofentemperatur erfaßt. Als Parameter für die Impulsbelastung wurden gewählt: Impulslänge 1s; Frequenz 0.1 Hz; Heizstrom 70 mA; Heizleistung 0.95 W. Die Impulsspitzentemperaturen lagen dann bei 175°C . In Bild 6-7 sind typische Kurvenverläufe nach Impulsbelastung von gelötet kontaktierten Widerständen dargestellt. Bild 6-8 zeigt als Beispiel Alterungskurven von Widerständen mit verschiedenen Kontaktsystemen nach Ofentemperatur bei 150°C . Zum Vergleich wurde eine Untersuchungsgruppe gelötet und eine zweite gebondet.

Die experimentellen Befunde lassen sich dahingehend zusammenfassen, daß

- eine signifikante Zunahme des Kontaktübergangswiderstandes bei Bondverbindungen und Temperaturen bis 200°C unabhängig von der geprüften Variante nicht festgestellt wurde;
- Lötverbindungen mit Standardschichtsystem bei entsprechender thermischer Vorbehandlung (Variante 2) bis ca. 160°C verwendbar sind;
- die anderen Schichtaufbauten bei Lötkontaktierung keine Verbesserung erkennen lassen.

Damit konnte abgesichert werden, daß sich die Si-Resonatoren mit einem Metallschichtsystem NiCr-Ti/Pd/Au für Antriebs- und Signalgeberelemente auch für Einsatztemperaturen $> 120^\circ\text{C}$ verwenden lassen

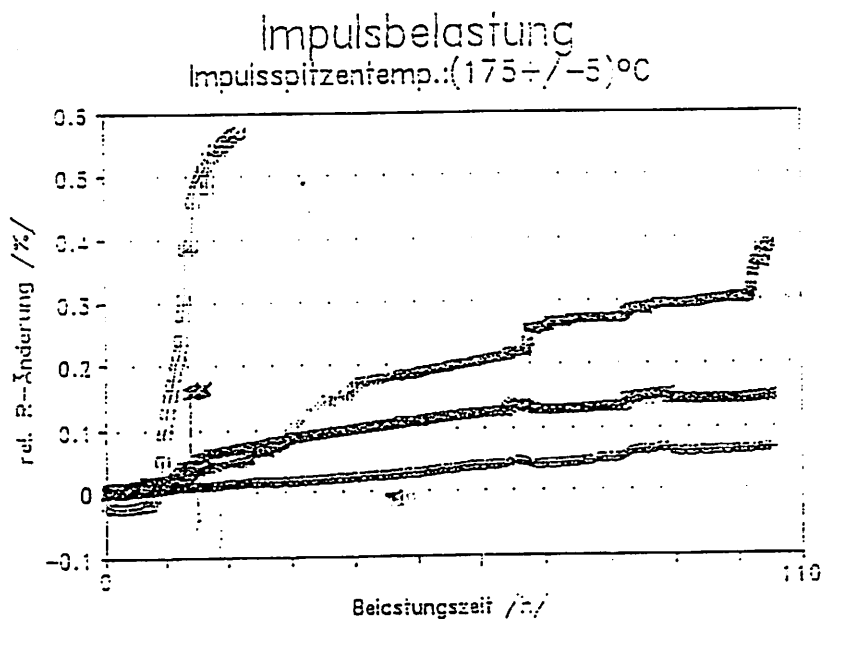
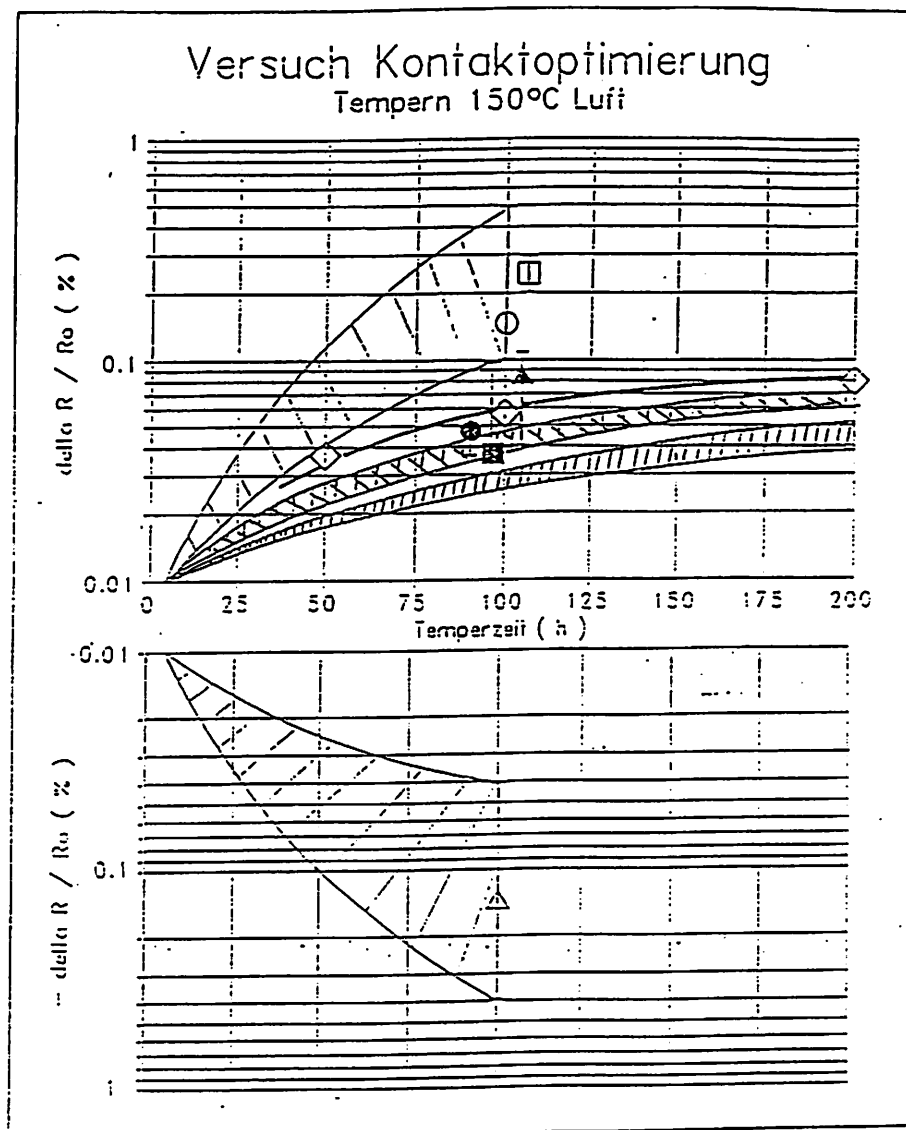


Bild 6-7 Typische Kurvenverläufe der Widerstandsalterung auf Grund von Kontaktveränderungen nach Impulsbelastung (Schichtsystem: Standard; Kontaktformierung: V1)



Kontaktaufbau	Vorbehandlung	gelötet	gebondet
Ni/Au	280°C		
	350°C		
Ni/Pd/Au	280°C		
	350°C		
Ni/Ti/Pd/Au	280°C		
	350°C		
NiCr-Grundkurve 280°C			

Bild 6-8 Beispielkurven der Widerstandsalterung durch Kontaktveränderung nach Ofen-
temperung (Spalte "Vorbehandlung": 280°C = V1 ; 350°C = V2)

6.4 Sensitives Verhalten der thermisch angeregten Si-Resonatoren

Grundsätzlich bereitet es keine Probleme, die Resonatoren mittels der unter Pkt. 6.3.1 beschriebenen Erregerschaltung oder einfach mittels Frequenzgenerator zum Schwingen anzuregen. Bild 6-9 zeigt als Beispiel die Gain-Phase-Kurve eines 8 mm-Balkens. Die Güten der Resonatoren liegen (z.T. stark streuend) für die Grundmode bei Werten um 250 ± 70 .

Auch mit Metallisierung finden sich ausgeprägte Resonanzen genau in den Frequenzbereichen, die auch für unbeschichtete Balken zutreffen, wenn die elektrische Verlustleistung klein und mithin die Temperaturüberhöhung auf dem Balken wenige Grad nicht überschreitet. Allerdings werden, bedingt durch die symmetrische Lage der Mikroheizer, nur symmetrische Moden (Grundmode, zweite Obermode) angeregt. FEM-Rechnungen und experimentelle Modalanalyse [6] zeigen hierzu hervorragende Übereinstimmung (Bild 6-9).

Bei Erhöhung der in der DMS-Brücke umgesetzten elektrischen Leistung erhöht sich die Temperaturdifferenz des Balkens zur Umgebung. In Übereinstimmung mit Ergebnissen in der Literatur [7] nimmt die Frequenz der Grundmode stark ab, um ab einer bestimmten Temperaturerhöhung wieder zu steigen (Bild 6-10). Dieses Verhalten muß bei Verwendung der Resonatoren als Sensorelemente berücksichtigt werden, um Mehrdeutigkeiten bei der Signalauswertung zu vermeiden.

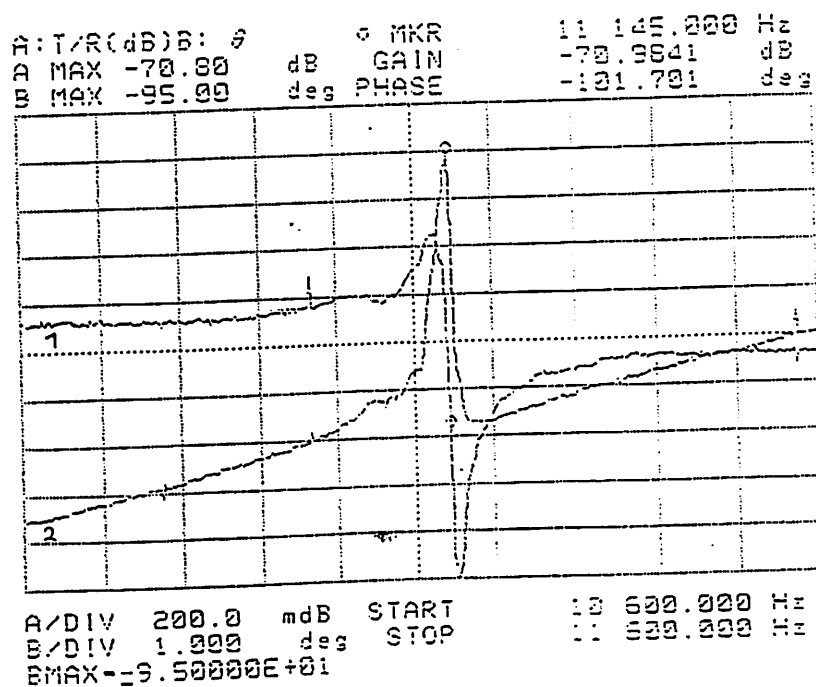


Bild 6-8 Gain-Phase-Kurven eines 8mm-Balkens

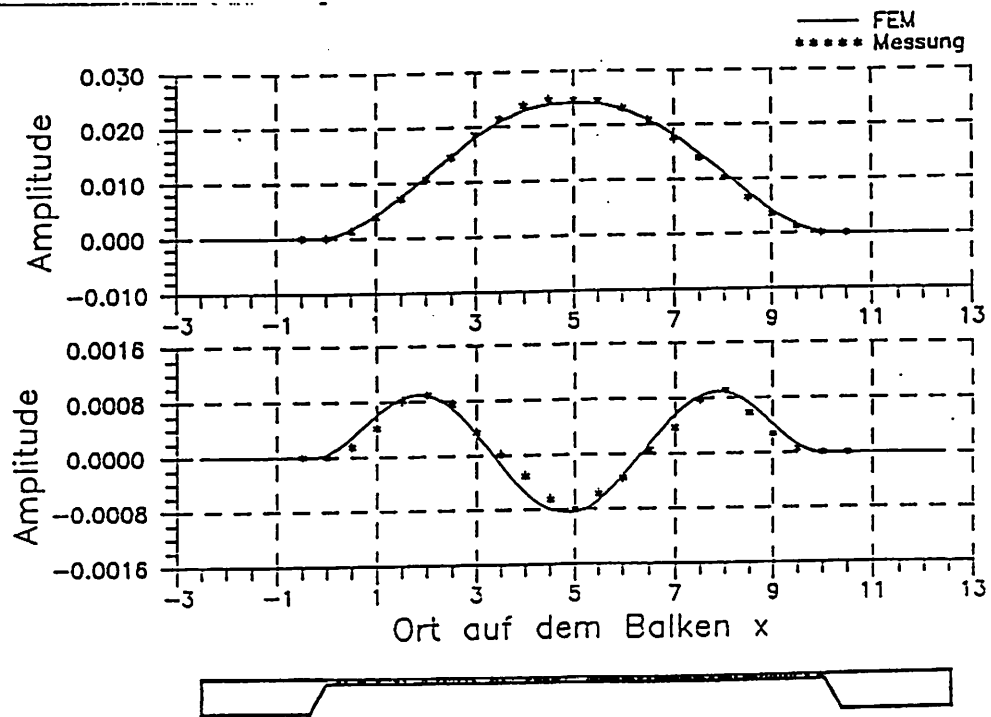


Bild 6-9 Experimentell ermittelte Eigenschwingungsformen eines 10mm-Balkens im Vergleich mit FEM-Berechnungen

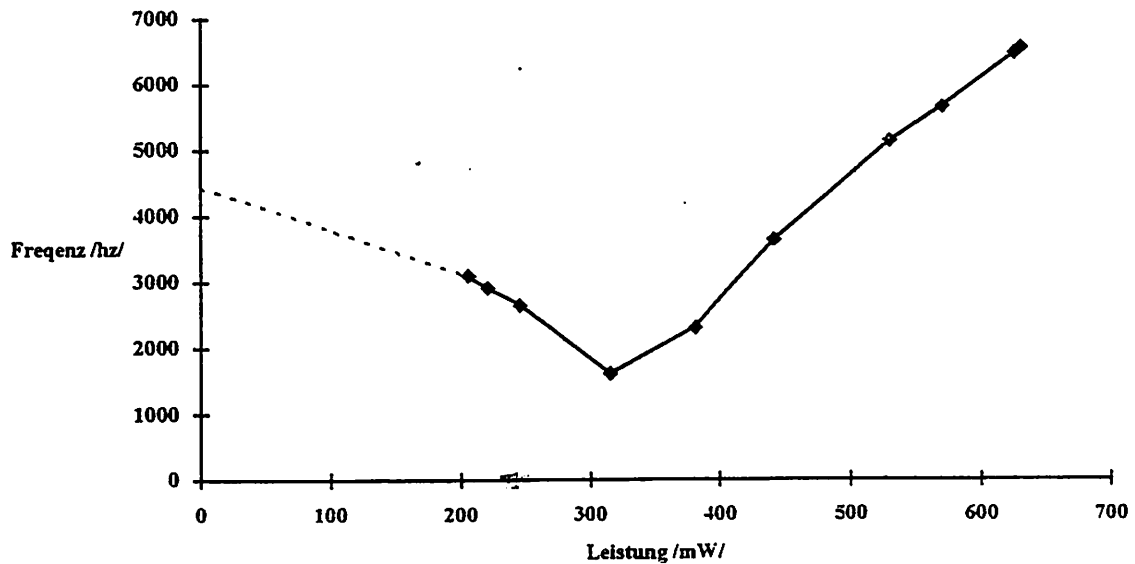


Bild 6-10 Abhängigkeit der Resonanzfrequenz der Grundmode von der in der DMS-Brücke umgesetzten elektrischen Leistung (10mm-Balken; Redesign)

Noch komplexer gestalten sich die Verhältnisse bei asymmetrisch, d. h. mit nur einem Heizer angesteuerten Balken. Erwartungsgemäß findet man jetzt neben der Grundmode die erste Schwingungsmode und als zweite Obermode die sogenannte Torsionsmode. Zunahme der Balkentemperatur als Folge einer Erhöhung der Verlustleistung in der DMS führt ab einem signifikanten Punkt dazu, daß die erste Obermode die niedrigste Resonanzfrequenz besitzt und praktisch temperaturunabhängig ist, während die Frequenzen der Grund- und Torsionsmode weiter deutlich zunehmen (Bild 6-11a,b). Eine Erklärung für diese Phänomene wird in /8/ gegeben.

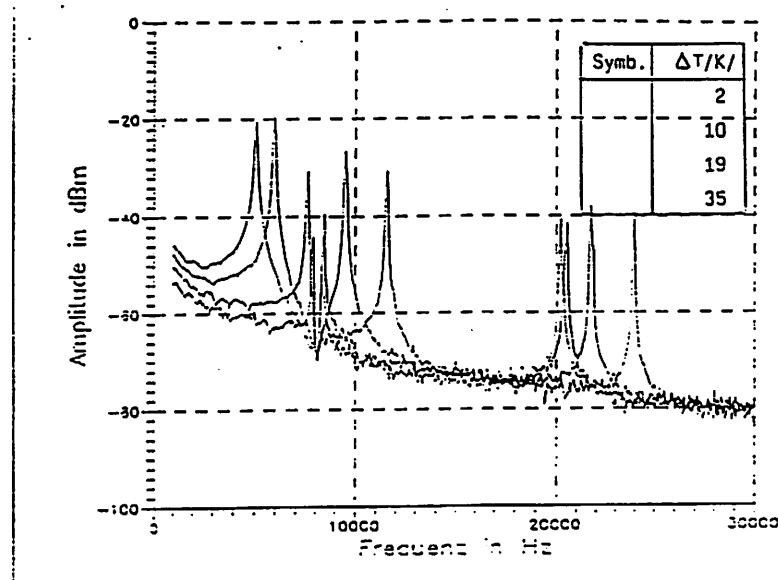


Bild 6-11a Veränderungen im Frequenzspektrum eines asymmetrisch angeregten 8mm-Balkens (1. Layout) bei verschiedenen Temperaturdifferenzen des Balkens zur Umgebung (nach /6/)

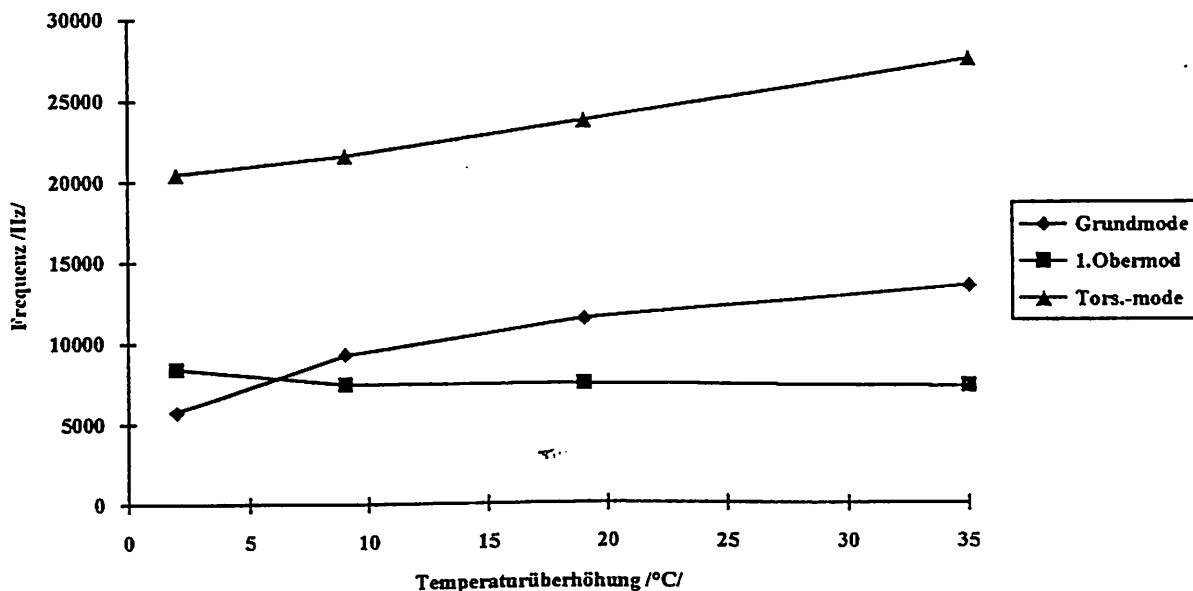


Bild 6-11b Verschiebung der Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit von der Temperaturüberhöhung des 8 mm-Balkens

Zur Einleitung einer axialen Kraft in den Si-Resonator wurde die in Bild 6-12 dargestellte Vorrichtung verwendet. Abbildung 6-13 gibt die Verschiebung der Resonanzfrequenzen von der Gewichtskraft wieder. Die Empfindlichkeit in der Frequenzänderung, die wesentlich durch die beiden Verstärkungsstege bestimmt wird, liegt für die Grundfrequenz bei 0.04 N^{-1} .

Erste Versuche zeigen, daß die Resonatoren wie nach /1/ zu erwarten, stark auf Gasströmungen reagieren. Ausführliche Untersuchungen mit verbesserter Anregungs- und Auswertelektronik sind in Vorbereitung.

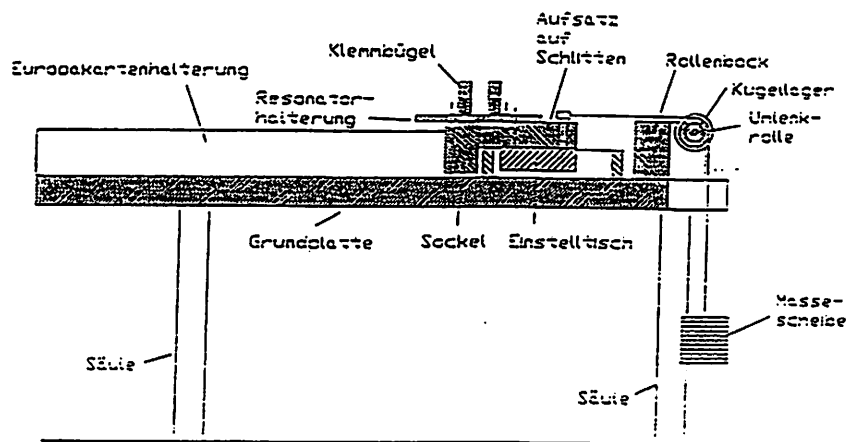


Bild 6-12 Vorrichtung zur Einleitung einer Axialkraft (nach /6/)

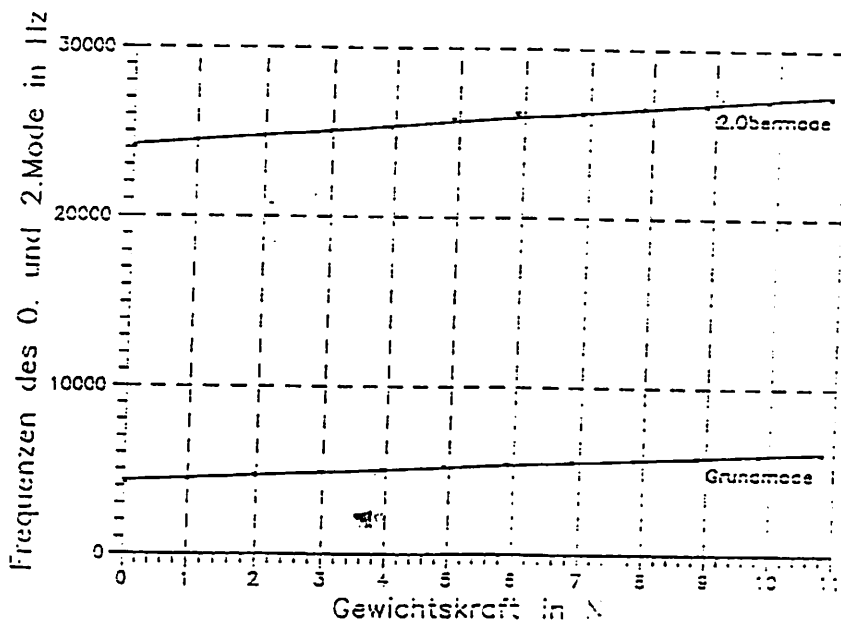


Bild 6-13 Abhängigkeit der Resonanzfrequenzen eines 10mm-Balkens von der eingeleiteten Axialkraft (nach /6/)

6.5 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde der Nachweis geführt, daß das thermische Anregungsprinzip auch für vergleichsweise massereiche Si-Balken genutzt werden kann, um diese stabil zum Schwingen anzuregen. Ähnlich wie bei sehr dünnen Brücken bewirken Temperaturänderungen, axiale Krafteinleitung und Gasströmung charakteristische und reproduzierbare Veränderungen in den Frequenzspektren, so daß solche Resonatoren die Basis für frequenzanaloge Sensoren bilden können.

Die Umsetzung des elektrischen Layouts, d.h. die Realisierung der Mikroheizer als Antriebselemente und die der DMS-Brücke als Signalgeber, erfolgte durchgängig in Metaldünntechnologie. Durch die verfahrenstechnischen Arbeiten wurde eine optimale Verbindung der Si-Ätztechnologie mit der Herstellung der elektrischen Komponenten der Sensoren erreicht, was letztendlich in der Fertigung zu einer hohen Ausbeute führen wird und niedrige Kosten erwarten läßt.

Die hohe thermische Stabilität des Metallschichtsystems stellt einen Hochtemperatureinsatz solcher Sensoren in Aussicht.

Als Transferleistungen aus diesem Verbundprojekt ist die Fa. GMSmbH in der Lage anzubieten:

- Layoutentwicklung und isotropes/anisotropes Ätzen von einfachen mikromechanischen Elementen in Silizium (Brücken, Zungen, Balken, Membranen)
- Applikation von elektrischen Dünnschichtanordnungen auf mikromechanische Elemente zur Signalgewinnung (Mikroheizer, DMS, Temperaturfühler) und für Aufbau- und Verbindungstechniken (löt- und bondbares Kontaktschichtsystem) für z.B. frequenzanaloge Sensoren, Drucksensoren, schnelle Temperatursensoren u.ä.

In enger Kooperation waren am Zustandekommen dieser Ergebnisse beteiligt:

- Fa. GMS Gesellschaft für Mikrotechnik und Sensorik mbH, St. Georgen
- HSG-Institut für Mikro- und Informationstechnik, Villingen-Schwenningen
- BIZERBA-Werke, Balingen

6.5 Literaturnachweis

- /1/ S. Bouwstra, Resonanting Microbridge Mass Flow Sensor, *Dissertation*, Universität Twente, Niederlande, 1990
- /2/ C. Braxmaier, Fremdanregung von Balken durch Dickenschwinger zur Eigenfrequenzbestimmung, *Diplomarbeit*, HSG- Inst.f. Mikro- u. Informationstechnik, Villingen-Schwenningen, Deutschland, 1992
- /3/ BIZERBA-Bericht 2/1992 zum Verbundforschungsprojekt "Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren"
- /4/ H. Bartuch u.a., Grundlagenuntersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Thermodruckkopfsystemen, *XII. Internationale Tagung "Wiss.Fortschritte in der Gerätetechnik u. Gerätetechnologie"*, TU Dresden, Deutschland, 1990
- /5/ M.I. Birjega u.a., Structural Transformation Induced During the Annealing of Thin NiCr Films, *Thin Solid Films*, 57 (1979) 337 - 341
- /6/ M.Müller, Aufbau und Inbetriebnahme eines optischen Meßplatzes zur Charakterisierung von resonanten mikromechanischen Strukturen, *Diplomarbeit*, FH Furtwangen, Deutschland, 1992
- /7/ S.Bouwstra u.a., Resonanting Microbridge Mass Flow Sensor, *Sensors and Actuators*, A21-A23 (1990) 332-335
- /8/ H.J.M. Geijselaers u.a., The Dynamic Mechanical Characteristics of a Resonanting Microbridge Mass-Flow Sensor, *Sensors and Actuators* A29, (1991) 37-41