

# FACHHOCHSCHULE FURTWANGEN

Fachbereich: FEINWERKTECHNIK

## DIPLOM-ARBEIT

in

Meßtechnik

über

Aufbau und Inbetriebnahme  
eines optischen Meßplatzes  
zur Charakterisierung von  
resonanten mikromechanischen Strukturen

Dozenten

Prof. Dr.-Ing. H. Debus

Prof. Dr. U. Mescheder

Student

Michael Müller

Furtwangen, den 31. August 1992

**Thema der Diplomarbeit :**

**Aufbau und Inbetriebnahme eines optischen Meßplatzes zur Charakterisierung von resonanten mikromechanischen Strukturen.**

**Verfasser : Michael Müller**  
**Studiengang : Feinwerktechnik**  
**Fachbereich : Feinwerktechnik**  
**Betreuer : Prof. Dr.-Ing. H. Debus**

**Semester : SS 1992**

**Abstract :**

**Zur dynamischen Untersuchung von mikromechanischen Strukturen sollte ein bereits vorhandener optischer Meßplatz erweitert werden. Die Messungen von Amplitudenspektren mit einem Laservibrometer und einem Spektrum-Analysator sollten zukünftig automatisiert ablaufen. Hierzu mußte ein Meß- und Steuerprogramm erstellt werden.**

**Speziell zur Charakterisierung von thermisch angeregten Siliziumkraftsensoren waren geeignete Resonatorhalterungen und eine Vorrichtung zur Einleitung einer Kraft zu konstruieren.**

**Anschließend sollten mit Hilfe dieses optischen Meßplatzes Messungen der Kraftempfindlichkeit vorgenommen werden.**

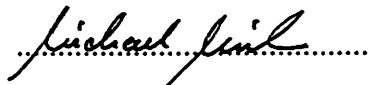
# FACHHOCHSCHULE FURTWANGEN

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, daß ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe.

Die verwendeten Literaturquellen sind im Literaturverzeichnis vollständig zitiert.

Furtwangen, den 24. August 1992

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'Michael Müller', followed by a dotted line.

Michael Müller  
Schubertweg 12  
7742 St. Georgen i. Schw.  
Tel. 07724 / 4107

# HAHN-SCHICKARD-INSTITUT FÜR MIKRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

Hahn-Schickard-Institut · Roggenbachstraße 6 · 7730 Villingen-Schwenningen

7730 Villingen-Schwenningen  
Roggenbachstraße 6  
Telefon: (07721) 2002-0  
Telefax: (07721) 200229

## Ausschreibung einer Diplomarbeit zum Thema:

### **Aufbau und Inbetriebnahme eines optischen Meßplatzes zur Charakterisierung von resonanten mikromechanischen Strukturen.**

Auf der Basis von schwingenden Siliziumbalken lassen sich mechanische Kraftsensoren realisieren, die durch Einwirkung einer äußeren Kraft ihre Resonanzfrequenz infolge Spannungsversteifung ändern. Da sich die Frequenz in Abhängigkeit der Meßgröße ändert, handelt es sich um ein frequenzanaloges Sensorprinzip. Beim Einsatz von frequenzanalogen Sensoren entfällt die üblicherweise notwendige Analog/Digital-Wandlung, sodaß durch Verwendung eines Mikrocontrollers mit eingebautem Zähler eine preiswerte Signalauswertung gegeben ist.

Bei der Konstruktion und Herstellung solcher resonanter Sensoren kommt der Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften eine besonders wichtige Rolle zu. Neben der Bestimmung der Eigenfrequenzen und der erreichbaren Kraftempfindlichkeiten verschiedener Eigenschwingungen, sind insbesondere das Oberwellenspektrum und die Schwingungsgüten der verschiedenen Schwingungsmoden von Interesse. Für eine eindeutige Zuordnung der Schwingungsmoden durch Vergleich mit Finite-Elemente-Berechnungen ist eine Vermessung der ortsabhängigen Amplitudenverteilung des Resonators nötig.

Ein am Hahn-Schickard-Institut vorhandenes kommerzielles Laservibrometer ermöglicht es die Resonanzfrequenzen ( max. 1MHz ) und die absoluten Schwingungsamplituden ( min. Auflösung: 8nm ) von mikromechanischen Strukturen rückwirkungsfrei zu ermitteln. Bei dem Meßprinzip handelt es sich um ein interferometrisches Nachweisverfahren, bei dem die durch die Bewegung des Siliziumbalkens hervorgerufene Dopplerverschiebung des rückreflektierten Laserlichtes detektiert wird. Die Dopplerverschiebung ist hierbei proportional zur Schwingungsschnelle ( Geschwindigkeit ) der reflektierenden Oberfläche. Durch Einsatz des differentiellen Meßprinzips ( Zweipunktmeßmethode ) ist es zusätzlich möglich die Amplitudenbeziehung zweier Teilstrukturen untereinander zu bestimmen. Beispielsweise ist es insbesondere möglich, die Amplitudenbeziehung zwischen Resonatoreinspannung und schwingendem Balken zu vermessen und somit die Güte der Schwingungsentkopplung quantitativ zu charakterisieren.

Die Schwingungsanregung der Resonatorstrukturen erfolgt akustisch durch piezoelektrische Keramiken, die durch eine hochgenaue Signalquelle eines Spektrum-Analysators in dem interessierendem Frequenzbereich ( einige hundert kHz ) angesteuert wird.

### Aufgaben der Diplomarbeit sind:

- die Konstruktion einer mechanischen Resonatorhalterung und Krafteinleitung, die eine definierte Vermessung der zu untersuchenden Kraftsensoren ermöglicht.
- die Ankopplung des Spektrum-Analysators an ein PC- Meßwerterfassungssystem zur automatischen Meßablaufsteuerung, Experimentauswertung und -dokumentation.
- Die Erprobung und Inbetriebnahme des dynamischen Meßplatzes durch die Vermessung mikromechanischer Resonatorstrukturen.

Fachbereich	:	Feinwerktechnik
Betreueran der FHF	:	Prof. Dr.-Ing. H. Debus
Betreuer am HSI	:	Dipl.-Phys. Th. Fabula

### Vorwort

Die Diplomarbeit entstand bei der Hahn-Schickard-Gesellschaft am Institut für Mikro- und Informationstechnik in Villingen. Das Institut stellte alle für die Diplomarbeit notwendigen Geräte zur Verfügung, wofür ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer vom Hahn-Schickard-Institut Herrn Dipl.-Phys. Th. Fabula, der mich mit fachlichem Hintergrundwissen und nützlichen Anregungen bestens unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Debus möchte ich für die Betreuung von Seiten der Fachhochschule Furtwangen danken.

<b><u>Inhaltsverzeichnis</u></b>	<b>Seite</b>
 <b>Verwendete Bezeichnungen</b>	 <b>4</b>
 <b>1. Einleitung</b>	 <b>6</b>
1.1 Einführung in die Mikromechanik	6
1.2 Aufgabenstellung	7
1.3 Aufgabeneinteilung	7
1.4 Terminplan	9
 <b>2. Theoretische Grundlagen</b>	 <b>10</b>
2.1 Schwingungen eines beidseitig eingespannten Biegebalkens	10
2.2 Kraftempfindlichkeit	11
2.3 Temperaturempfindlichkeit	13
 <b>3. Frequenzanaloger Kraftsensor</b>	 <b>14</b>
3.1 Sensorstruktur	14
3.2 Elektrothermisches Anregungsprinzip	16
 <b>4. Stand der Technik</b>	 <b>17</b>
4.1 Geräteplan	17
4.2 Funktionsbeschreibung der Geräte	18
4.2.1 Laservibrometer	18
4.2.2 Spektrum-Analysator	20
4.2.3 Schnittstelle	22

<b>5.</b>	<b>Meß- und Steuerprogramm</b>	<b>24</b>
5.1	Aufgabenstellung	24
5.2	Lösungsbeschreibung	25
5.3	Beschreibung und Struktogramm des Hauptprogramms	27
<b>6.</b>	<b>Konstruktion einer universellen Resonatorhalterung</b>	<b>31</b>
6.1	Anforderungen	31
6.2	Befestigungsmöglichkeiten	31
6.3	Diskussion und Bewertung der ausgewählten Befestigung	33
<b>7.</b>	<b>Konstruktion einer Vorrichtung zur Krafteinleitung</b>	<b>35</b>
7.1	Anforderungen und Auswahl der Führung	35
7.2	Auswahl der Krafteinleitung und Krafrückführung	36
7.3	Lösungsbeschreibung	36
<b>8.</b>	<b>Erprobung und Inbetriebnahme des optischen Meßplatzes</b>	<b>38</b>
8.1	Charakterisierung der Anregung	38
8.1.1	Passive Anregung	38
8.1.2	Elektrothermische Anregung	44
8.2	Bestimmung der Meßpunktgröße	45
8.3	Charakterisierung der Kraftsensoren	46
8.4	Experimentelle Modalanalyse	52
8.5	Differentielle Messung	55
8.6	Messung der Kraftermpfindlichkeit	56
8.7	Messung der Temperatur-/ Leistungsempfindlichkeit	57
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>61</b>

<b>10.</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>62</b>
10.1	Verzeichnis der verwendeten Literatur	62
10.2	Verzeichnis der Bilder	64
10.3	Verzeichnis der Tabellen	66
10.4	Verzeichnis der benötigten Programme	67
<b>11.</b>	<b>Anhang</b>	<b>68</b>
11.1	Programmlisting	
11.2	Stückliste	
11.3	Zeichnungen	



**Verwendete Bezeichnungen:**

Symbol	Wert	Einheit	Bezeichnung
A		m <sup>2</sup>	Fläche
A ( t )		m	zeitabhängige Auslenkung
A ( f )		m	frequenzabhängige Auslenkung
A <sub>dyn</sub>		m	Resonanzamplitude
A <sub>stat</sub>		m	statische Auslenkung
A <sub>mitte</sub>		m	Amplitude auf der Balkenmitte
AC <sub>pp</sub>		V	Spitze-Spitze-Spannung
c <sub>0</sub>	1,028	1	Frequenzkonstante
c <sub>η</sub>	0,148	N <sup>-1</sup>	Kraftkonstante
d	4 · 10 <sup>-3</sup>	m	Aperturdurchmesser
DC <sub>Offset</sub>		V	Offset-Gleichspannung
ε		1	Längendehnung
Δf		Hz	Änderung der Eigenfrequenz
Δf <sub>Q</sub>		Hz	Bandbreite der Resonanzkurve
ΔF		N	Änderung der eingeleiteten Zugkraft
ΔP		W	Änderung der eingespeisten Leistung
Δx		m	Schrittweite
E <sub>m</sub>		J	Energie des Systems im Resonanzfall
E <sub>110</sub>	1,689 · 10 <sup>11</sup>	Pa	Elastizitätsmodul von Silizium
$\hat{E}_{110}$	1,696 · 10 <sup>11</sup>	Pa	reduzierter Elastizitätsmodul
F <sub>G</sub>		N	Gewichtskraft
F <sub>x</sub>		N	Zugkraft
f		Hz	Frequenz
f <sub>i</sub>		Hz	i-te Eigenfrequenz eines Balkens
f <sub>passiv</sub>		Hz	Frequenz bei passiver Anregung
f <sub>theor</sub>		Hz	theoretische Frequenz
f <sub>T,theor</sub>		Hz	temperaturkorrigierte theor. Frequenz
f <sub>therm</sub>		Hz	Frequenz bei thermischer Anregung
f <sub>0</sub>		Hz	Grundfrequenz eines Balkens
g	9,81	m / s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
η		N <sup>-1</sup>	Kraftempfindlichkeit
I		m <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment
k		N / m	Federsteifigkeit
L		m	Abstand Meßobjekt - Sensorkopf

$l$		m	Balkenlänge
$\lambda$	$632,8 \cdot 10^{-9}$	m	Wellenlänge des Lasers
$\lambda_i$		1	Proportionalitätskonstante
$\lambda_0$	4,73	1	Proportionalitätskonstante
$m$		kg	Masse des Systems
$\mu$		1	Reibungskoeffizient
$n$		dBm	Leistungsverhältnis
$\nu_{110}$	0,0625	1	Poisson-Zahl von Silizium
$P$		W	Verlustleistung
$P_{\text{ref}}$	1	mW	Referenzleistung
$\pi_{\text{heiz}}, \pi_{\text{DMS}}$		W <sup>-1</sup>	Leistungsempfindlichkeit
$Q$		1	Schwingungsgüte
$Q_{\text{therm}}$		1	Güte bei thermischer Anregung
$R_M$	50	$\Omega$	Meßwiderstand
$\rho$	2329	kg / m <sup>3</sup>	Dichte von Silizium
$s$		1	Sicherheitsfaktor
$S$		N <sup>-1</sup>	Konstante
$\sigma$		Pa	mechanische Spannung
$\sigma_{\text{Br}}$	300	MPa	Bruchspannung von Silizium
$t$		s	Zeit
$t$		m	Balkendicke
$T_{\text{max}}$	170	°C	max. Temperatur auf dem Kraftsensor
$TK$		ppm / K	Temperaturkoeffizient
$\hat{U}$		V	Scheitelwert der Spannung
$U_{\text{DMS}}$	$\pm 12$	V	Speisespannung der DMS-Brücke
$U_{\text{eff}}$		V	Effektivwert der Spannung
$v$		m / s	Geschwindigkeit
$w$		m	Balkenbreite
$\omega_0$		s <sup>-1</sup>	Kreisfrequenz
$x$		m	Ortskoordinate
$y_Q$		m	Stelle des Bandbreitenabgriffs

## 1. Einleitung

### 1.1 Einführung in die Mikromechanik

#### **Definition Mikromechanik:**

In der mikrotechnischen Literatur ( [HEU89], [BÜT91] ), hat sich zur Abgrenzung von verwandten Gebieten der Technik folgende Definition etabliert:

" Die Mikromechanik befaßt sich mit Entwurf, Herstellung und der Anwendung komplexer dreidimensionaler Strukturen, deren Abmessungen in mindestens einer Dimension so klein sind, daß die klassischen feinmechanischen Fertigungstechniken nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden können. Die kleinsten funktionsbestimmenden Strukturabmessungen liegen im Mikrometerbereich. "

Die meisten mikromechanischen Strukturen werden aus einkristallinem Silizium oder Quarz hergestellt, welche in höchster Reinheit und kristalliner Perfektion verfügbar sind und sehr gute mechanische Eigenschaften haben, die mit denen von Stahl vergleichbar sind. Ein Vorteil des Siliziums besteht darin, daß die Technologien der Mikroelektronik, wie Lithographie, Ätztechnik und Schichtabscheidung, genutzt werden können, wobei jedoch in der Mikromechanik der Schwerpunkt auf der Herstellung dreidimensionaler Strukturen liegt. Auf die Verfahrenstechnik zur Herstellung solcher Strukturen soll hier nicht weiter eingegangen werden, da dies nicht Gegenstand der Arbeit war.

Ein Teil der Diplomarbeit beinhaltet die Vermessung eines frequenzanalogen Kraftsensors in Form einer Siliziumbalken-Struktur. Diese Anwendung ist nur eine im Bereich der mikromechanischen Sensortechnik.

Bei einem frequenzanalogen Sensor ist die Ausgangsgröße eine Frequenz, welche sich analog zu einer auf den Sensor wirkenden Meßgröße verändert. Die verschobene Resonanzfrequenz kann nun als quasidigitales Signal ohne vorausgehende A/D-Wandlung direkt z.B. von einem Mikrocontroller mit eingebautem Zähler verarbeitet werden.

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Diplomarbeit war in folgende Aufgabengebiete unterteilt:

- der Ankopplung des Spektrum-Analysators an einen IBM kompatiblen Rechner ( PC ) und die Erstellung eines Meß- und Steuerprogramms zur automatischen Meßablaufsteuerung, Experimentauswertung und Dokumentation
- der Konstruktion einer universellen Halterung für Kraftsensoren und einer Vorrichtung zur Krafteinleitung, die eine definierte Vermessung der zu untersuchenden Kraftsensoren ermöglicht
- der Erprobung und Inbetriebnahme des dynamischen Meßplatzes durch die Vermessung mikromechanischer Resonatorstrukturen ( Bestimmung der Oberwellenspektren, der Eigenfrequenzen, deren Amplituden und Schwingungsgüten, sowie die Ermittlung der ortsabhängigen Amplitudenverteilungen und Kraftempfindlichkeiten )

## 1.3 Aufgabeneinteilung

Insgesamt zur Verfügung stehende Zeit: 10.02.92 - 31.08.92

5 Wochen à 5 Tage ( 10.02. - 13.03. ) :	25 Tage
16 Wochen à 3 Tage ( 16.03. - 03.07. ) :	48 Tage
5 Wochen à 5 Tage ( 27.07. - 31.08. ) :	25 Tage

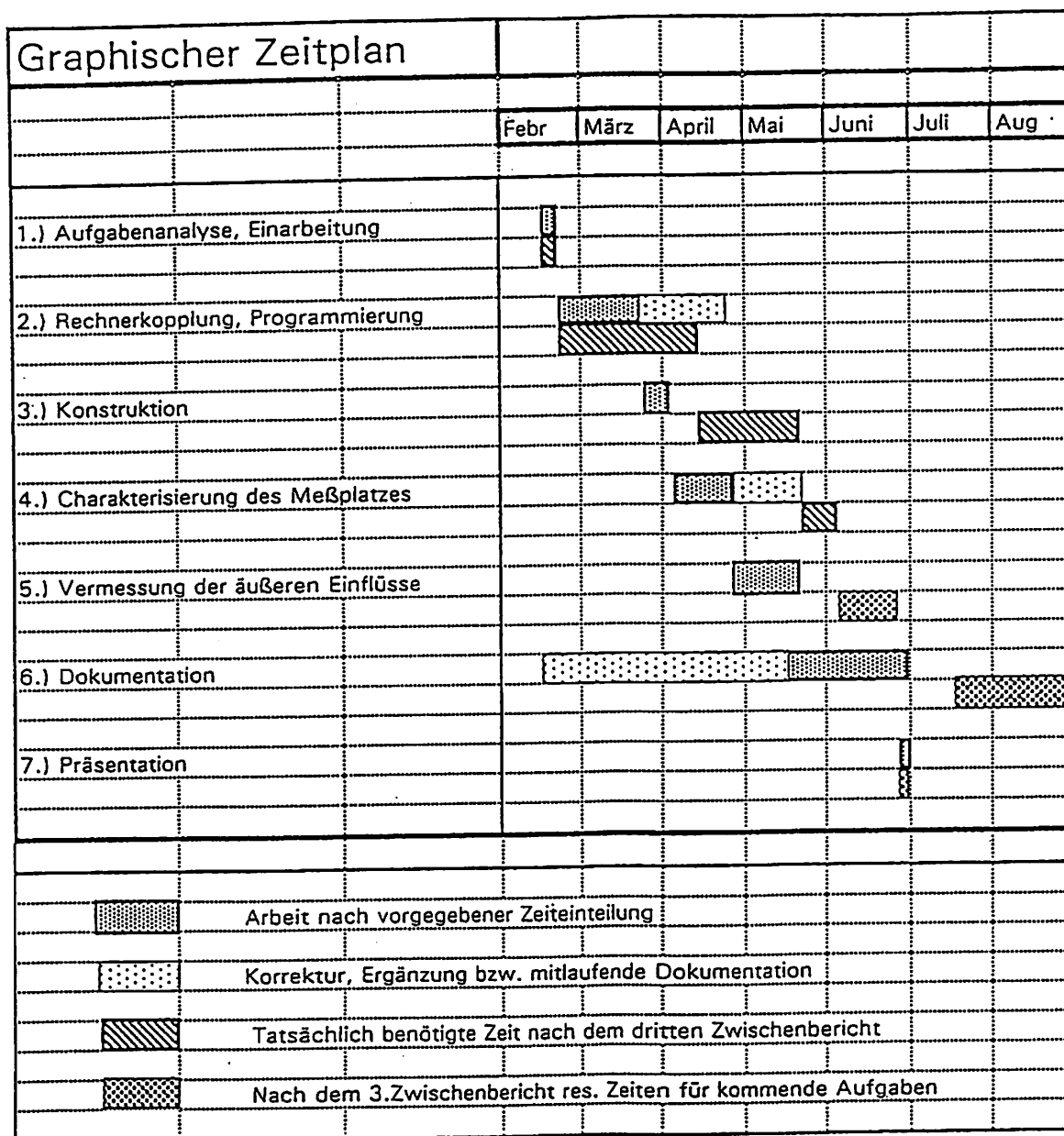
Anhand der Aufgabenstellung wurde die Arbeit wie folgt gegliedert:

- 1.) Aufgaben klären und Einarbeitung in das Themengebiet sowie Durchsicht der vorhandenen Literatur über frequenzanaloge Sensoren ( speziell Kraftsensor )
- 2.) Rechnerkopplung und Programmierung
  - a) Hardware-Kopplung des Spektrum-Analysators an einen Rechner über eine HP-IB-Schnittstelle
  - b) Einarbeiten in Turbo-Pascal und HP-IB Kommandos  
Erstellen der Software zum Abspeichern und Dokumentieren von Amplitudenspektren aus dem Analysator
  - c) Darstellen der Amplitudenspektren mit einem Graphikprogramm

- 3.) Konstruktion einer universellen Resonatorhalterung zur Fixierung verschiedener Kraftsensoren
- 4.) Charakterisierung des optischen Meßplatzes
  - a) Ermittlung des optimalen Meßabstandes  
( Spotsize-Untersuchungen )
  - b) Aufnahme von Amplituden- und Geschwindigkeitsspektren
  - c) Ermittlung des Zusammenhangs der frequenzabhängigen Größen:  
Amplitude und Geschwindigkeit:  $A(f) \Leftrightarrow V(f)$
  - d) Aufnahme von lateralen Amplitudenprofilen  $A(x)$   
( experimentelle Modalanalyse )
  - e) Differentielle Messungen
- 5.) Dynamische Vermessung von Resonatorstrukturen  
( passiv und thermisch angeregter Si-Kraftsensor )
  - a) Bestimmung der Größen:      Eigenfrequenz  $f_i$   
   Amplitude  $A_i$   
   Schwingungsgüte  $Q_i$
  - b) Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit
  - c) Bestimmung der Kraftermpfindlichkeit
- 6.) Dokumentation erstellen
- 7.) Präsentationsplanung und -durchführung

## 1.4 Terminplan

Tab.1.1: Graphischer Zeitplan der Diplomarbeit



## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1 Schwingungen eines beidseitig eingespannten Biegebalkens

Als Modell zur mathematischen Beschreibung von schwingenden Strukturen dient ein ungedämpftes Feder-Masse-System, das freie harmonische Bewegungen ausführt. Diese periodische Bewegung wird nach [SZA84] beschrieben durch die homogene lineare Differentialgleichung ( DGL ):

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

Der Ansatz  $x(t) = x_0 \cdot \sin \omega t$  löst die DGL.

Als Ergebnis erhält man die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  des Einmassenschwingers:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

mit :       $k$         :      Federsteifigkeit  
               $m$         :      Masse des Schwingers

Der in dieser Diplomarbeit zu beschreibende Balken ist jedoch ein Gebilde aus vielen, infinitesimal kleinen, räumlich verteilten Massen. In [BLE84] wird folgende Gleichung zur Bestimmung der Eigenfrequenzen eines solchen Mehrmassensystems angegeben:

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E_{110} \cdot I}{m}} \quad (3)$$

Daraus ergibt sich die Resonanzfrequenz des Grundmodes  $f_0 = f(t, l)$ :

$$f_0 = c_0 \cdot \frac{t}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{\hat{E}_{110}}{\rho}} \quad (4)$$

welche mit dem reduzierten E-Modul:  $\hat{E}_{110} = \frac{E_{110}}{(1 - \nu_{110}^2)}$  korrigiert wurde.

Es sind:     $c_0 = 1,028$                     :      Frequenzkonstante  
               $E_{110} = 1,689 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$  :      Elastizitätsmodul von Silizium in Zugrichtung  
               $\nu_{110} = 0,0625$                 :      Poisson-Zahl  
               $\rho = 2329 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$                         :      Dichte von Silizium

Diese Gleichung berücksichtigt jedoch nicht die in der Realität bei einem Multilayer-System ( Gebilde aus mehreren Schichten ) auftretenden Einflüsse wie z.B. Schichtspannungen. Auch Temperaturschwankungen, Dämpfungseffekte der Luft usw. werden vernachlässigt. Diese Einflüsse können jedoch annähernd mit Hilfe der Finite-Elemente-Modellierung berücksichtigt werden.

## 2.2 Kraftempfindlichkeit

Diese Balkenstruktur soll als Kraftsensor eingesetzt werden. Eine in Längsrichtung in den Sensor eingeleitete Kraft  $F_x$  erzeugt eine mechanische Spannung  $\sigma$  im Balken. Die Resonanzfrequenzen  $f_i$  des Balkens ändern sich in Abhängigkeit dieser mechanischen Spannung.

Wenn der Balken mit einer einachsigen Zugkraft  $F_x$  beaufschlagt wird, tritt eine longitudinale Zugdehnung  $\epsilon$  auf, sodaß nach [WAL91] für die Frequenz gilt:

$$f(\epsilon) = f_0 \cdot \sqrt{1 + 0,295 \cdot \frac{l^2}{t^2} \cdot \epsilon} \quad (5)$$

In [ALB88] wird die Kennlinie durch die Gleichung

$$f(F_x) = f_0 \cdot \sqrt{1 + S \cdot F_x} \quad (6)$$

beschrieben, welche denselben Sachverhalt ausdrückt, denn es ist:

$$S = 0,295 \cdot \frac{l^2}{\hat{E}_{110} \cdot t^3 \cdot w}$$

wobei:	$l$	:	Balkenlänge
	$t$	:	Balkendicke
	$w$	:	Balkenbreite
	$\epsilon = \frac{\sigma}{\hat{E}_{110}}$	:	Dehnung
	$\sigma = \frac{F_x}{A}$	:	mech. Spannung
	$A = t \cdot w$	:	Querschnittsfläche des Balkens



Die Gleichungen (5) und (6) stellen einen nichtlinearen Zusammenhang dar. Die lineare Näherung der Kraftempfindlichkeit  $\eta$  des Grundmodes wird definiert als die relative Frequenzänderung aufgrund einer Kraftänderung  $\Delta F$  bezogen auf die Grundfrequenz  $f_0$ :

$$\eta := \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta F}$$

In [ALB88] ist die Bestimmungsgleichung für die lineare Näherung der Kraftempfindlichkeit  $\eta$  angegeben:

$$\eta = c_\eta \cdot \frac{1}{E_{110}} \cdot \frac{l^2}{t^2} \cdot \sigma \quad (7)$$

mit:  $c_\eta = 0,148 \text{ N}^{-1}$

Die Kraftempfindlichkeit ist jedoch begrenzt durch die Bruchspannung  $\sigma_{Br} \approx 300 \text{ MPa}$  des Materials:

$$\eta_{\max} = c_\eta \cdot \frac{1}{E_{110}} \cdot \frac{l^2}{t^2} \cdot \sigma_{Br} \quad (8)$$

### 2.3 Temperaturempfindlichkeit

Aufgrund des Temperatureinflusses ändern sich sowohl die Materialparameter, als auch die geometrischen Abmessungen einer mikromechanischen Struktur. Da diese Größen in die Bestimmungsgleichung der Resonanzfrequenz eingehen, muß dieser Einfluß berücksichtigt werden. In Gleichung (4) sind die Größen  $\hat{E}_{110}$ ,  $l$  und  $\rho$  temperaturabhängig, d.h.  $f_0 = f(l, \hat{E}_{110}, \rho)$ .

Wirken zusätzlich noch äußere Kräfte oder Verspannungen aufgrund eines Schichtensystems, d.h. auf das Silizium aufgebrachte Schichten wie z.B. Al, SiO<sub>2</sub> oder NiCr, so werden im mikromechanischen Element Dehnungen verursacht. Die Temperaturabhängigkeit dieser Dehnungen  $\varepsilon = \varepsilon(T)$  ist jedoch durch die unbekannten Materialeigenschaften des Schichtensystems und die z.T. komplexe Strukturierung der Schichten nur schwer zu bestimmen.

Der Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenz ist definiert als:

$$TK_f := \frac{1}{f_0} \cdot \frac{df}{dT}$$

und setzt sich aus folgenden Einzelbeiträgen zusammen:

$$TK_f = f(TK_l, TK_{\hat{E}_{110}}, TK_{\rho}, TK_{\varepsilon})$$

Während  $TK_l$ ,  $TK_{\hat{E}}$  und  $TK_{\rho}$  gut abschätzbar sind [WAL91], ist die Ermittlung von  $TK_{\varepsilon}$  aus oben erwähnten Gründen nicht unmittelbar durchführbar.

Um zu zeigen, welchen großen Einfluß Beschichtungen auf Siliziumbalkenstrukturen haben, werden in Tab.2.1 die Temperaturkoeffizienten der Resonanzfrequenzen von mit Aluminium beschichteten Siliziumstrukturen angegeben [WAL91]:

Tab.2.1: Temperaturkoeffizienten bei Schichtsystemen [WAL91]

	reines Silizium	Silizium mit 75 nm Aluminiumschicht	Silizium mit 700 nm Aluminiumschicht
$TK_f \left[ \frac{\text{ppm}}{\text{K}} \right]$	-30	-60	-1200

### 3. Frequenzanaloger Kraftsensor

#### 3.1 Sensorstruktur

Bei frequenzanalogen Sensoren, deren Eigenfrequenz von der Meßgröße abhängt, entfallen die Analog-Digital- bzw. Spannungs-Frequenz-Wandlung und die damit verbundenen Probleme der Zuverlässigkeit, der Ansprechzeiten und der Kosten. Zudem lassen sich Eigenfrequenzen wesentlich störsicherer übertragen und mit größerer Genauigkeit messen als analoge Signale wie z.B. Spannung oder Strom. Damit eine hohe Auflösung erreicht wird, muß der Schwinger eine hohe Güte besitzen.

Im Rahmen der Diplomarbeit sollten speziell mikromechanische Kraftsensoren meßtechnisch charakterisiert werden. Es handelt sich dabei um Siliziumsensoren in Form von beidseitig eingespannten Biegebalken mit zwei Verstärkungsstegen, welche im Rahmen eines Verbundprojektes unter der Leitung des Hahn-Schickard-Institutes entwickelt wurden. Diese Balken können, wie in Bild 3.2 zu sehen, senkrecht zur Waferoberfläche, also aus der Ebene heraus mit einer bestimmten Resonanzfrequenz schwingen. Eine in Längsrichtung in den Balken eingeleitete axiale Zugkraft  $F_x$  verteilt sich auf den dünnen Schwingbalken und die zwei Verstärkungsstege. Wie bereits im Kapitel 2.2 angesprochen wird durch die Krafteinleitung im Sensor eine mechanische Spannung  $\sigma$  hervorgerufen, welche in eine möglichst große, zur Spannung proportionalen Eigenfrequenzänderung  $\Delta f$  umgesetzt werden soll:

$$\begin{aligned} \Delta f &\sim \sigma, \\ \text{wobei : } \sigma &= f(F_x) \end{aligned}$$

Von der Firma GMS mbH, St.Georgen wurde ein solcher Sensor mit folgenden Balkenabmessungen hergestellt:

Balkenlänge:  $l = 3 - 10 \text{ mm}$

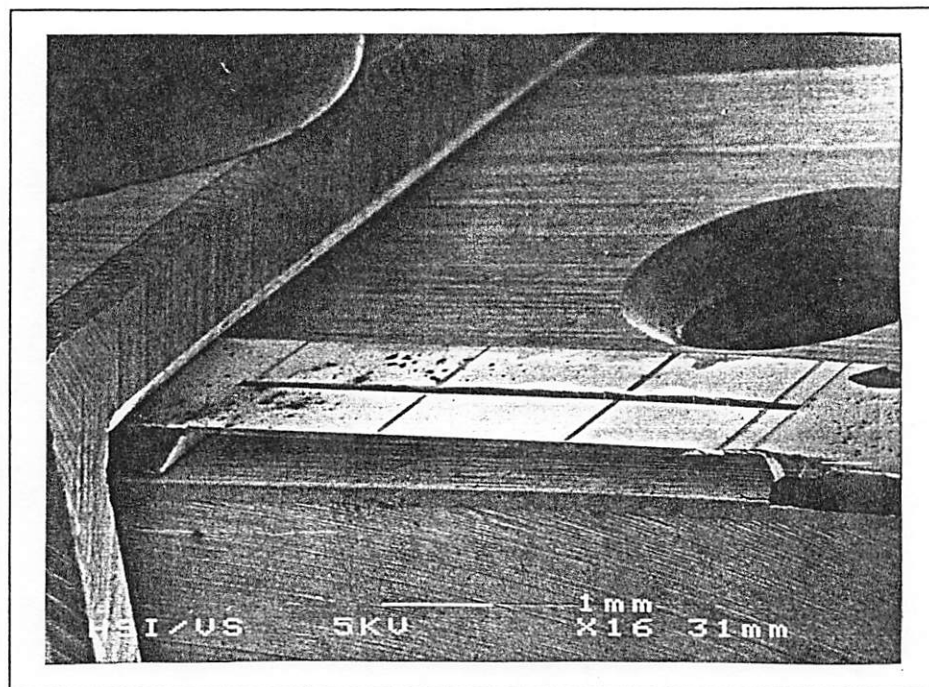
Balkendicke:  $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$

Balkenbreite:  $w = 1 \text{ mm}$

Er wurde auf eine Nennkraft von  $F_x = 5 \text{ N}$  ausgelegt. Die Anregung erfolgt elektrothermisch über NiCr-Widerstände, die Rückführung des Amplitudensignals wird durch eine ebenfalls aus NiCr-Widerständen aufgebaute DMS-Vollbrückenschaltung ermöglicht. Die Balkendicke  $t$  ist sehr stark von Fertigungstoleranzen abhängig. Um bei der Berechnung der Resonanzfrequenzen diesen Fehler abzuschätzen, wurde ein Sensor dieser

Charge geeignet gebrochen und mit Hilfe eines Raster-Elektronen-Mikroskopes ( REM ) an mehreren Stellen die tatsächliche Dicke des Balkens bestimmt. Dieser Balken hat eine Dicke von  $t = 50 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ , entspricht somit dem Sollmaß. Es wurde jedoch auch eine Struktur vermessen mit Abweichungen von ca. 30 % vom Sollmaß. Bild 3.1 zeigt die REM-Aufnahme des Sensors. Die Marken quer zur Balkenachse stammen von der Ausrichtung des Elektronenstrahls auf die auszumessende Fläche des Balkens.

**Bild 3.1:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Kraftsensors



Die Resonanzfrequenzen des Grundmodes  $f_0$  eines betrachteten, unbelasteten Balkens wurden wie in Tab.3.1 ersichtlich mit Gleichung (4) aus Kapitel 2.1 analytisch berechnet:

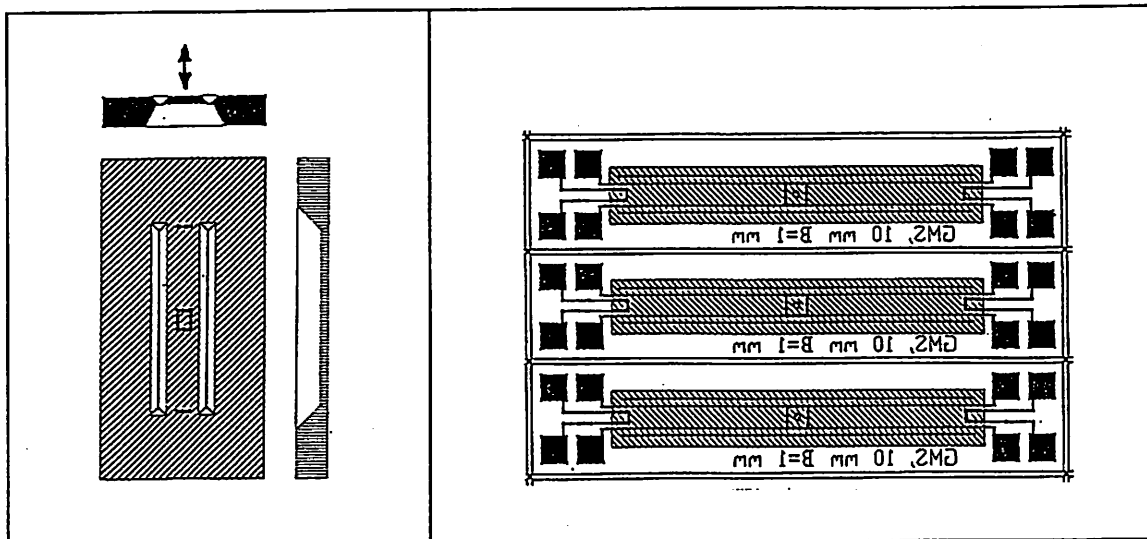
**Tab.3.1:** Analytisch berechnete Resonanzfrequenzen der Sensoren

Balkenlänge $l$ [mm]	Resonanzfrequenz $f_0$ [kHz]
10	4,38
8	6,85
6	12,17
4	27,39
3	48,70

In Bild 3.2 ist ein solcher Sensor abgebildet.

Bild 3.2: Frequenzanaloger Kraftsensor mit elektrothermischer Anregung [GMS91]

a.) Prinzip mit Schwingungsrichtung b.) Ausschnitt aus dem Maskensatz



### 3.2 Elektrothermisches Anregungsprinzip

Wie im Maskensatz in Bild 3.2b zu erkennen ist, sind auf dem Sensor an den beiden Einspannungsenden je ein NiCr-Widerstand aufgebracht. Wird dieser Widerstand bestromt, so erwärmt sich diese Schicht. Da NiCr einen wesentlich höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten als Silizium besitzt, biegt sich das Schichtsystem aus Siliziumbalken und NiCr-Widerstand wie ein Bimetall nach unten durch. Wird der Strom abgeschaltet, so fließt die Wärme im massiven Siliziumkörper ab und der Balken bewegt sich wieder in seine Ausgangslage zurück. Diese Heizwiderstände werden nun mit elektrischen Impulsen angesteuert und somit der Balken zu einer periodischen Schwingung angeregt.

Ein ähnlicher Effekt wird verwendet, um die Auslenkung des Balkens als Auswertesignal zu nutzen. In der Mitte des Schwingbalkens ist eine Wheatstonesche-Brücken-Schaltung aus dehnungsempfindlichen NiCr-Schichtwiderständen angeordnet. Biegt sich der Balken durch, so verändert sich der Widerstandswert der Brücke. Diese Widerstandsänderung kann von einer elektronischen Schaltung ausgewertet werden. Eine solche Schaltung wurde bereits in Betrieb genommen. Das rückgeführte Signal ist, wenn der Balken in seiner Resonanzfrequenz schwingt, stärker als das thermische Rauschen und somit verwendbar.

Die Resonanzfrequenz hängt jedoch stark von der in den NiCr-Widerständen erzeugte Verlustwärme ab und wie gut diese an die Umgebung abgegeben wird.

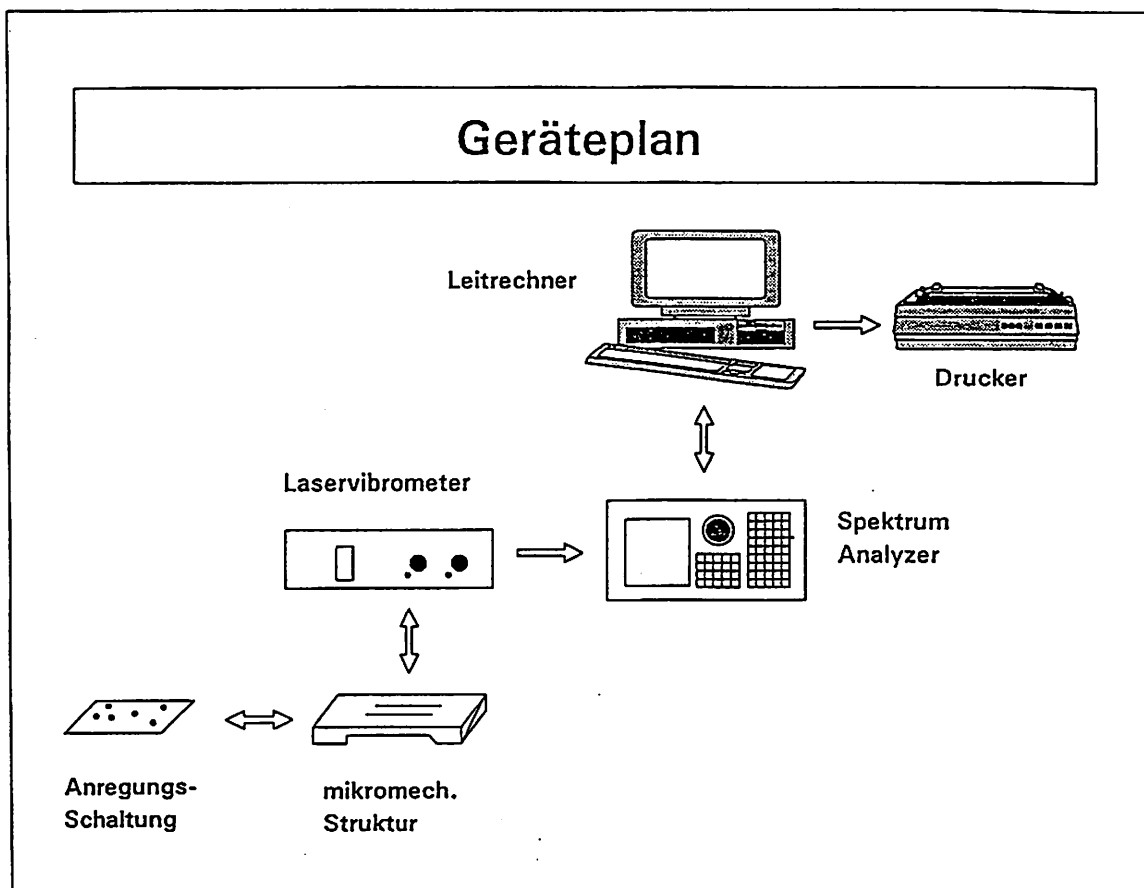
## 4. Stand der Technik

### 4.1 Geräteplan

In Bild 4.1 ist der Geräteplan des am Hahn-Schickard-Institut bestehenden optischen Meßplatzes zu sehen.

Zur dynamischen Vermessung mikromechanischer Bauelemente wird ein Laservibrometer verwendet, dessen Ausgangssignal von einem Spektrum-Analysator ausgewertet wird. Mit diesen Geräten kann man die Resonanzfrequenzen, die Schwingungsamplituden, die Güten und die Amplitudenprofile von schwingenden Strukturen rückwirkungs-frei ermitteln. Zur weiteren Ausstattung gehört ein PC-Rechner, ein Plotter und ein an das Netzwerk angeschlossener Laserdrucker.

Bild 4.1: Geräteplan des optischen Meßplatzes



## 4.2 Funktionsbeschreibung der Geräte

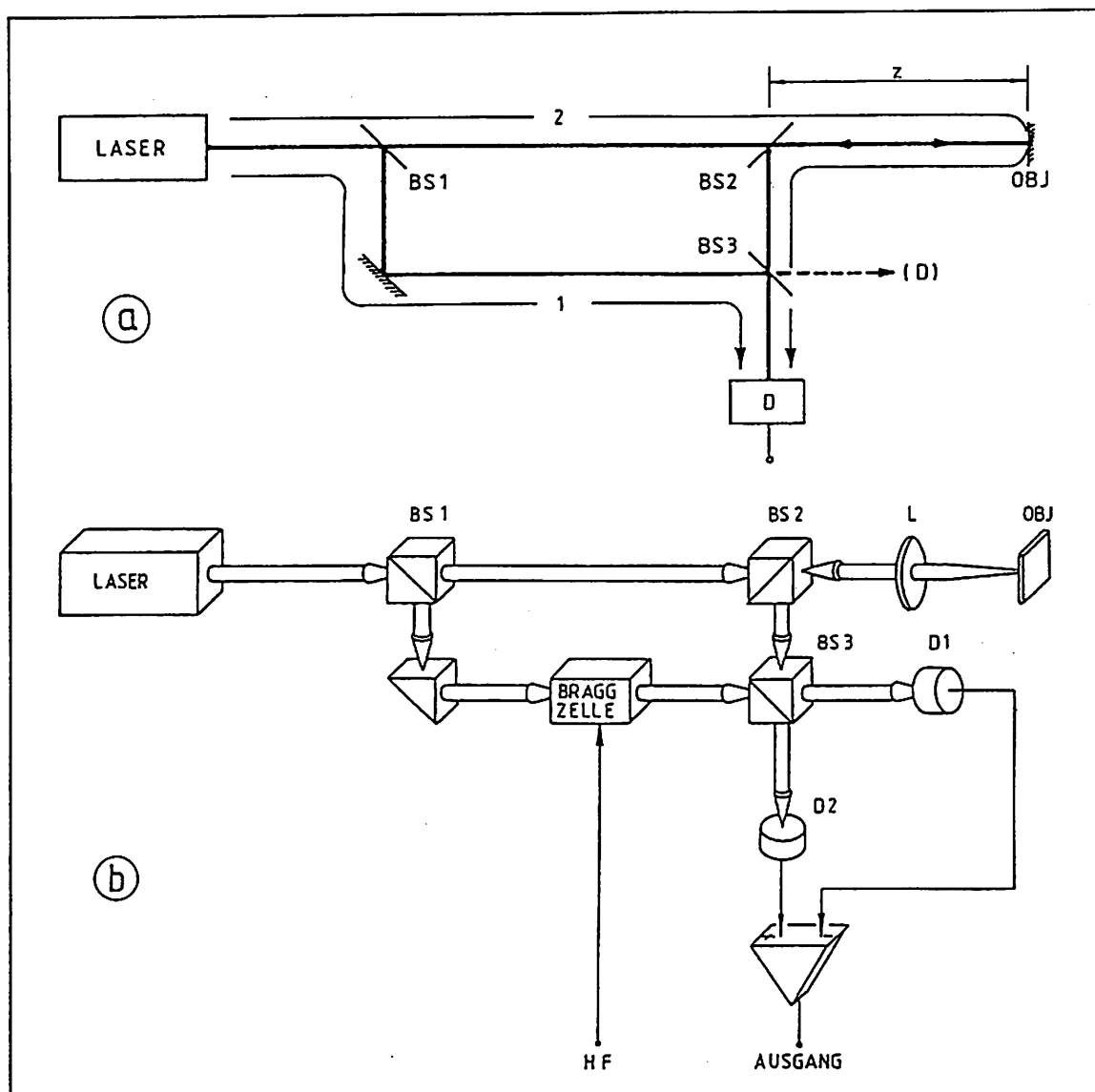
### 4.2.1 Laservibrometer

Das Vibrometer beruht auf dem Prinzip des Mach-Zehnder-Interferometers. In Bild 4.2a ist das Prinzip des Mach-Zehnder Interferometers schematisch dargestellt.

Bild 4.2: Optischer Aufbau eines Einpunkt-Vibrometers [LEW90]

a.) Prinzipdarstellung

b.) Praktische Realisierung mit Frequenzmodulation des Referenzstrahles



In Bild 4.2b ist der Aufbau eines Einpunkt-Vibrometers dargestellt. Der Laserstrahl wird am Strahlteiler ( Beamsplitter ) **BS1** in einen Meß- und einen Referenzstrahl aufgeteilt. Der Referenzstrahl gelangt über den Spiegel, die **Bragg-Zelle** und den Strahlteiler **BS3** direkt auf den Detektor. Der Meßstrahl tritt aus dem Strahlteiler **BS2** des Interferometers aus und wird über einen Lichtwellenleiter an den Meßort geführt. Dort wird er über ein Linsensystem **L** auf den zu messenden Objektpunkt **OBJ** fokussiert. Das an der Oberfläche reflektierte Licht wird wieder in die Glasfaser eingekoppelt. Durch eine  $\lambda/4$ -Platte im Sensorkopf wird die Schwingungsrichtung des zurückreflektierten Laserstrahls um  $90^\circ$  gedreht und damit eine Trennung des gesendeten und des zurückreflektierten Lichtes erreicht. Das empfangene Licht wird über denselben Lichtwellenleiter in die Interferometeranordnung eingekoppelt und dort über den Strahlteiler **BS2** und **BS3** dem Referenzstrahl überlagert. Dabei entstehen in **BS3** Interferenzsignale, die der Schwingungsgeschwindigkeit des Objektes proportional sind. Diese Interferenzen werden im Photodetektor **D** in elektrische Signale gewandelt, diese im Signalprozessor ausgewertet und als zeitabhängiges Spannungssignal an den Ausgang gegeben. Die **Bragg-Zelle** ist ein akustooptischer Modulator, welcher das elektromagnetische Feld des Referenzstrahles gegenüber dem Feld des Meßstrahles in seiner Frequenz verschiebt, um die Bewegungsrichtung des schwingenden Meßobjektes zu ermitteln [LEW90].

Mit dem Amplitudendemodulator werden die Hell-Dunkel-Übergänge gezählt, die durch die Bewegung des Meßobjektes hervorgerufen werden. Aus dem resultierenden Zählerstand wird das Ausgangssignal durch D/A-Wandlung gewonnen. Mit diesem Verfahren sind in der hochauflösenden ( High-Resolution ) Ausführung des Vibrometers Schwingungen mit einer Amplitude von  $A = 8 \text{ nm}$  meßbar.

Ein ebenfalls im Signalprozessor eingebauter Geschwindigkeits-Demodulator wandelt das von der Oberfläche des Meßobjektes reflektierte Licht, das in seiner Frequenz verschoben ist ( Doppler-Effekt ), in ein analoges, der Geschwindigkeit der schwingenden Oberfläche proportionales Ausgangssignal. Mit der Geschwindigkeitsdemodulation sind Messungen in einem großen Frequenzbereich möglich, ohne daß der Meßbereich gewechselt werden muß.

Die Ausstattung des Laservibrometers besteht aus:

- Geschwindigkeits- und Amplitudendemodulator
- High-Resolution-Streifenzähler ( theoretische Auflösung  $A = 8 \text{ nm}$  )
- Differentielles Meßsystem mit zwei Glasfasern und zwei Einpunktmeßköpfe

Zubehör des Polytec-Meßstandes:

- Aluminium-Grundplatte mit Galgenaufbau
- x-y-Mikrometerjustierung
- Aufbauten für differentielle Messung mit Strahlteilerwürfel



Die Spezifikationen des am Hahn-Schickard-Institut vorhandenen Gerätes sind in Tabelle 4.1 angegeben.

Tab.4.1: Spezifikationen des Laservibrometers [LEW90]

Meßbereich	Aussteuerbereich* (Spitze-Spitze Wert)	Auflösung**	Max. Signal- bandbreite	Max. Signal- anstiegsgeschw. (Slew Rate)	Linearität
<b>Geschwindigkeit</b>	<b>mm</b> sV	<b>µm</b> s	<b>MHz</b>	<b>Beschleunigung</b> g	<b>% FS</b>
5	100	0,5	0,5	1000	0,5
25	500	2	1	5000	
125	2500	8	0,5	25000	
1000	20000	40	0,5	200000	
<b>Amplitude</b>	<b>mm</b> V	<b>µm</b> V	<b>MHz</b>	<b>Geschwindigkeit</b> m/s	<b>% FS</b>
2	0,032	0,008	0,05	0,25	0,1
8	0,13	0,032		1,0	
20	0,32	0,08		2,5	
80	1,3	0,32		9	
320	5,2	1,3		9	
1280	20,5	5		10	
5120	82	20		10	

Eine Anleitung zur Inbetriebnahme des Laservibrometers ist in [MÜL92] im Hahn-Schickard-Institut enthalten.

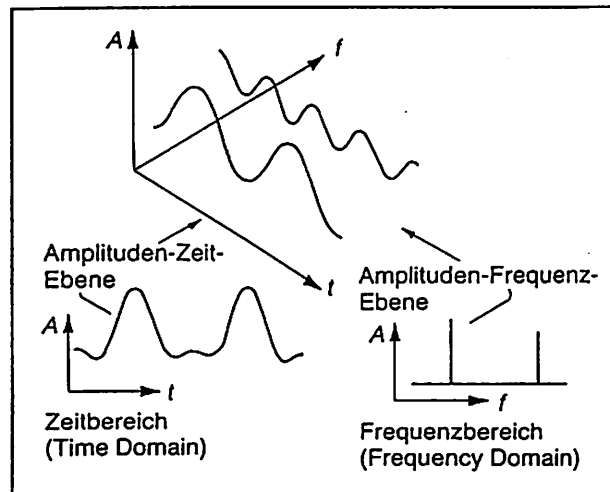
#### 4.2.2 Spektrum-Analysator

Ein Signal kann sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich ausgewertet werden. Im Zeitbereich wird eine elektrische Größe z.B. die Spannungsamplitude  $A(t)$  als Funktion der Zeit dargestellt. So zeigen z.B. Oszilloskope den zeitabhängigen Verlauf der Spannung  $A_U(t)$  an.

Der Spektrum-Analysator erhält ein analoges Signal am Eingang und wandelt es in den Frequenzbereich um. Die aus dieser Umwandlung entstandene Abbildung zeigt die Energie jedes Frequenzanteils des Zeitsignals.

Schwingungssignale bestehen häufig aus vielen gleichzeitig auftretenden Komponenten mit verschiedenen Frequenzen. Bei der Darstellung des Signals im Amplituden-Zeit-Diagramm  $A(t)$  (Zeitbereich) läßt sich nicht unmittelbar ablesen, wieviele Komponenten vorhanden sind und wie hoch ihre Frequenzen sind. Daher werden die Signale in den Frequenzbereich transformiert (Fouriertransformation) und dort die Schwingungsamplituden über der Frequenz aufgetragen. Diese Amplituden-Frequenz-Diagramme  $A(f)$  bezeichnet man als Spektrogramm oder Spektrum. Das Aufspalten der Schwingungssignale in die einzelnen Frequenzanteile wird Spektrumanalyse genannt.

Bild 4.3: Die Beziehung zwischen Zeit- und Frequenzbereich [SCH90]



Der Spektrum-Analysator schiebt ein Filter mit kontinuierlich ansteigender Mittenfrequenz und mit einstellbarer Bandbreite über das Eingangssignal und multipliziert seine Oszillatoramplitude mit dem Amplitudenspektrum des Eingangssignals. Zu jeder Mittenfrequenz wird die aus dieser Multiplikation resultierende Amplitude gemessen, abgespeichert und am Display wiedergegeben. Auf diese Weise läßt sich ein Spektrum erfassen.

Der HP-Spektrum-Analysator hat einen Frequenzbereich von 10 Hz bis 150 MHz.

Eine eingebaute Quelle ( Frequenzgenerator ) ermöglicht das Durchfahren eines Frequenzbereiches mit einem Sinussignal variabler Frequenz und konstanter Amplitude. Diese Quelle wird eingesetzt um eine mikromechanische Struktur mit einem Signal variabler Frequenz anzusteuern. Das Laservibrometer liefert das resultierende frequenzabhängige Amplitudensignal zurück an den Eingang des Spektrum-Analysators, sodaß das Spektrum der Struktur dargestellt werden kann.

Der Spektrum-Analysator kann sowohl durch das Bedienfeld auf der Vorderseite als auch über den HP-Interface-Bus, kurz HP-IB genannt, über einen Rechner betrieben werden. In diesem sogenannten " REMOTE " - Betrieb sind automatisierte Messungen möglich.

Der Spektrum-Analysator bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll. Hier wird auf die Handbücher [MAN90] verwiesen. Bei den Forderungen nach einer hohen Auflösung, einer geringen Meßzeit und eines großen Frequenzmeßbereiches müssen Kompromisse geschlossen werden. Eine hohe Auflösung mit geringer Filterbandbreite ( resolution-bandwidth ) ist nur möglich, wenn der Filter eine genügend hohe Einschwingzeit ( große sweeptime ) zur Verfügung hat. Die hochauflösenden Messungen sollten daher nur in einem kleinen relevanten Meßbereich ( geringe Frequenzspanne ) durchgeführt werden.

#### 4.2.3 Schnittstelle

##### Der IEEE488-Standard:

Die HP-IB-Schnittstelle im Spektrum-Analysator und die CEC488-Schnittstelle im Rechner sind nach IEEE488 genormt. Die Norm IEEE488 behandelt ein Bus-System speziell für den Laborbereich mit folgenden Eigenschaften [CEC89]:

Es können mehrere Meßgeräte und mehrere controllerfähige Geräte ( Rechner ) am selben Bus angeschlossen sein, wobei aber nur ein Controller aktiv sein darf. Zuerst sendet der aktive Controller ein Kommando, welches alle Geräte zum " Nicht-Hinhören " veranlaßt. Danach werden die Talker und Listener adressiert, d.h. die anzusprechenden Geräte werden zu Talker ( Sprechern ) oder Listener ( Zuhörern ) erklärt. In einem System können 15 Geräte konfiguriert sein. Um jedes Gerät gezielt anzusprechen, hat jedes Meßinstrument und jeder Rechner eine im Bus-System einzigartige Adressennummer zwischen 0 und 30. Anschließend folgt die Datenübertragung mit einer Übertragungsrate von bis zu 1 Megabyte pro Sekunde mit je acht parallelen Daten- und Steuerleitungen. Die Datenübertragung wird unterschieden in:

- Kommandos ( ATN-Leitung: TRUE )
- Daten ( ATN-Leitung: FALSE )

Alle Geräte, die nicht adressiert wurden, sind inaktiv.

Die Übertragungsrate wird vom langsamsten Zuhörer des Kreises festgelegt.

##### Beispiel:

Mit den Turbo-Pascal-Befehlen: INITIALIZE ( 21 , 0 );

SEND ( 19 , ' DATA ' , status );

( definiert in der Unit IEEE488.pas )

wird automatisch:

- das "Alle-Nicht-Hinhören"-Kommando gesendet
- Die Adresse des Talkers (21,x) als aktiver Controller (xx,0) festgelegt.
- Der Listener 19 (Spektrum-Analysator) angesprochen
- Die Datenbytes D, A, T, A, cr und lf gesendet

Besonderheit des HP-Interface-Bus:

Sobald der Digitale Spektrum-Analysator ( DSA ) über den HP-IB angesprochen wird, wird er automatisch in den " REMOTE " ( Hintergrund ) -Betrieb geschaltet.

Die Datenübertragung über den HP-IB geschieht nach folgenden Vereinbarungen [REF90],[BAS90]:

- \* HP 3588A kann talker, listener, active controller oder system controller sein.
- \* Jedes Gerät am Bus muß eine Adresse haben:  
( DSA=19, PC=21, Plotter=5, Printer=1 )
- \* Kommandos werden über den HP-IB-Bus mittels der Sprache des Controllers  
( Basic oder Turbo-Pascal ) übertragen.

Man unterscheidet zweierlei Kommandos für den HP-IB:

- Bus-Management-Kommandos, welche das HP-Interface kontrollieren
- Geräte-Kommandos, welche die Analysator-Funktionen kontrollieren, sind Strings innerhalb des Bus-Kommandos. Diese Kommandos sind in TMSL geschrieben. TMSL ( Test and Measurement System Language ) ist eine Sprache, welche speziell für elektronische Test und Meßinstrumente von HP entwickelt wurde.

Die Kommandos werden in den Eingangspuffer des Instrumentes geschrieben, da der Bus die Kommandos schneller sendet, als das Instrument sie verarbeiten kann. Der Puffer wird dann abgearbeitet, bis er leer ist. Die Kommandos sind nicht immer direkt mit den "HARDKEYS" ( Tastern ) im "FRONT-PANEL" ( Bedienfeld ) -Betrieb zu vergleichen:

Befehlsfolge:            [MeasType],[NARROW BAND ZOOM]  
entspricht TMSL:        'FUNC:POW FFT'

Die TMSL-Codes können angezeigt werden mit: [Local/HP-IB],[ECHO ON]

Besonderheiten in dieser konkreten Anwendung

- \* HP-IB-Setup: Rechner ist Controller, Spektrum-Analysator ist passiv
  - "HARDKEY" drücken: **Local/HP-IB**
  - "ANALYSER'S ADDRESS" auf 19
  - "HARDKEY" drücken: **adressable only**
- \* Der Spektrum-Analysator wird vom Programm HPMESS.EXE in die "REMOTE"-Betriebsart und nach der Datenübertragung wieder zurück geschaltet.
- \* Um den Spektrum-Analysator während des Programmlaufes in "FRONT- PANEL"-Betriebsart zu setzen muß der "HARDKEY": **Local/HP-IB** gedrückt werden.

## 5. Meß- und Steuerprogramm

Die erste Teilaufgabe war die Erstellung eines Programms zur automatischen Steuerung des Meßablaufes am Spektrum-Analysator und die Dokumentation der Messungen in Form von Meßprotokollen.

### 5.1 Aufgabenstellung

Die Anforderungen, die das Programm erfüllen sollte, waren von den Mitarbeitern des Hahn-Schickard-Institutes bereits grob zusammengefaßt:

- Auslesen der Daten, welche den Zusammenhang der frequenzabhängigen Größen Amplitude  $A(f)$  und Geschwindigkeit  $V(f)$  am Spektrum-Analysator darstellen
- Der Spektrum-Analysator soll größtenteils vom Rechner aus bedient werden
- Einzelne Messungen sollen im Rechner vorbereitet, am Spektrum-Analysator ausgeführt, im Rechner abgespeichert und unabhängig vom Spektrum-Analysator ausgewertet werden ( Graphisch darstellen, kommentieren, fitten )
- Die Programmierung soll in Turbo-Pascal erfolgen
- Der Datenaustausch zwischen Rechner und Analysator soll über eine HP-IB-Schnittstellenverbindung erfolgen
- Darstellung der Parameter und Meßdaten erfolgt in einem externen Graphikprogramm

Aus diesen Anforderungen ergaben sich folgende Teilaufgaben:

- Einbau der CEC488-Schnittstellenkarte in den Rechner
- Einarbeiten in die Struktur des IEEE488-Bus
- Einarbeiten in Spektrum-Analysator Grundlagen
- Einarbeiten in Kontrolle des Spektrum-Analysators über den HP-Interface-Bus

- Erstellen von Testprogrammen zur Parameter-Übermittlung
- Erstellen von Testprogrammen zur Meßdaten-Übermittlung
- Festlegung meßtechnisch relevanter Parameter
- Entwurf der Programm-Struktur ( siehe Struktogramm )
- Schreiben der Prozeduren
- Einarbeiten in das kommerzielle Graphikprogramm " GRAPHER "
- Erweitern des Programms um Prozeduren, welche die Rohdaten für das Graphikprogramm aufbereiten
- Fehlersuche und Korrekturen

## 5.2 Lösungsbeschreibung

Das Programm besteht aus Prozeduren, die in Include-Dateien nach Funktionen gegliedert sind. Prozeduren, die sich in ihrer Funktion ähneln, sind in einer Include-Datei zusammengefaßt.

Die Include-Datei **HPDecl.inc** enthält alle für das Gesamtprogramm notwendigen Deklarationen. Hierin sind alle Variablen als globale Variablen deklariert.

In der Include-Datei **Realin.inc** steht eine Prozedur, die eine korrekte Eingabe einer Fließkommazahl ermöglicht. Es können also numerische Zeichen, ein Vorzeichen und ein Dezimalpunkt eingegeben werden.

In der Datei **HPFile.inc** sind die Prozeduren enthalten, die für das sichere Abspeichern und Laden von Kommentartexten und Parametersätzen in bzw. aus beliebigen Unterverzeichnissen notwendig sind. Es wird das Überschreiben vorhandener Dateien sowie der Versuch des Auslesens einer nicht vorhandenen Datei gemeldet. Die Prozedur **Gen-graph** bereitet Rohdatentexte so auf, daß sie im Graphikprogramm GRAPHER gelesen werden können. In dem Graphikprogramm GRAPHER werden Kopftext, Parameter und Datensatz zu einem Meßprotokoll, wie in Bild 5.4 zu sehen ist, zusammengestellt.

**HPParm.inc** ist die Include-Datei mit den Unterprogrammen, welche die Korrespondenz zwischen Rechner und Spektrum-Analysator ermöglichen. Hier ist auch die Prozedur enthalten, um Kopftexte zu schreiben und Parametersätze für den Spektrum-Analysator vom Rechner aus vorzugeben.

Es wurde eine Auswahl der wichtigsten einzustellenden Parameter getroffen. Die Prozeduren enthalten Kommandos für die Ansteuerung des Bus-Systems, sowie für den "REMOTE"-Betrieb des Spektrum-Analysators.

Die zum Bildschirmmaskenaufbau nötigen Prozeduren stehen in der Datei **Rahmen.inc**.

Die Include-Datei **Transfer.inc** enthält nur eine Prozedur, in der 401 Amplitudenwerte ausgelesen werden, welche das Spektrum am Display des Analysators darstellen. Es bestehen zwei Möglichkeiten, um Daten auszulesen. Zum einen können mit dem TMSL-Kommando "TRAC:DATA" die noch nicht im Analysator aufbereiteten Rohdaten in den Rechner geladen werden, zum anderen können die für die Display-Anzeige umgerechneten Daten mit dem Kommando "CALC:DATA" geladen werden. Im Programm ist die zweite Lösung realisiert.

Die Amplitudenwerte werden aus einem Register des Spektrum-Analysators in Blöcken à 12 ASCII-Zeichen auf die Bus-Leitung kopiert. In der Prozedur werden diese Blöcke getrennt. Die graphische Darstellung der Amplitude über der Frequenz erfordert XY-Koordinatenpaare, um einzelne Punkte abzubilden. Dazu werden die aus der Start- und der Stopfrequenz errechneten X-Werte und die eingelesenen 401-Amplitudenwerte als zweispaltige Koordinatenmatrix in eine Datei abgelegt.

Um aus einer Rohdaten-Datei nur die Koordinatenwerte auszulesen, wurde die Prozedur **DATTRANS** in der Include-Datei **Dattrans.inc** geschrieben. Sie ist notwendig, um nur den reinen Koordinatensatz aus den Rohdaten in eine von **GRAPHER** lesbare Datei zu übertragen.

Es sollte in jedem Benutzerverzeichnis eine Datei **Preset.roh** angelegt werden, in welcher die Parameter für eine Grundvoreinstellung ( Default- oder Preseteinstellung ) stehen.

Diese Datei wird vom der Prozedur **PARMLOAD** aufgerufen, wenn im Hauptmenü der Punkt 1 "PRESET LADEN" gewählt wurde. Die logische Variable "default" wird TRUE gesetzt und somit diese Datei aufgerufen. Die Parameter können jederzeit geändert werden.

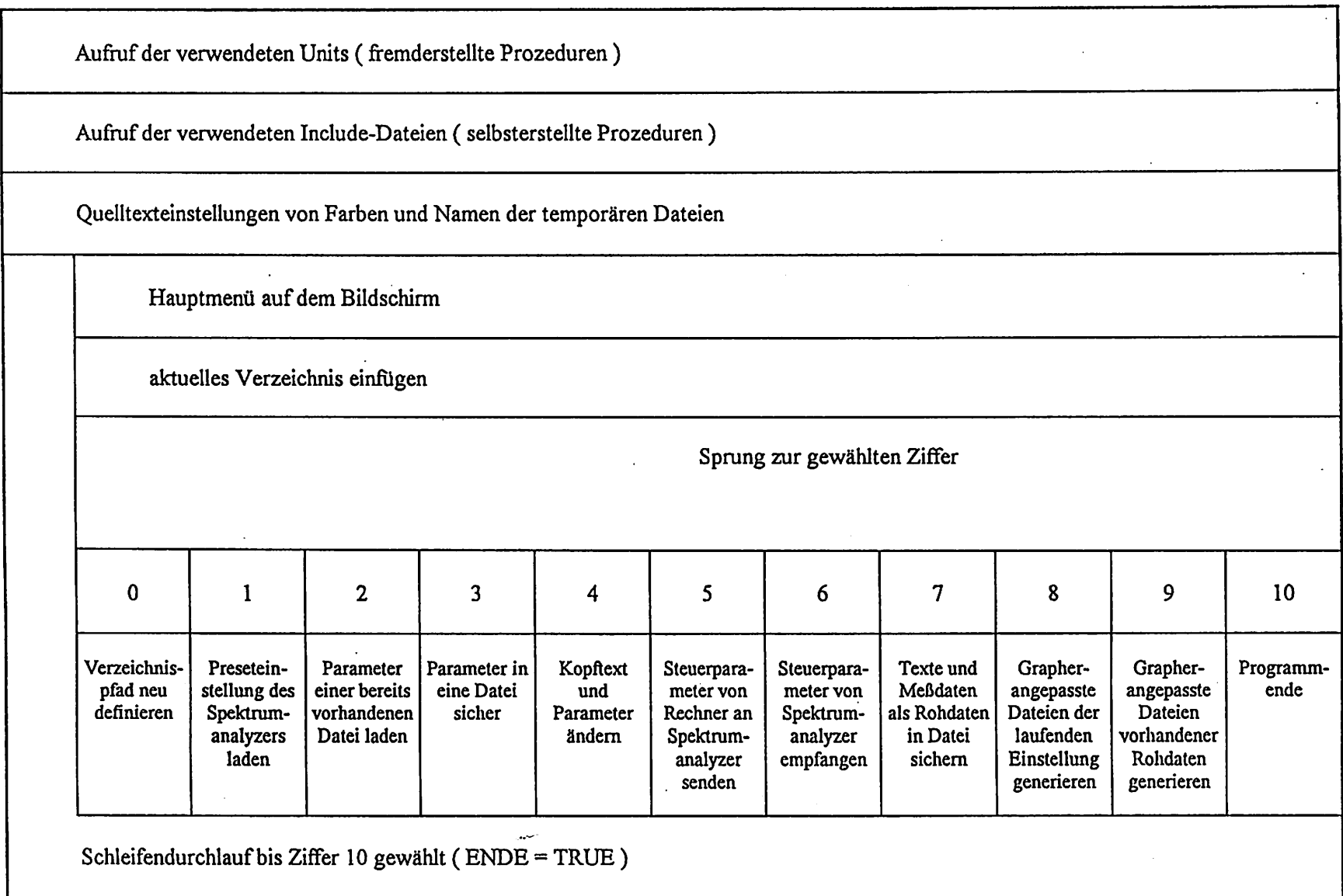
### 5.3 Beschreibung und Struktogramm des Hauptprogramms

Im folgenden werden die einzelnen Menüpunkte des Hauptprogramms kurz erläutert.

- 0: Hier kann das **Benutzerverzeichnis** gewechselt werden. Um dies zu ermöglichen, wird eine Initialisierungsdatei **HPMess.ini** angelegt, in welche der Verzeichnispfad abgelegt oder ausgelesen wird.
- 1: Um den Spektrum-Analysator in eine **definierte Voreinstellung** zu bringen, kann hier eine Datei geladen werden, in welcher diese Preset-Einstellungen stehen.
- 2: Mit diesem Teil kann auf den **Parametersatz** einer alten Messung oder den für eine spätere Messung vorbereiteten Datensatz zurückgegriffen werden.
- 3: Dieser Programmpunkt **speichert Meßprogrammparameter ab**.
- 4: Hier können Kommentare und weitere wichtige **Daten eingetragen** werden, sowie Steuerparameter für den Spektrum-Analysator im Rechner eingestellt werden.
- 5: Dieser Menüpunkt sendet die im Rechner eingestellten **Steuerparameter an den Spektrum-Analysator**.
- 6: Mit diesem Menüpunkt werden die **Steuerparameter aus dem Analysator** in den Rechner geladen.
- 7: Hier werden Kopftexte, Parameter und die Koordinaten für die Darstellung des Spektrums in eine **Rohdatei ( \*.dsa )** abgelegt.
- 8: Um die **aktuelle, im Rechner befindliche Einstellung graphisch darzustellen**, werden die Daten für GRAPHER aufbereitet. Die aktuelle Messung kann in GRAPHER betrachtet werden, wenn dort die Textdateien **HPdokuK.txt** und **HPdokuP.txt** sowie die Meßwertedatei **HPdaten.dat** aufgerufen wird.  
( Standardgraphikdateien: HPDOKU.GRF und HPSHOW.GRF )
- 9: Dieser Menüpunkt ermöglicht die **Konvertierung von Rohdaten** in unter GRAPHER lesbare Textdateien und Meßwertedateien.
- 10: Mit der Wahl dieser Ziffer wird das **Programm beendet**.



Bild 5.1: Struktogramm des Hauptprogramms



Das Programmlisting ist im Anhang zu finden. Die einzelnen Prozeduren sind dort detailliert kommentiert. Eine Zusammenstellung der für den Meßablauf notwendigen Programme und Dateien ist im Kapitel 10.4 vorhanden.

Bild 5.2: Bildschirmabdruck des Hauptmenüs aus dem Programm HPMESS.EXE

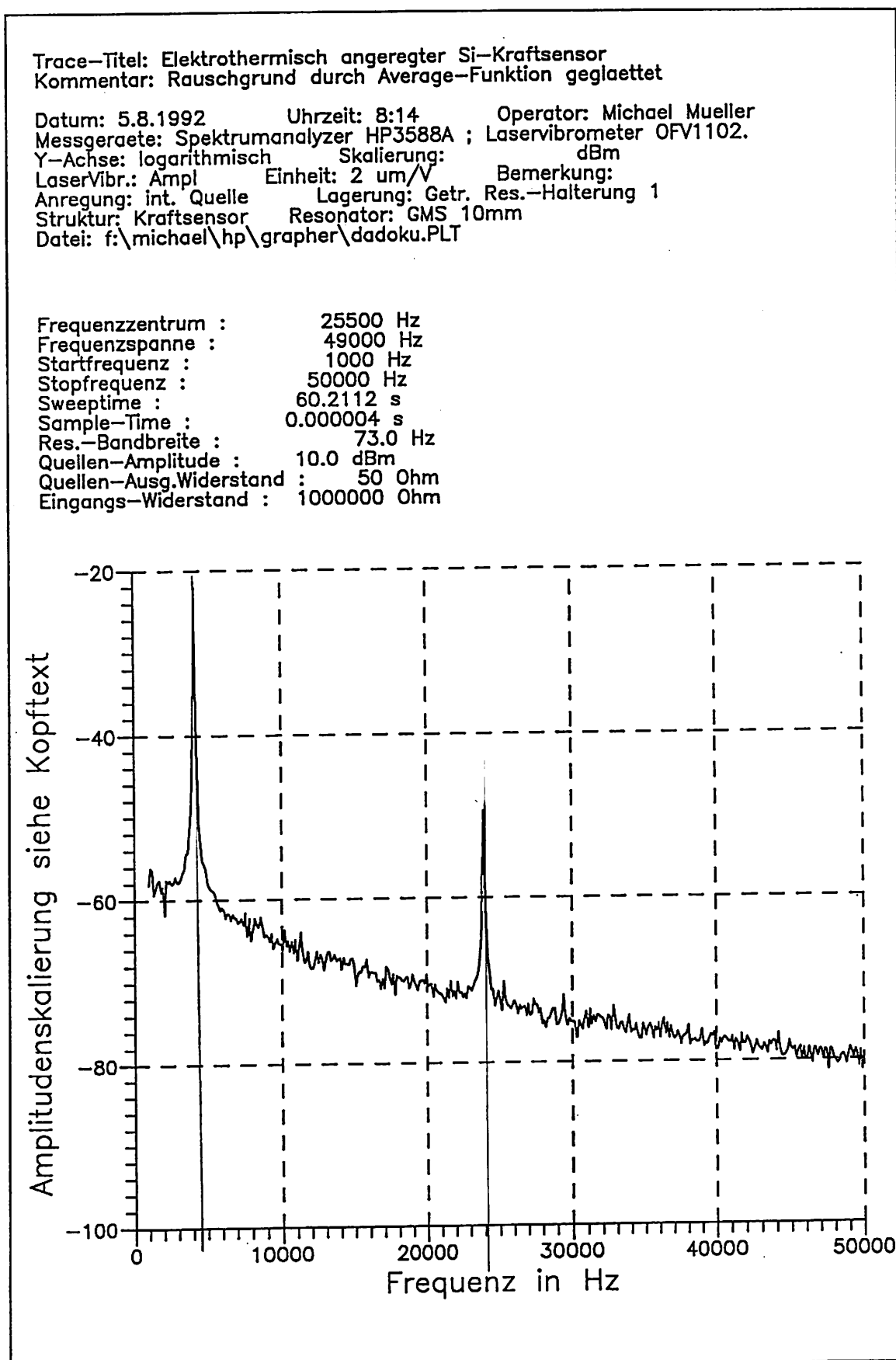
HPMESS - HAUPTMENÜ
0.) Verzeichnis auswählen.
1.) Default-Parameter ( Preset ) laden. 2.) Parameter aus Datei einlesen. 3.) Parameter in Datei speichern. 4.) Parameter verändern.
5.) Parameter an Spektrumanalyzer senden. 6.) Parameter von Spektrumanalyzer empfangen.
7.) Mit dieser Einstellung messen.
8.) Grapher-File der laufenden Messung generieren. 9.) Grapher-File einer alten Messung generieren.
10.) Programm beenden.
Bitte wählen Sie eine Zahl aus :

Bild 5.3: Bildschirmabdruck der Maske des Menüpunktes 4

4.) PARAMETER ÄNDERN	
Titel: Experimentelle Modalanalyse am el.-therm.-angeregten Si-Kraftsensor Kommentar: Rauschgrund durch Average-Funktion geglättet	
Datum: 21.8.1992	Uhrzeit: 10:22
LU: Ampl	Einh: 2 umV
Anregung: int. Quelle	Lagerung: 3-fach Res.-Halterung
Struktur: Kraftsensor	Resonator: GMS 8mm mitte
[ Frequenzzentrum	: 15500 Hz
[ Frequenzspanne	: 29000 Hz
[ Startfrequenz	: 1000 Hz
[ Stopfrequenz	: 30000 Hz
Sweep time	: 20.0704 s
Sample time	: 0.000001 s
Res-Bandbreite	: 290.0 Hz
Darstellung lin / log	: logarithmisch
Quellenamplitude	: 10.00 dBm
Eingangswiderstand ( 1: 500hm , 2: 750hm , 3: 1M0hm )	: 1000000 Ohm
Zurück zum Hauptmenü mit beliebiger Taste	

Bild 5.4 enthält ein vollständiges Meßprotokoll, dessen Erstellung eine Teilaufgabe der Programmierung war. Es ist gegliedert in Kopftext (nameK.txt), Parametersatz (nameP.txt) und die Darstellung der Amplitudenmeßwerte (name.dat) als Spektrogramm.

Bild 5.4: Meßprotokoll, automatisiert erstellt mit Graphikprogramm GRAPHER



## 6. Konstruktion einer universellen Resonatorhalterung

Den zweiten Schwerpunkt der Diplomarbeit stellte die Konstruktion einer Vorrichtung zur Krafteinleitung in einen resonanten Sensor dar. Damit die Kraft geeignet in den Resonator eingeleitet werden kann, müssen die empfindlichen Strukturen fixiert werden. In diesem Kapitel soll deshalb zunächst auf die Konstruktion der Resonatorhalterung eingegangen werden.

### 6.1 Anforderungen

Die universelle Resonatorhalterung sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Sichere Einspannung der vier vorhandenen Versionen von Balkenresonatoren  
( Verschiedene Abmessungen in Breite und Länge )
- lösbare mechanische Verbindung
- lösbare elektrische Kontaktierung
- kurze Verdrahtung zur Auswerteschaltung
- Vermeidung von inneren Spannungen im Resonator
- Sicherung vor Einleitung von unerwünschten Kräften und Momenten
- Gestaltung derart, daß die Halterung in die Vorrichtung zur Krafteinleitung eingelegt und elektrisch kontaktiert werden kann.

### 6.2 Befestigungsmöglichkeiten

Um die Sensoren auf einem Träger zu befestigen, bestehen grundsätzlich drei Möglichkeiten. Die Struktur kann entweder aufgeklebt, anodisch auf einen Glasträger aufgebondet oder geklemmt werden. Eine Befestigungsart die alle Anforderungen erfüllt, konnte nicht entworfen werden. In diesem Kapitel sollen die Befestigungsmöglichkeiten und die damit verbundenen Einschränkungen bezüglich der Anforderungsliste aufgezeigt werden.

Klemmen:

Das Klemmen hat den Vorzug, daß die Verbindung gelöst werden kann. Hierbei werden die Sensoren über einen Klemmbügel in einen ausgefräzten Sitz gepreßt. Die Auflagefläche einiger Sensoren beträgt jedoch nur  $A = 7,5 \text{ mm}^2$  und die senkrecht auf die Oberfläche wirkende Preßkraft, die notwendig ist, um den Sensor zu halten wenn eine axiale Kraft in den Sensor eingeleitet wird, muß sehr groß sein. Die im Sensor entstehende mechanische Spannung würde die gemessenen Resonanzfrequenzwerte zu stark beeinflussen. In zwei Versuchen wurde festgestellt, daß die Anpreßkraft, die mit einer Schraube

und einem Nitrilkautschukpolster auf diese kleine Fläche nicht ausreichend genau dosiert werden konnte. Diese Kraftsensoren waren zu spröde und sind gebrochen.

Ein weiteres Ausscheide-Kriterium ist die bei der Klemmung nicht mehr gewährleistete elektrische Kontaktierbarkeit einiger Sensoren.

#### Anodisches Bonden:

Verursacht durch eine angelegte Hochspannung entsteht zwischen der Siliziumstruktur und einem darauf aufgelegten Glasträger ( z.B. Pyrex ) eine feste Verbindung. Die Vorteile dieser Lösung sind zum einen die feste Bindung und die gute Übereinstimmung der Wärmeausdehnungskoeffizienten d.h. es treten keine durch Temperaturveränderungen entstehende mechanische Spannungen auf.

Während des Entwurfs der zum anodischen Bonden notwendigen Hilfsmittel wurde jedoch der große Aufwand erkennbar, so daß diese Befestigungsart nicht realisiert wurde.

#### Kleben:

Die Sensoren werden mit einem Klebstoff ( Epoxidharz oder DMS-Kleber ) in eine Halterung z.B. aus Messing eingeklebt. Diese Lösung hat sich als am besten geeignet erwiesen. Allerdings ist diese Verbindung des Sensors mit der Halterung bei den geeigneten Klebstoffen nicht ohne Zerstörung des Sensors zu trennen.

Die Resonatorhalterung besteht aus zwei Teilen, welche in eine Vorrichtung zur Krafteinleitung eingelegt werden. Der Sensor bildet eine Art Brücke zwischen diesen beiden Hälften. Diese Anordnung ist sehr bruchgefährdet und muß daher durch einen Spannrahmen stabilisiert werden. Dieser Spannrahmen schränkt die Auswahl des Klebstoffes ein. Es kann kein warmaushärtender Klebstoff benutzt werden, da die Aushärtetemperatur eine unterschiedliche Längenausdehnung des Rahmens und des Sensors zur Folge hätte. Die dabei entstehenden Spannungen können den Bruch des Sensors verursachen. Auch in der Klebefläche sind mechanische Spannungen, die während des Aushärtens entstehen, denkbar.

Ein weiterer, wenn auch vorerst vernachlässigbarer Nachteil ist die unbekannte Wärmeleitung der Klebstoffschicht. Die Klebstoffmenge kann nicht so genau dosiert werden, daß bei allen Halterungen eine konstante Schichtdicke vorausgesetzt werden kann. Die Wärmeabfuhr aus den NiCr-Widerständen über das Silizium und die Klebstoffschicht an die Halterung ist deshalb von Fall zu Fall verschieden.

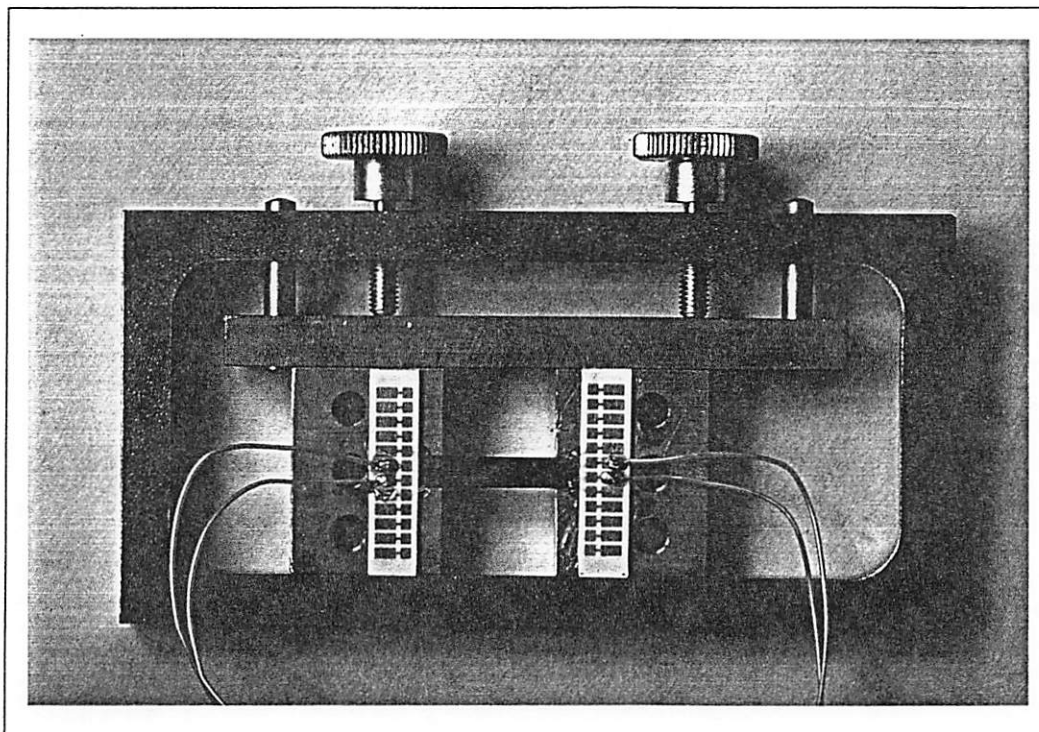
In Kapitel 6.3 werden die gefertigten Resonatorhalterungen vorgestellt.

### 6.3 Diskussion und Bewertung der ausgewählten Befestigung

Die Halterungen wurden aus Messing gefertigt. In die Träger wurden Sitze eingearbeitet damit die Sensoren möglichst in der Achse liegen, in der die Kraft eingeleitet wird. Die Ecken der Sitze sind freigestochen. Die Halterung wird, wie in der Einzelteilzeichnung angedeutet, in einem Stück bearbeitet, um die Symmetrie der Bohrungen und des Sitzes zu sichern. Erst nachdem diese Arbeitsgänge abgeschlossen sind, wird zuletzt die Resonatorhalterung aufgetrennt und entgratet. Jede Hälfte ist mit drei Bohrungen versehen, welche das Einsetzen in den Kraftmeßstand erlauben ( siehe Kapitel 7 ).

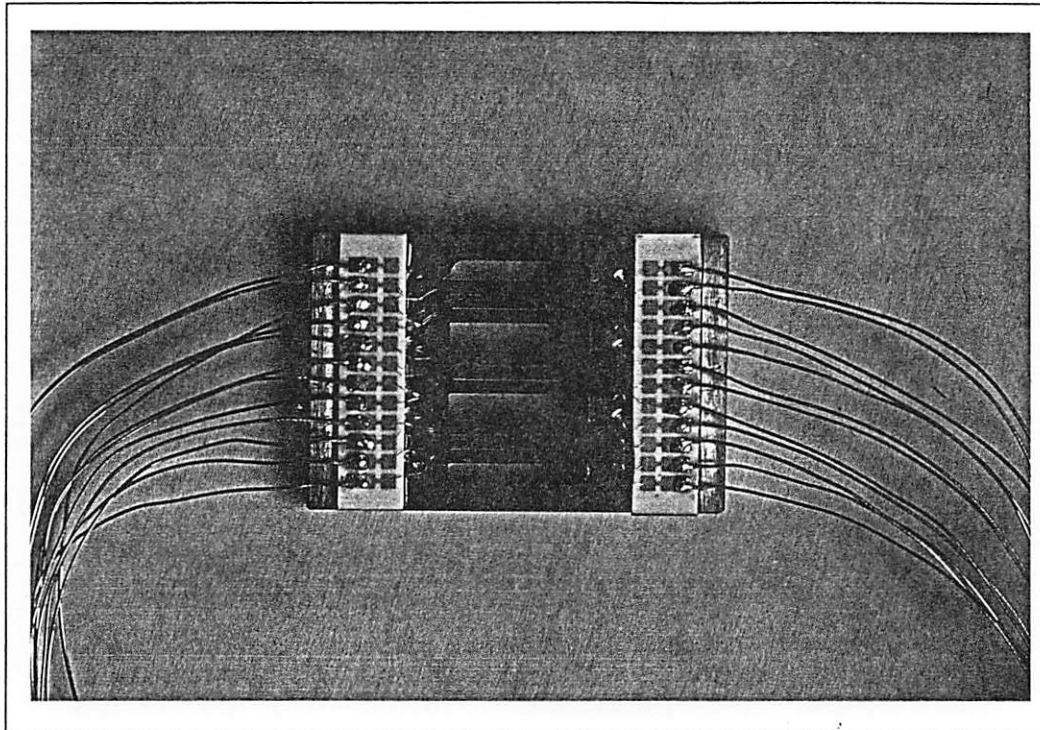
Die beiden Hälften der Halterung werden in den Kraftmeßstand eingesetzt, und der Abstand so ausgerichtet, daß der Sensor gerade eingepaßt werden kann. Dann wird der Spannrahmen umgelegt und die Rändelschrauben angezogen. Jetzt werden die Klebestellen gereinigt, mit Klebstoff dünn bestrichen und der Sensor eingelegt (siehe Bild 6.1 ).

Bild 6.1: Resonatorhalterung mit Si-Kraftsensor und Spannrahmen



Als Variante wurden zusätzlich einige Halterungen gefertigt, wie sie in Bild 6.2 gezeigt sind. Da hier immer drei Sensoren derselben Länge vorlagen, konnten deren Amplitudenspektren statistisch untersucht werden.

Bild 6.2: 3-fach-Resonatorhalterung zur statistischen Auswertung der Amplitudenspektren von Si-Kraftsensoren



Die elektrische Kontaktierbarkeit kann nur durch eine bedingt lösbare Draht-Bond-Verbindung hergestellt werden. Andere Möglichkeiten, wie die aus der Leiterplattenprüfung bekannten Nadelbettprüfadapter waren für diese räumlichen Verhältnisse zu aufwendig. Ein weiterer Nachteil sind die durch die Nadeln auf eine kleine Fläche eingeleiteten Kräfte, die so groß sein müssen, daß eine gute Kontaktierung mit geringem Übergangswiderstand gewährleistet ist, und damit aber zu hohe mechanische Spannungen im Silizium verursachen.

Auch eine Kontaktierung mit leitfähigem Moosgummi, der zur Kontaktierung von LCD-Displays verwendet wird, ist nicht geeignet.

Die verbleibende Alternative war das Aluminium- oder Golddrahtbonds. Dazu werden auf die Halterungen Keramikträger mit vergoldeten Kontaktflächen als Lötstützpunkte aufgeklebt. Die Bonddrähte wurden von der Firma GMS mbH in St. Georgen auf die eine Hälfte der Kontaktflächen gezogen, auf der anderen Seite wurden Litzen angelötet, damit die Erregersignalquelle angeschlossen werden kann.

Die Stückliste und die Einzelteilzeichnungen sind im Anhang in Kapitel 11.2 und 11.3 vorhanden.