

7. Konstruktion einer Vorrichtung zur Krafteinleitung

Zur Vermessung der Kraftempfindlichkeit der resonanten Kraftsensoren mußte eine Vorrichtung entwickelt werden.

7.1 Anforderungen und Auswahl der Führung

Die wichtigste Forderung an diese Vorrichtung war die Einleitung einer Kraft in Richtung der Längsachse des Kraftsensor, ohne daß seitliche Kräfte oder Momente wirken. Aus dieser Anforderung ergaben sich die Problemstellungen für die einzelnen Funktionsträger.

Die wohl einfachste Lösung wäre, den Sensor an einem Ende an einer Art Galgen aufzuhängen und am unteren Ende eine Kraft einzuleiten. Dabei ist die Struktur zwar momentanfrei gelagert, aber gegen Kräfte und Momente beim Handhaben vollkommen ungeschützt. Zudem kann der Sensor im hängenden Zustand nicht optisch vermessen werden. Die günstigste Lösung ist deshalb die Festlegung aller Freiheitsgrade mit Ausnahme dessen, in welchem die Zugkraft wirken soll.

Da die Verbindung zwischen Resonatorhalterung und Sensor nicht starr ist und sich alle beteiligten Einzelteile bei Kraftbeaufschlagung dehnen, kommt nur eine wegunabhängige Kraftbeaufschlagung in Frage. Eine Hälfte der Resonatorhalterung muß lose gelagert sein und dieses Loslager darf keine Kraft auffangen. Daher muß eine Linearführung gefunden werden, die sehr reibungsarm läuft. Die Lager dürfen nicht vorgespannt sein, dürfen aber auch kein Spiel haben. Die Führung muß also leicht zu verschieben sein und es sollen keine "Stick-Slip-" Effekte bei Geschwindigkeiten $v \approx 0$ m/s auftreten. Sie soll über dem gesamten Verfahrensweg eine hohe Genauigkeit und Geradheit aufweisen, möglichst klein und kostengünstig sein.

Wälzführungen haben einen geringen Rollreibungskoeffizienten $\mu = 0,0005 \dots 0,005$ [INA91] und sind somit für diese Anwendung geeignet. Gleitführungen scheiden aus, da sie zum einen einen verhältnismäßig hohen Reibwert von $\mu = 0,05 \dots 0,2$ [INA91] besitzen und zum anderen "Stick-Slip-" Effekte verursachen. Die hydrostatischen oder aerostatischen Führungen sind in ihrer Herstellung zu aufwendig.

Zur Auswahl standen eine Führung mit Linearkugellagern und eine rollen- bzw. kugelgelagerte Linearführung. Es wurden beide Möglichkeiten ausgearbeitet. Im Vordergrund standen dabei die Kompensation der Bearbeitungstoleranzen und Fluchtungsfehler. Die Wahl fiel auf einen Einstelltisch mit einem doppelt-kugelgeführten, spielfrei gelagerten Schlitten. [MÜL92]

7.2 Auswahl der Krafteinleitung und Kraftrückführung

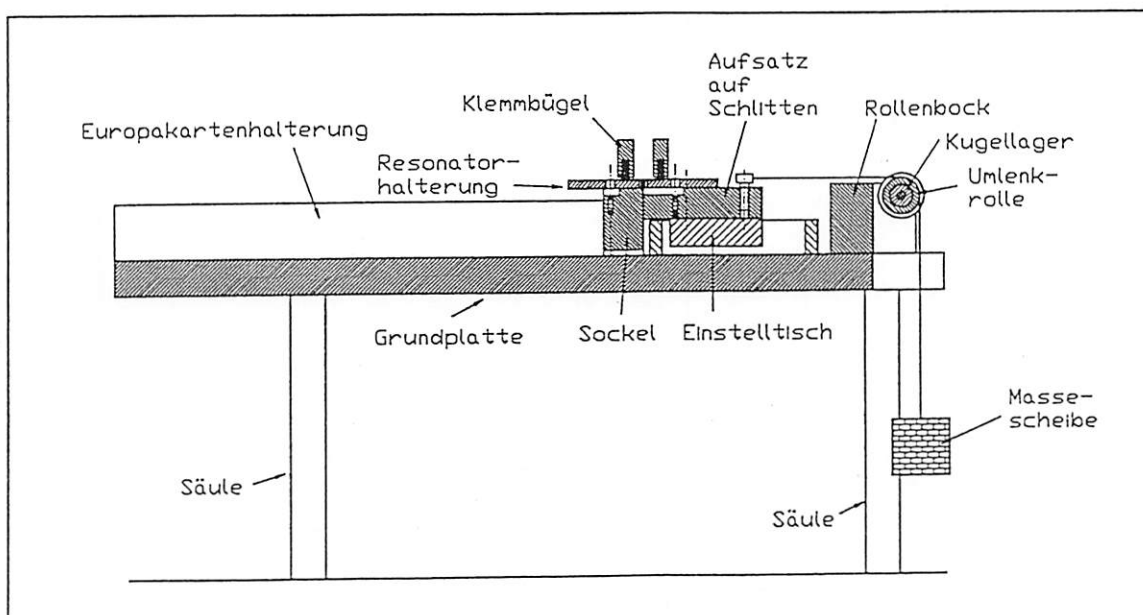
Zur Krafteinleitung und -rückführung standen ebenfalls mehrere Möglichkeiten zur Diskussion. Beispielsweise kann ein kapazitiver oder induktiver Kraftaufnehmer auf einer Linearführung mit Spindel befestigt werden. Durch den Vorschub der Spindel leitet der Kraftaufnehmer eine Kraft in die zu messende Struktur ein und liefert gleichzeitig ein der eingeleiteten Kraft proportionales Signal. Vorteilhaft ist hierbei die kontinuierliche Krafteinleitung und die Möglichkeit zur elektronischen Weiterverarbeitung der Kraftsignale. Von Nachteil sind allerdings die hohen Kosten für Aufnehmer und Auswertelektronik, sowie deren vergleichsweise hohen, sich addierenden Fehler (Linearitätsfehler, Temperaturshift, Schwankungen der Versorgungsspannung).

Wesentlich günstiger ist eine Krafteinleitung über die Gewichtskräfte von Massen. Diese Massen können mit Hilfe einer Analysenwaage sehr genau bestimmt werden, sodaß der Fehler weit unter dem der ersten Lösungsmöglichkeit liegt. Zudem ist diese Version wesentlich preiswerter.

7.3 Lösungsbeschreibung

In Bild 7.1 ist die Vorrichtung dargestellt.

Bild 7.1: Seitenansicht der Vorrichtung zur Krafteinleitung



Die Vorrichtung besteht aus einer Aluminium-Grundplatte, die auf vier Säulen montiert wird. Die eine Hälfte der Resonatorhalterung wird in die Zylinderstifte im Sockel eingehängt die andere Hälfte in den Aufsatz auf dem leicht beweglichen Schlitten des Einstelltisches eingesetzt. Die Gewichtskraft der Massenscheiben wirkt über die kugelgelagerte Umlenkrolle auf den Schlitten und damit auf den Sensor zwischen den beiden Hälften der Resonatorhalterung. Die Klemmbügel dienen zur Fixierung der Sensoren, an denen nicht die gesamte Oberfläche zur elektrischen Kontaktierung benötigt wird und somit eine Klemmung erlauben (siehe Kapitel 6.2).

Desweiteren sind auf der Grundplatte zwei Europakartenhalterungen befestigt, in welche die Oszillatorschaltung zur geregelten elektrothermischen Anregung geschoben werden kann.

Die Toleranzen des Sockels und des Schlittenaufsatzes sind so gewählt, daß deren Seitenflächen und die Auflageflächen der Resonatorhalterung bündig sind. Der Einstelltisch, der Schlittenaufsatz und der Sockel werden leicht angeschraubt, ausgerichtet, festgeschraubt und im verschraubten Zustand verstiftet. Die Einzelteile wurden in der Werkstatt des Hahn-Schickard-Institutes so präzise gefertigt, daß die besagten Flächen nachweisbar bündig abschließen. Die beiden Hälften der Resonatorhalterung liegen ohne Versatz auf, eine lineare Krafteinleitung ohne zusätzliche Momente oder seitliche Kräfte ist somit gewährleistet.

Der Einstelltisch unterliegt keiner nennenswerten Belastung in vertikaler Richtung. Auch wirken auf ihn keine Momente oder Kräfte senkrecht zur Bewegungsrichtung. Daher mußte diese Führung nicht hinsichtlich einer Überschreitung der im Datenblatt vorgegebenen Grenzwerte berechnet werden.

Das Kugellager der Umlenkrolle wurde für den quasistatisch belasteten Fall dimensioniert. Für eine maximale Belastung von $F_G = 50 \text{ N}$ und hohen Anforderungen an die Genauigkeit wurde nach [KRA89] eine Berechnung durchgeführt. Bei dem ausgewählten Lager ergab sich ein Sicherheitsfaktor von $s = 1,9$.

Die Stückliste, die Gesamtansicht sowie alle Einzelteilzeichnungen der Vorrichtung sind im Anhang in Kapitel 11.2 und 11.3 zu finden.

8. Erprobung und Inbetriebnahme des optischen Meßplatzes

8.1 Charakterisierung der Anregung

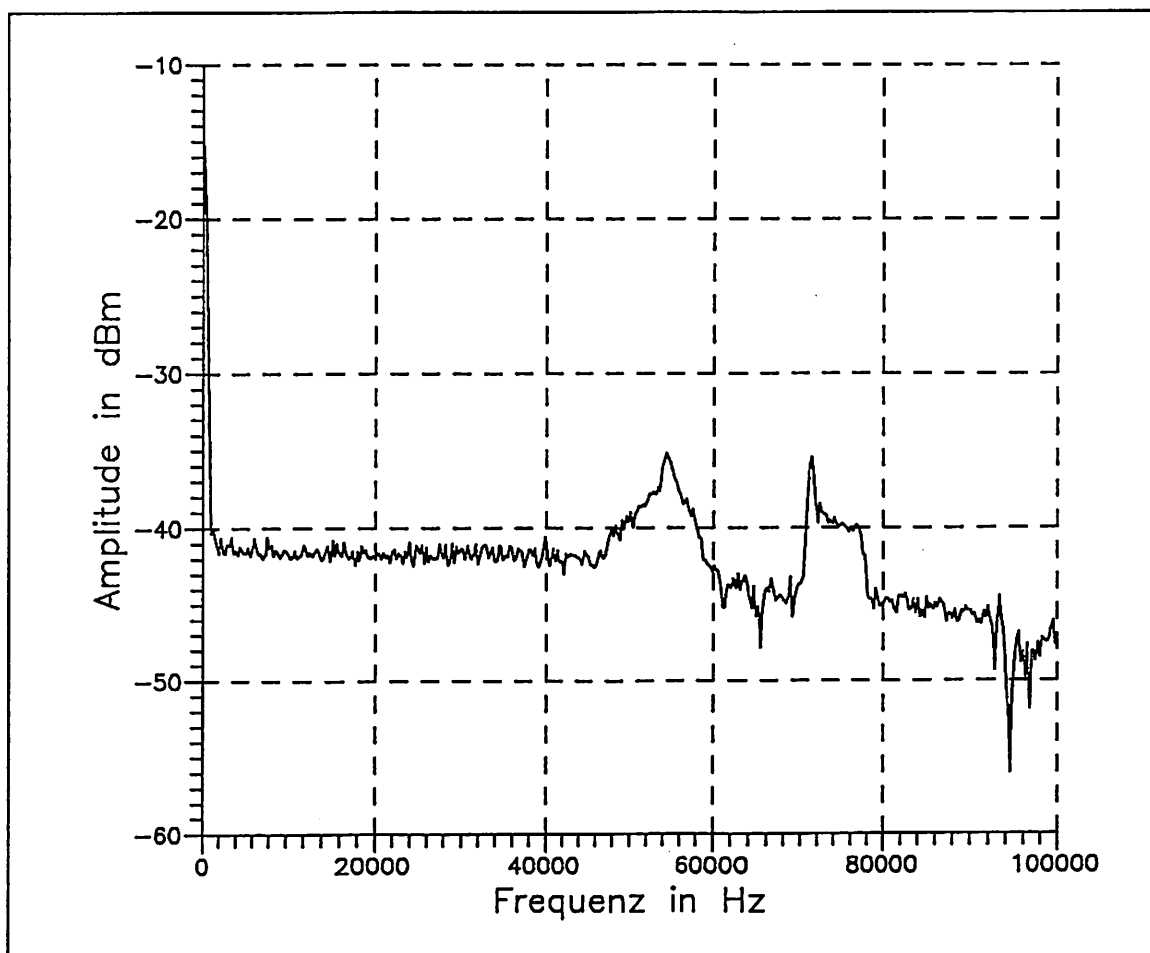
Um die mikromechanischen Strukturen zu charakterisieren, müssen sie periodisch erregt werden. Dafür stehen folgende Verfahren zur Verfügung:

- * passive Anregung mit einer Piezokeramik
- * elektrothermische Anregung

8.1.1 Passive Anregung

Um die Sensoren passiv anzuregen, werden die in Messinghalterungen eingeklebten Sensoren auf Piezokeramiken aufgelegt. Diese Art der Anregung wurde in [BRA92] untersucht und als eine geeignete Anregungsmethode bewertet.

Bild 8.1: Amplitudenspektrum einer PZT-Piezokeramik

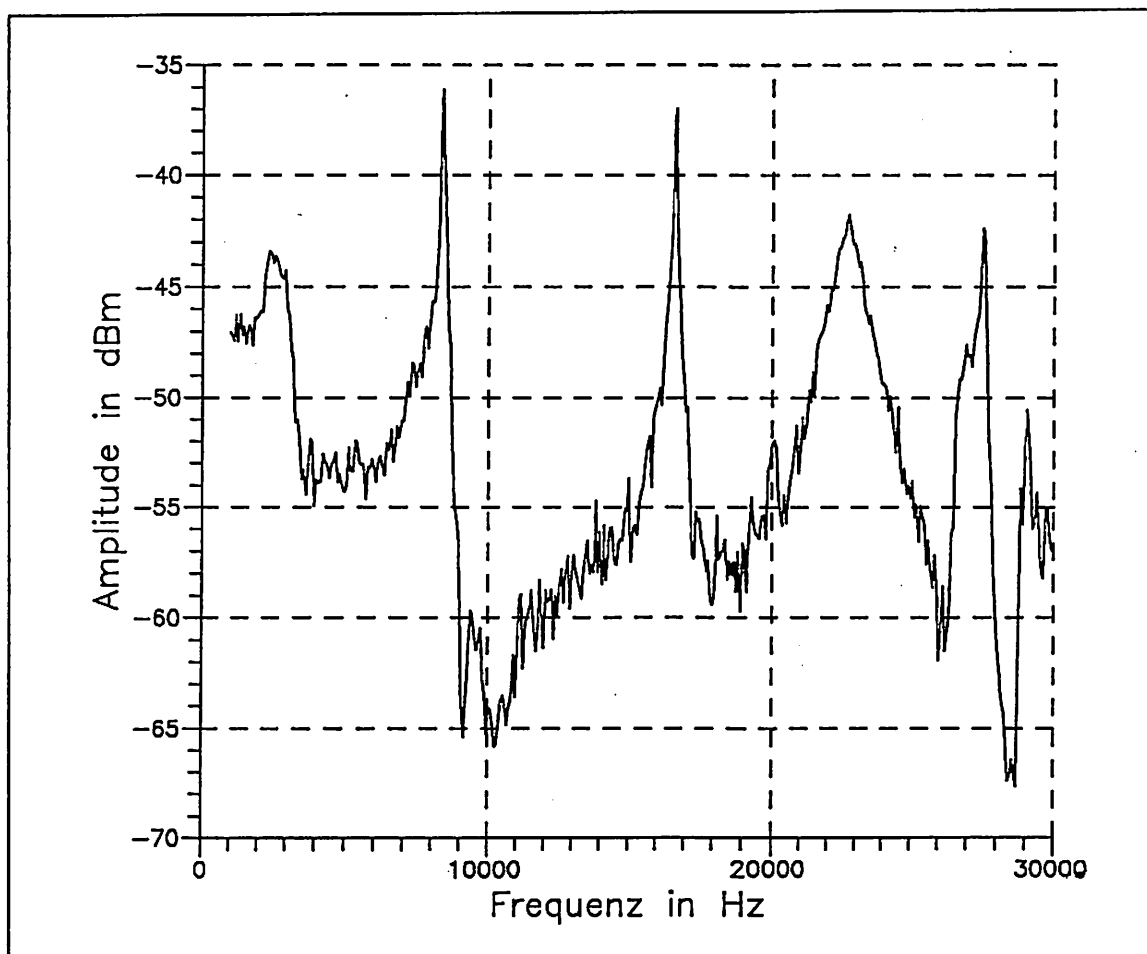


Die Piezokeramiken werden über die interne Quelle des Spektrum-Analysators und einen nachgeschalteten Verstärker mit einem in seiner Frequenz kontinuierlich ansteigenden Sinussignal angesteuert.

Das Bild 8.1 zeigt ein Spektrum, angeregt mit der Spannung, mit der die Piezokeramiken schließlich auch bei den einzelnen Meßreihen betrieben wurde. Erste Unregelmäßigkeiten treten erst bei Frequenzen $f > 50$ kHz auf. Der Peak bei $f = 0$ Hz wird durch den internen Oszillator des Spektrum-Analysators verursacht, ist also rein imaginär.

Die Piezokeramik überträgt ihre Schwingungen über Körperschall auf die Halterung. Diese Halterung besitzt stark ausgeprägte Resonanzfrequenzen wie in Bild 8.2 zu sehen ist.

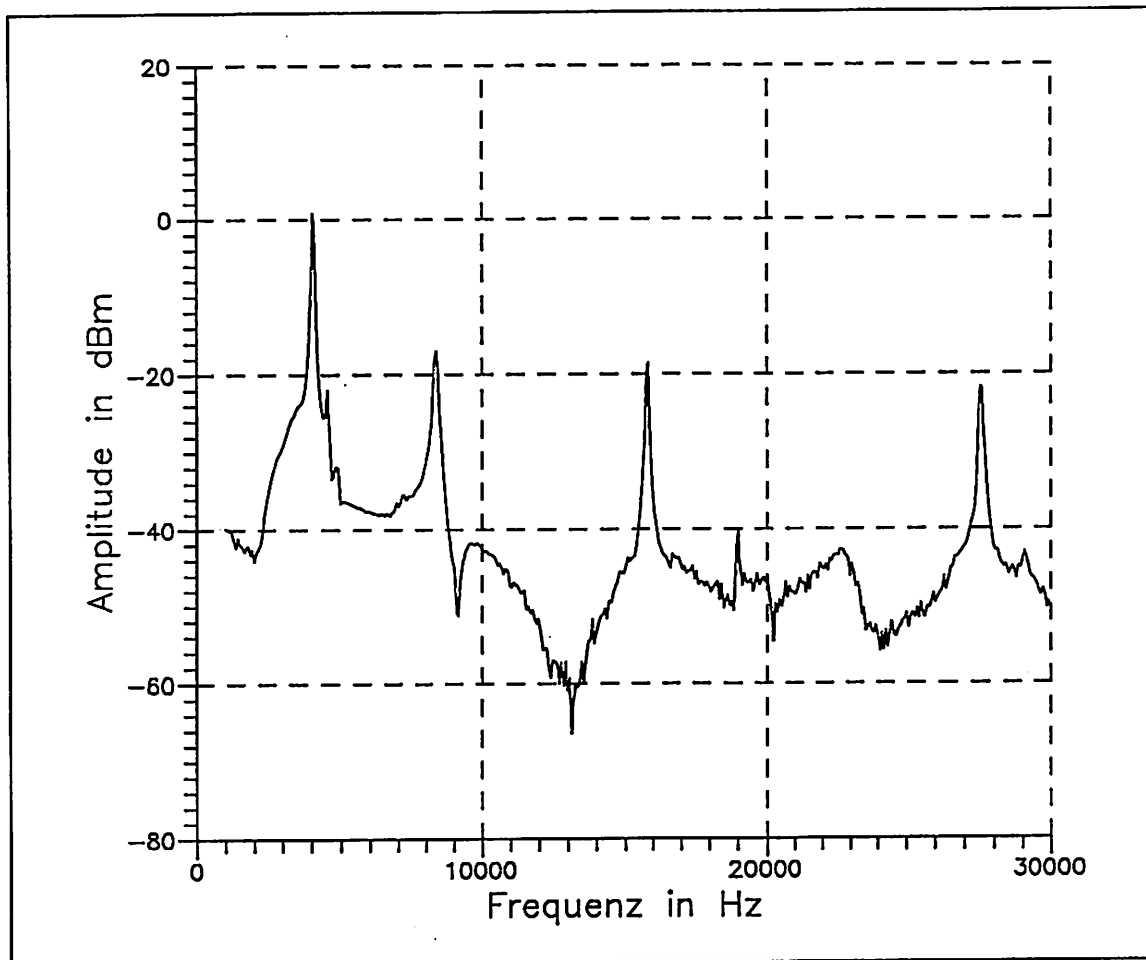
Bild 8.2: Amplitudenspektrum der Resonatorhalterung



Nach [BRA92] wurde dieses Spektrum dort aufgenommen, wo der Sensor auf der Halterung befestigt ist, also an den Einspannungsstellen, an welchen die Erregerkraft den Balken zum Schwingen anregt. Dieses Spektrum trägt daher die Bezeichnung Anregungsspektrum.

Das Spektrum, das in der Mitte des Balkens aufgenommen wurde, zeigt nun den eigentlichen Frequenzgang des Schwingbalkens überlagert mit dem Frequenzgang der Anregung, wie in Bild 8.3a zu sehen ist.

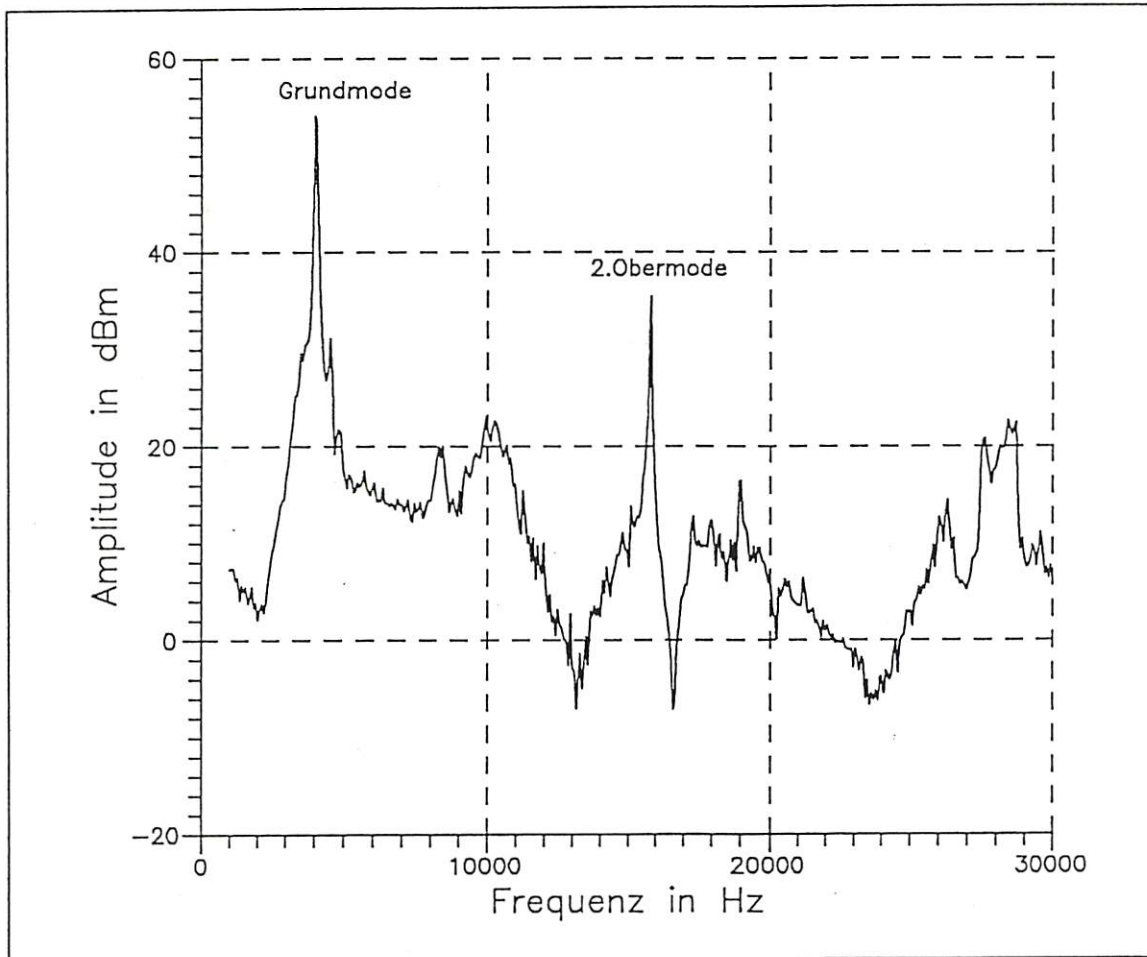
Bild 8.3a: Amplitudenspektrum in der Mitte des Schwingbalkens aufgenommen
nicht normiert



In [BRA92] werden verschiedene Modelle des Zusammenhangs von Anregungs- und Schwingerspektrum beschrieben. Um den störenden Einfluß der Anregung zu kompensieren, muß demnach das Spektrum des Schwingbalkens durch das Spektrum der Anregung (siehe Bild 8.2) dividiert werden, d.h. auf das Anregungsspektrum normiert werden (siehe Bild 8.3b).

Bild 8.3b: Amplitudenspektrum in der Mitte des Schwingbalkens aufgenommen
auf das Anregungsspektrum normiert

dicke = 50 µ



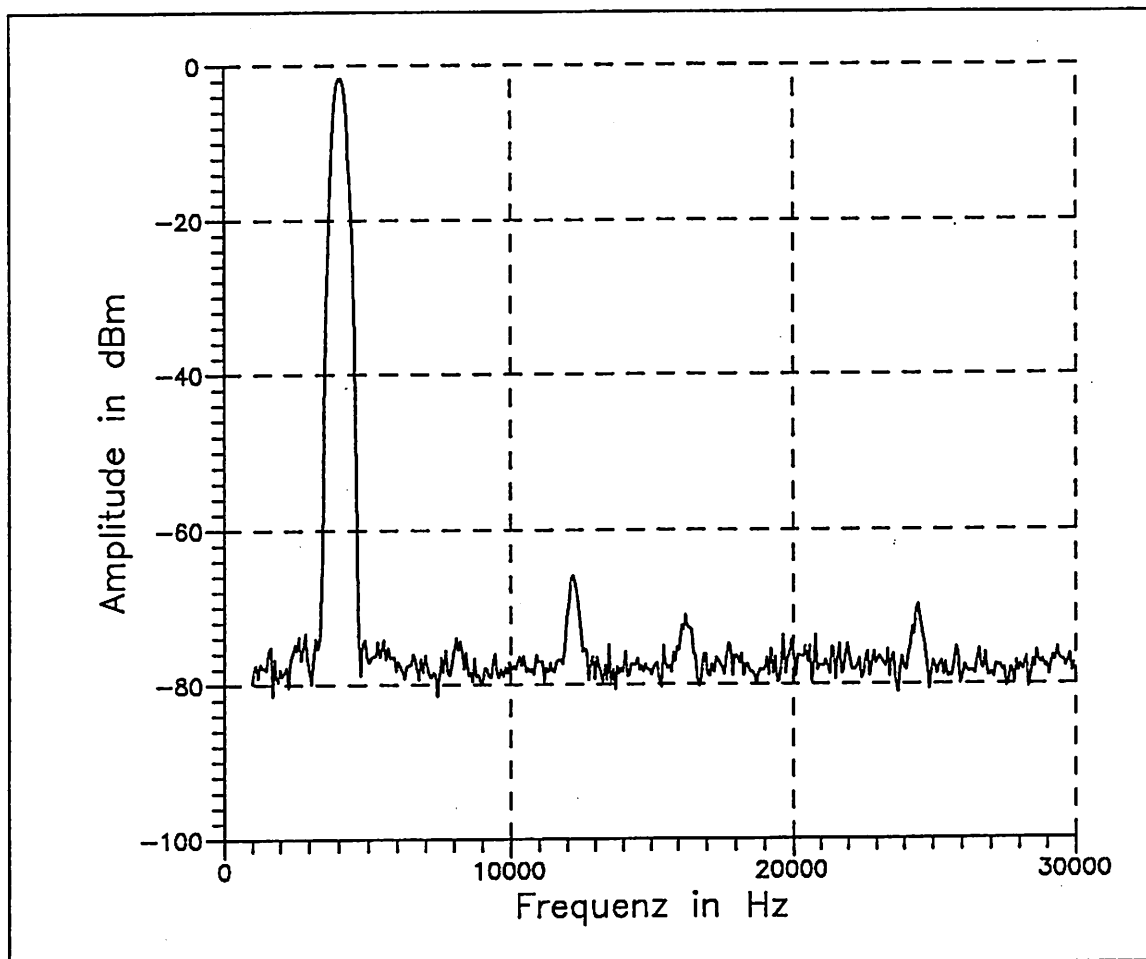
In diesem normierten Spektrum treten zwei Resonanz-Peaks deutlich hervor. Der Grundmode liegt bei $f_0 = 4,12 \text{ kHz}$, ein Obermode liegt bei etwa $f = 15,8 \text{ kHz}$, gemessen bei einer Filterbandbreite (resolution-bandwidth) von $\Delta f = 290 \text{ Hz}$. Um welchen Obermode es sich handelt muß eine Vermessung des Amplitudenprofils zeigen.

An passiv angeregten Sensoren wurden mehrere Meßreihen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab.8.2 festgehalten.

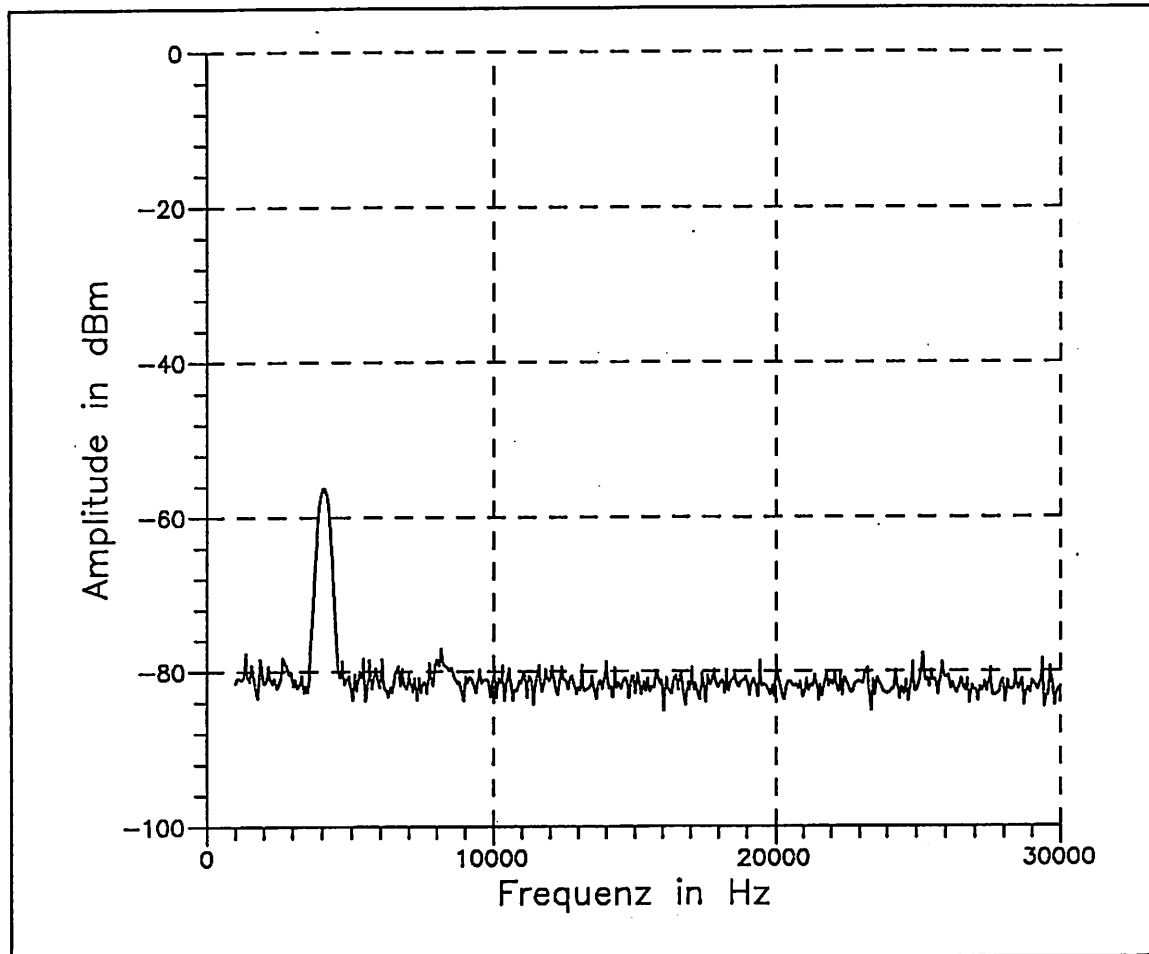
Der Sensor kann auch mit einer festen Frequenz aus dem Frequenzgenerator angesteuert werden. Das Sinussignal des Frequenzgenerators ist jedoch nicht ideal, sondern hat Oberwellen, wie in Bild 8.4a zu sehen ist.

Bild 8.4: Amplitudenspektrum des Frequenzgenerators bei $f_0 = 4,19 \text{ kHz}$

a.) bei $AC_{pp} = 0,5 \text{ V}$ und $DC_{Offset} = 0 \text{ V}$



Das Signal hat in dieser Einstellung eine Amplitude von $n = 80 \text{ dBm}$. Versuche zur Unterdrückung dieser Oberwellen durch Verringern der Spitze-Spitze-Spannung senken die Anregungsamplitude zu stark ab. Ein gleichzeitiges Anheben der Offsetspannung des Frequenzgenerators kann die angeregte Amplitude zwar verstärken, sie liegt aber dennoch bei nur $n = 25 \text{ dBm}$ (siehe Bild 8.4b). Falls auf ein "sauberes" Spektrum Wert gelegt wird, muß ein geeigneter Tiefpaß-Filter zwischen Frequenzgenerator und Audio-Verstärker geschaltet werden.

Bild 8.4: Amplitudenspektrum des Frequenzgenerators bei $f_0 = 4,19 \text{ kHz}$ b.) bei $AC_{pp} = 0,2 \text{ V}$ und $DC_{Offset} = 0,5 \text{ V}$ 

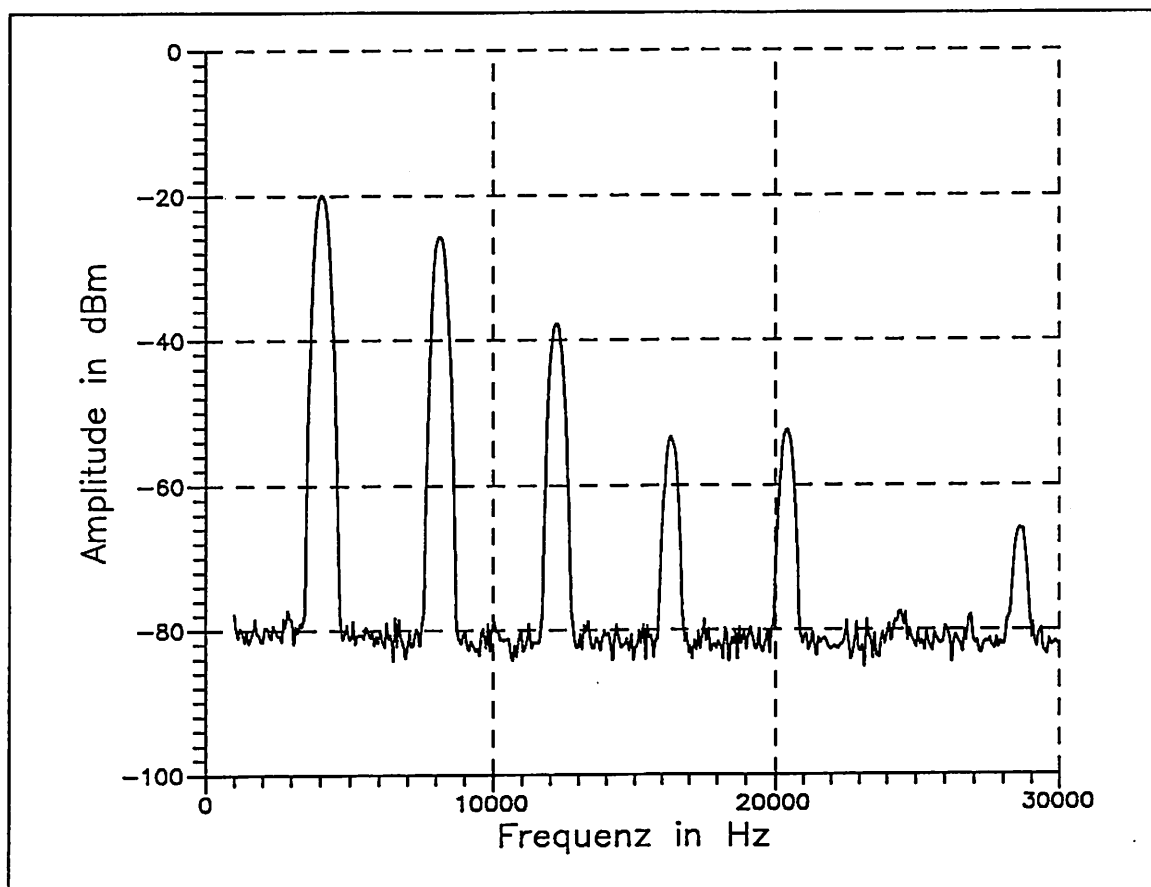
Der Frequenzgang des Verstärkers hat in diesem Frequenzbereich eine quasikonstante Anregung.

Die Amplitude fällt im Bereich von $f = 1 \text{ kHz}$ bis $f = 30 \text{ kHz}$ nur um $n = 3 \text{ dBm}$ ab.

8.1.2 Elektrothermische Anregung

Das Prinzip der elektrothermischen Anregung wurde bereits in Kapitel 3.2 beschrieben. Der Sensor wurde über die interne Quelle des SpektrumAnalysators und über den nachgeschalteten Audio-Verstärker angeregt. Da die Quelle ein Sinussignal ausgibt, sieht der Sensor pro Periode zwei Erregerimpulse, d.h. er schwingt mit der doppelten Frequenz. Da die Erregerfrequenz des Spektrum-Analysators und die Mittenfrequenz des Filters immer synchron laufen, würde der Spektrum-Analysator nie ein Signal detektieren. Aus diesem Grund wurde durch Zwischenschalten einer Diode eine Halbwelle des Speisesignals abgetrennt. Dies hat jedoch zur Folge, daß das Oberwellenspektrum stark zunimmt (Bild 8.5).

Bild 8.5: Amplitudenspektrum eines einweg-gleichgerichteten Sinussignals



Da die Mittenfrequenz des Filters mit dem Grundmode des Anregungsspektrums identisch ist, hat dies jedoch keinen Einfluß. Die Oberwellen liegen außerhalb der Filterbandbreite und beeinflussen das Spektrum nicht.

8.2 Bestimmung der Meßpunktgröße

Das Laservibrometer ist mit den Mini-Sensorköpfen OFV 100 ausgestattet, welche eine Linse von $s = 20$ mm Brennweite und, abhängig von der Meßentfernung, eine Empfangsapertur von $d = 4$ - 5 mm Durchmesser besitzen. Dieser Kopf ist ausgelegt für Messungen bis $L = 200$ mm Abstand.

Die Meßpunktgröße und Tiefenschärfe können nach [POL91] bei verschiedenen Meßabständen nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{Meßpunktgröße} = \frac{4 \cdot \lambda \cdot L}{\pi \cdot d}$$

$$\text{Tiefenschärfe} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L^2}{d^2}$$

wobei: Meßabstand : L
 Aperturdurchmesser : $d = 4$ mm
 Wellenlänge des Lasers : $\lambda = 632,8$ nm

Anhand dieser Angaben konnten die Werte für bei unserer Anwendung typische Entfernungen bestimmt werden. (siehe Tab.8.1)

Tab.8.1: Theoretische Werte für Meßpunktgröße und Tiefenschärfe unter Annahme spiegelnder Oberflächen

Meßabstand L	Meßpunktgröße	Tiefenschärfe
200 mm	40 μ m	63 mm
100 mm	20 μ m	32 mm
50 mm	10 μ m	16 mm
30 mm	6 μ m	9,5 mm
20 mm	4 μ m	6,3 mm

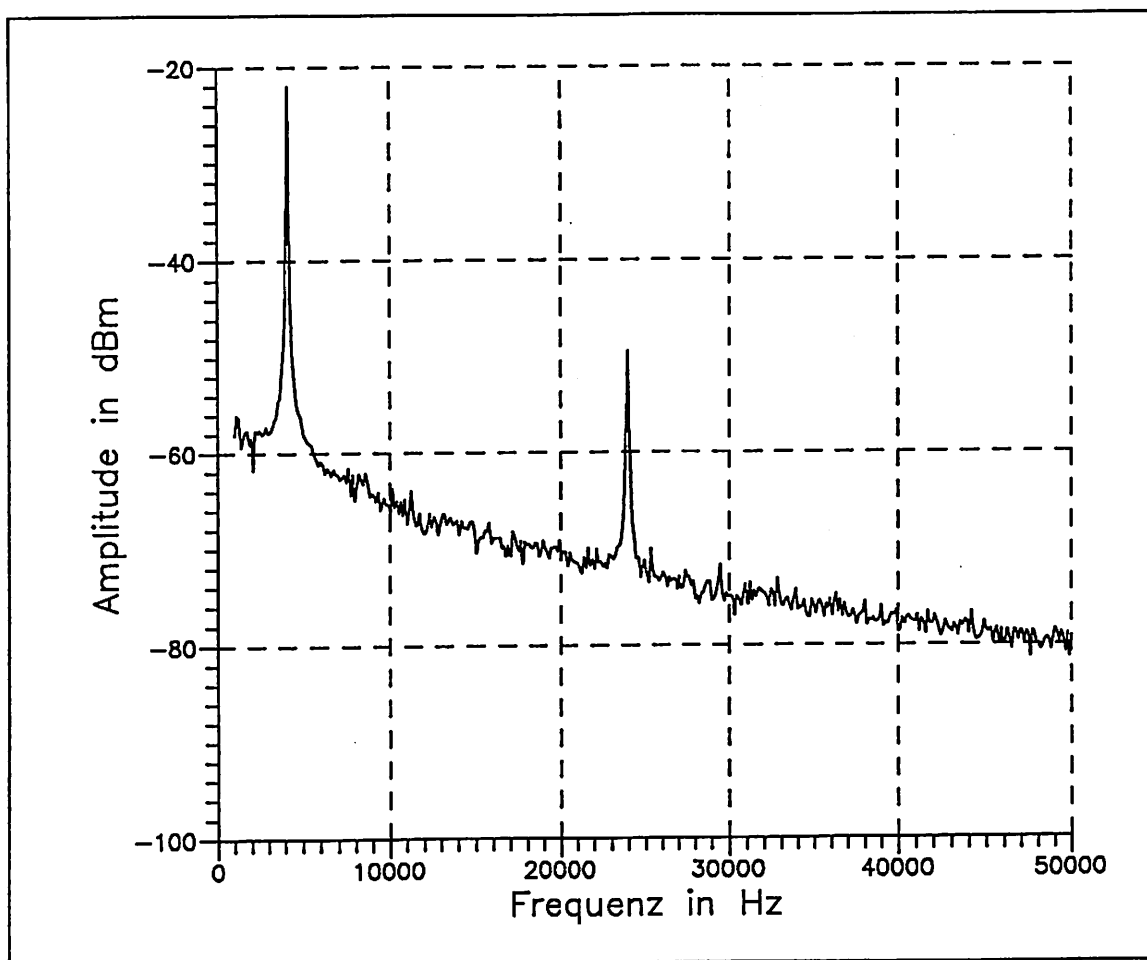
Ein Meßabstand von $L = 50$ - 100 mm hat sich als geeignet erwiesen. Bei korrekter Fokussierung wird ein ausreichend kleiner Meßpunktdurchmesser erzeugt und der Justageaufwand bis die rückreflektierte Intensität erreicht ist, ist im Vergleich zu größeren Meßabständen gering. Bei einer kürzeren Entfernung muß die Kollimatorlinse zur Fokussierung sehr weit aus ihrer Fassung herausgedreht werden. Dann besteht die Gefahr, daß sie leicht aus dem Gehäuse auf das Meßobjekt fallen kann.

8.3 Charakterisierung der Kraftsensoren

Gemäß der im Geräteplan spezifizierten Anordnung wird die mikromechanische Struktur vermessen. Der beidseitig eingespannte Biegebalken wird zum Schwingen angeregt, seine Bewegungen werden vom Laservibrometer erfaßt und vom Spektrum-Analysator ausgewertet. Das Resultat ist die graphische Darstellung der Amplitudenverteilung in Abhängigkeit der Frequenz, oder Amplitudenspektrum (siehe Bild 8.6).

Die Meßwerte sollen mit den Ergebnissen aus den analytischen Bestimmungsgleichungen und den FEM-Berechnungen verglichen und bewertet werden.

Bild 8.6: Amplitudenspektrum eines Kraftsensors bei thermischer Anregung



Aus dem Amplitudenspektrum können die einzelnen Resonanzfrequenzen f_i des Sensors ermittelt werden. Jedem dieser Schwingungsanteile ist eine Energie zuzuordnen. Der Energiegehalt ist proportional zur Auslenkung des Schwingers. Daher ist es wichtig, auch die Amplituden dieses Spektrums auszuwerten. Die graphische Darstellung zeigt eigentlich eine Effektivspannung oder ein Leistungsverhältnis an. Für die Amplitudenbestimmung ist die lineare Darstellung der Effektivspannung über der Frequenz zu be-

vorzuziehen, weil direkt die Umrechnung der Spannungswerte in Amplitudenwerte erfolgen kann. Man ermittelt die Differenz zwischen Amplitudenmaximum A_{dyn} und dem Rauschgrund A_{stat} und multipliziert diese Spannung mit dem am Laservibrometer eingestellten Meßbereich. Dieses Ergebnis ist schließlich noch mit einem Faktor $\sqrt{2}$ zu multiplizieren, um den Effektivwert der Spannung U_{eff} auf den Scheitelwert \hat{U} umzurechnen:

$$\hat{U} = U_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2}$$

Aus den Amplitudenspektren kann nun sowohl in der linearen als auch in der logarithmischen Darstellung die Güte Q der Schwingung ermittelt werden. Die Güte der Schwingung ist ein Maß für die Dämpfung. Sie charakterisiert die Resonanzeigenschaften eines schwingenden System und wird nach [LEN89] definiert als:

$$Q := \frac{\omega_0 \cdot E_m}{P} = \frac{f_0}{\Delta f_Q}$$

mit: E_m : Energie des Systems im Resonanzfall

P : Verlustleistung

wobei in:

linearer Darstellung: Halbwertsbreite Δf_Q bei: $y_Q = A_{\text{min}} + (A_{\text{max}} - A_{\text{min}}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$

logarithmischer Darstellung: Halbwertsbreite Δf_Q bei: $y_Q = A_{\text{max}} - 3\text{dBm}$

Die Amplituden in der linearen Darstellung sind Effektivspannungen U_{eff} angegeben in V_{rms} (Volt root mean square), die Amplituden der logarithmischen Darstellung sind Leistungsverhältnisse n angegeben in dBm. Die beiden Meßbereiche stehen in folgendem Zusammenhang zueinander [PER91]:

$$n = 10 \log \left(\frac{U_{\text{eff}}^2}{R_M} \cdot \frac{1}{P_{\text{ref}}} \right)$$

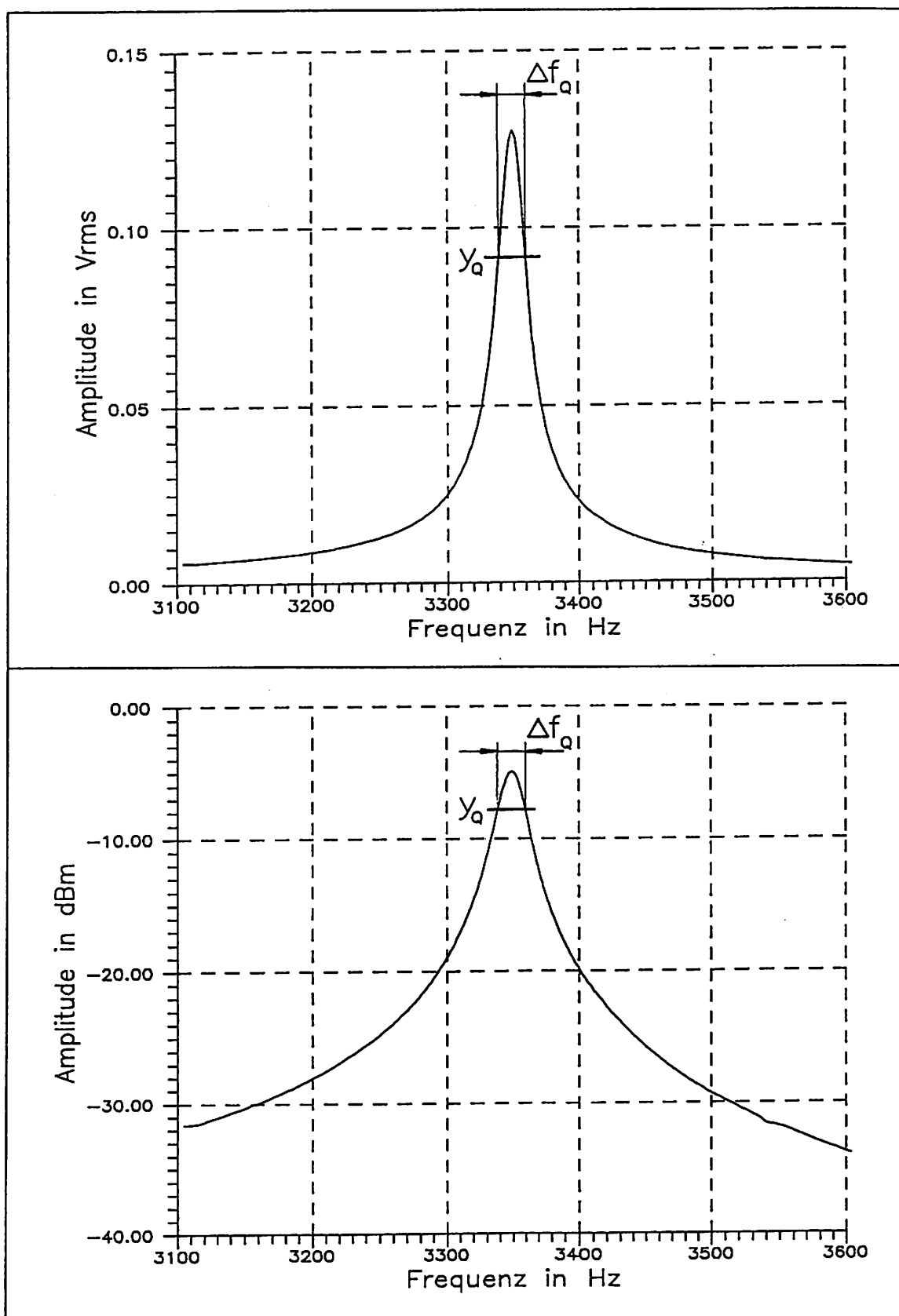
wobei: $R_M = 50 \Omega$: Meßwiderstand

$P_{\text{ref}} = 1 \text{ mW}$: Referenzleistung

Bild 8.7: Bestimmung der Schwingungsgüten an Amplituden

a.) in linearer Darstellung

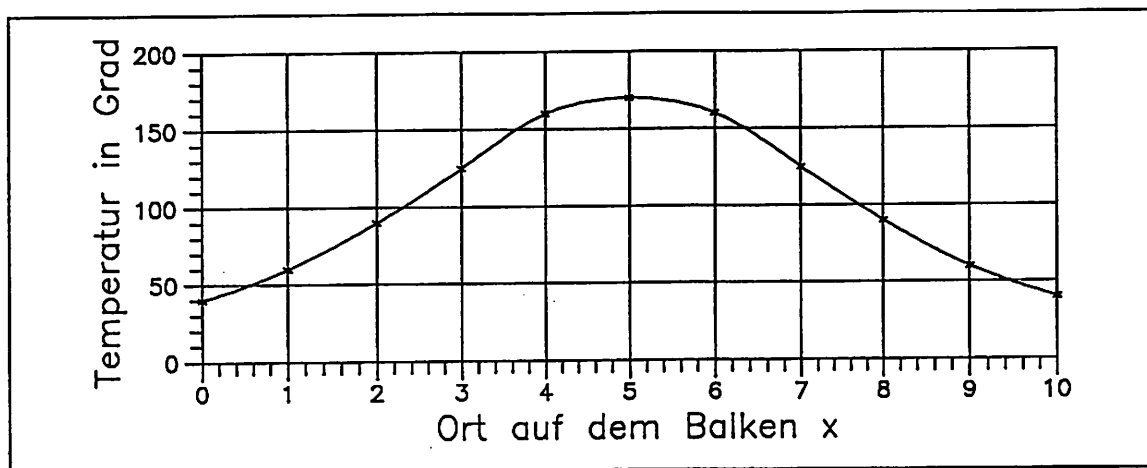
b.) in logarithmischer Darstellung



In Tab.8.2 sind die Resonanzfrequenzen, Güten und Amplituden mehrerer Meßreihen, sowie zum Vergleich die analytisch ermittelten Werte eingetragen.

Zur Berechnung der Resonanzfrequenzen wurde Gleichung (4) aus Kapitel 2.1 verwendet. In Kapitel 2.3 ist die Temperaturempfindlichkeit von beschichteten Silizium-Balkenstrukturen behandelt worden. Danach hat ein Siliziumbalken mit einer 700 nm dicken Aluminiumschicht einen Temperaturkoeffizienten von $TK_f = -1200 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$. Bei einer Thermographiemessung wurde ein Maximum von ca. $T_{\text{max}} = 170^\circ\text{C}$ im Bereich der in Balkenmitte liegenden DMS-Brücke bestimmt, wobei die Umgebungsbedingungen nicht angegeben wurden. Die Temperaturen nehmen nach außen hin ab.

Bild 8.8: Angenommener Temperaturverlauf im Sensor



Es wird angenommen, daß sich die theoretische Resonanzfrequenz durch die Temperatur um $\Delta f = TK_f \cdot \Delta T$ verringert. Bei der Angabe $\Delta T = 100 \text{ K}$ handelt es sich um den Mittelwert einer angenommenen Temperaturverteilung im thermisch angeregten Sensor, wie in Bild 8.8 zu sehen. Daraus ergeben sich die temperaturkorrigierten Resonanzfrequenzen $f_{T,\text{theor}} = f_{\text{theor}} + \Delta f$.

Dies soll nur qualitativ die theoretisch möglichen Resonanzfrequenzverschiebungen darstellen. In Wirklichkeit handelt es sich um ein weitaus komplexeres Schichtsystem als angenommen. Die tatsächliche Temperaturverteilung ist stark abhängig von der Einspannung und den Umgebungsbedingungen.

Tab.8.2: Ergebnisse einer Meßreihe an Sensoren der Fa. GMS mbH, St.Georgen

dreifache Heizung

f_{theor} : theoretische Frequenz der Si-Balken bei einer ermittelten Balkendicke $t_{\text{Si}} = (34 \pm 3) \mu\text{m}$
 $f_{\text{T, theor}}$: temperaturkorrigierte theoretische Frequenz
 f_{passiv} : gemessene Frequenz bei passiver Anregung mit Piezokeramik
 f_{therm} : gemessene Frequenz bei thermischer Anregung
 Q_{therm} : Güte bei thermischer Anregung
 A_{mitte} : Amplitude auf der Balkenmitte

Balkenlänge l [mm]	reines Si f_{theor} [kHz]	Schichtsystem mit 700nm Alu bei $\Delta T=100\text{K}$ $f_{\text{T, theor}}$ [kHz]	mit Piezo- keramik angeregt f_{passiv} [kHz]	Nur Heizwider- stände angeregt f_{therm} [kHz]	Güte Q_{therm}	Amplitude A_{mitte} [nm]	Bemerkungen
				13,96	388	50	
3	33,14	29,16		19,10	562	50	
				18,42	575	30	
			5,6	6,36	159	4	
6	8,28	7,29	6,8	6,13	204	14	
			8,2	16,12	537	2	Balkenbruch
			3,9	5,04	240	115	
8	4,66	4,10	3,1	5,27	251	118	
			4,8	6,80	179	37	1 Heizwiderst
			4,1	6,58	190	18	
10	2,98	2,62	4,1	6,95	211	8	1 Heizwiderst
			4,5	6,00	116	4	1 Heizwiderst

Die Meßergebnisse zeigen zum Teil erhebliche Abweichungen von den analytisch berechneten Werten. Das kann zum einen an den getroffenen Idealisierungen in den Bestimmungsgleichungen (Vernachlässigung des Schichtsystems), zum anderen an den Temperatur- und Strömungseinflüssen sowie den Dämpfungseinflüssen der Luft liegen. Auffällig ist, daß bei den Schwingern mit der Balkenlänge $l = 10 \text{ mm}$ höhere Resonanzfrequenzen gemessen wurden als bei den Strukturen mit $l = 8 \text{ mm}$. Die Ursache hierfür könnten innere Verspannungen sein, die beim Aushärten des Klebstoffes in den hier verwendeten geschlossenen 3-fach-Resonatorhalterungen (siehe Bild 6.2) in unterschiedlich starkem Maß auf die Sensoren wirken.

In Tab.8.3 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der in Tab.8.2 eingetragenen Ergebnisse enthalten.

Tab.8.3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisse aus Tab.8.2

f_{passiv} : Frequenz bei passiver Anregung mit Piezokeramik
 f_{therm} : Frequenz bei thermischer Anregung
 Q_{therm} : Güte bei thermischer Anregung
 A_{mitte} : Amplitude auf der Balkenmitte

Balkenlänge $l \text{ [mm]}$	mit Piezokeramik angeregt $f_{\text{passiv}} \text{ [kHz]}$	Nur Heizwiderstände angeregt $f_{\text{therm}} \text{ [kHz]}$	Güte Q_{therm}	Amplitude $A_{\text{mitte}} \text{ [nm]}$	Bemerkungen
3		$17,16 \pm 2,28$	508 ± 85	$43 \pm 9,4$	
6	$6,87 \pm 1,06$	$6,25 \pm 0,12$	300 ± 170	$6,7 \pm 5,2$	
8	$3,93 \pm 0,69$ <i>6,852</i>	$5,70 \pm 0,78$	223 ± 32	$90 \pm 37,5$	
10	$4,22 \pm 0,20$ <i>4,385</i>	$6,51 \pm 0,39$	172 ± 41	$10 \pm 5,9$	1 Heizwiderst

analyt.

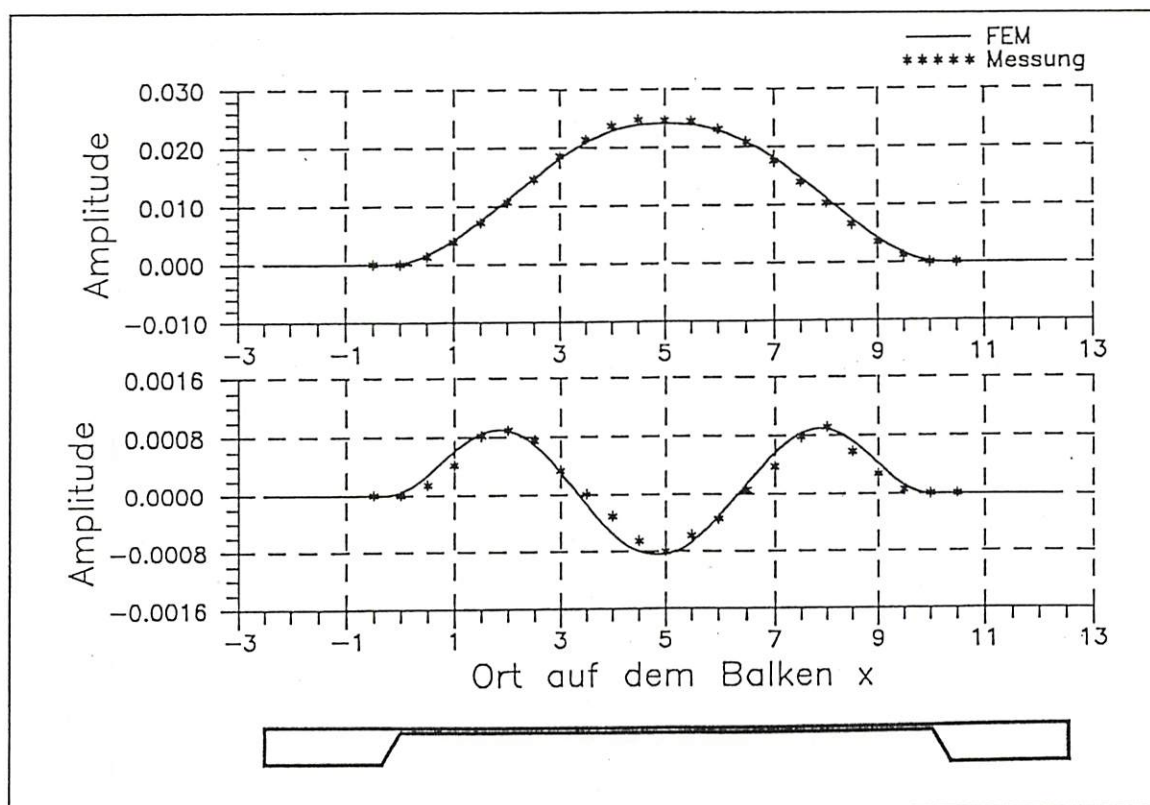
Dicke $\approx 50,4 \mu\text{m}$

8.4 Experimentelle Modalanalyse

Die Eigenschwingungsformen (Moden) eines schwingenden Balkens lassen sich ermitteln, indem an mehreren Punkten entlang des Balkens Amplitudenspektren aufgenommen und die Amplituden der einzelnen Eigenschwingungen in Abhängigkeit des Meßortes auf dem Balken aufgetragen werden (siehe Bild 8.9 unten). Dieses Verfahren nennt man experimentelle Modalanalyse.

Durchgeführt wurde diese Messung an einem Silizium-Kraftsensor der Firma GMS mbH, St.Georgen. Die Balkenlänge betrug $l = 10 \text{ mm}$. Insgesamt wurden entlang dem Balken 23 Messungen mit einer Schrittweite $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$ vorgenommen. Da das Laservibrometer nur die Beträge der Schwingungsamplituden aber nicht die Phaseninformation detektieren kann, muß bei der graphischen Darstellung das Vorzeichen der Werte für den mittleren Schwingungsbauch invertiert werden, der mittlere Peak wird dadurch umgeklappt. Der in eine Messingresonatorhalterung eingeklebte Sensor wurde elektrothermisch angeregt. Die Amplitudenmaxima aller Messungen wurden über der Ortsachse aufgetragen und ergaben so die graphische Darstellung der Eigenschwingungsform.

Bild 8.9: Experimentell ermittelte Eigenschwingungsformen des Schwingbalkens im Vergleich mit FEM-Berechnungen



$l = 10 \text{ mm}$
 $f_0 = 50 \mu\text{m}$ } getrennte Resonatorhalterung.

Auf dem Bild 8.9 sind der Grundmode f_0 und der zweite Obermode f_2 zu erkennen. Der erste Obermode wird nicht angeregt. Dies ist damit zu erklären, daß die Heizwiderstandsschichten an beiden Seiten der Einspannung synchron bestromt werden und sich daher auch synchron ausdehnen. Der Balken wird an beiden Einspannungsseiten gleichzeitig nach unten gedrückt. Die Amplitude des Grundmodes beträgt bei dieser Verstärkereinstellung $A_{\text{mitte}} = 70 \text{ nm}$. Die Amplitude des zweiten Obermodes beträgt bei gleicher Verstärkereinstellung jedoch wesentlich geringerer aufgenommener Leistung $A_{\text{mitte}} = 2 \text{ nm}$.

Zum Vergleich dazu sind in Bild 8.10 die zugehörigen Modenbilder dargestellt, die mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet wurden.

Bild 8.10: Mit FEM berechnete Eigenschwingungsformen des Balkens

a.) 3D-Darstellung des Grundmodes

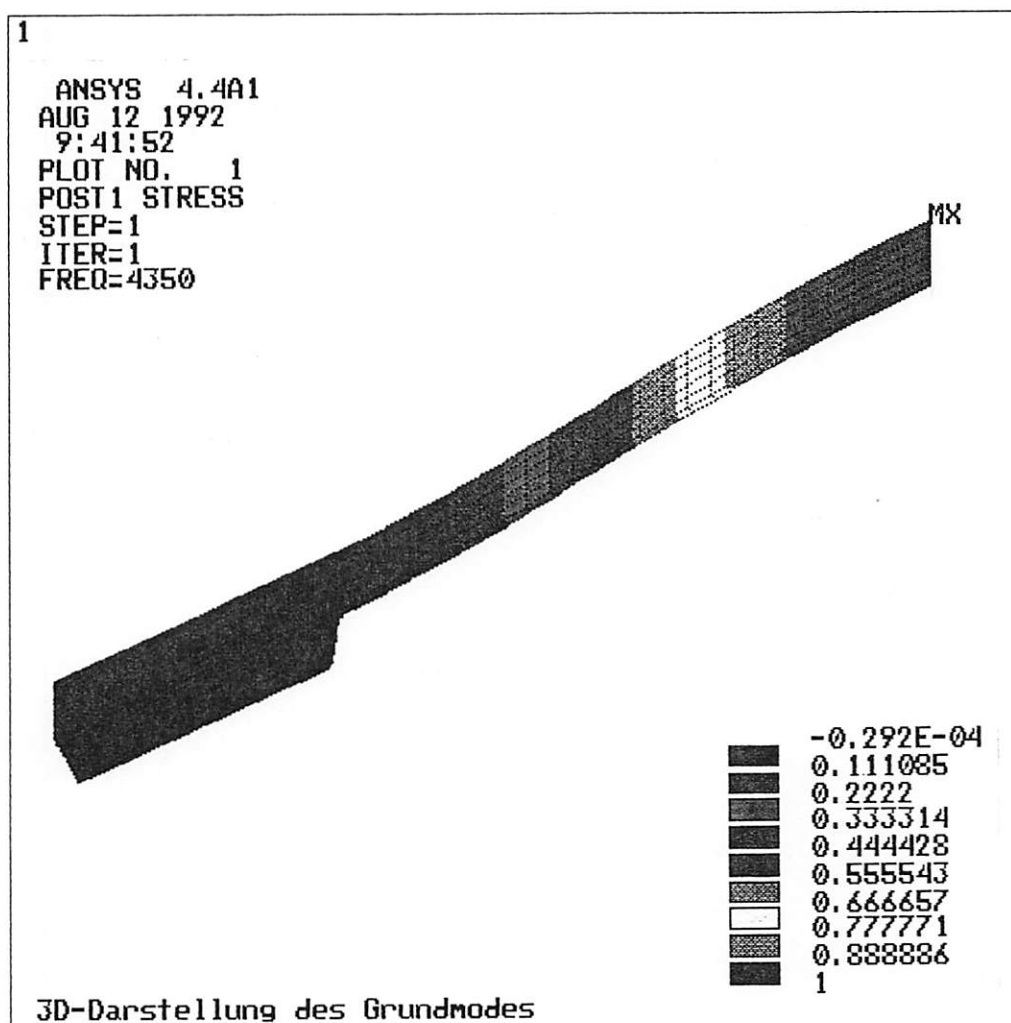
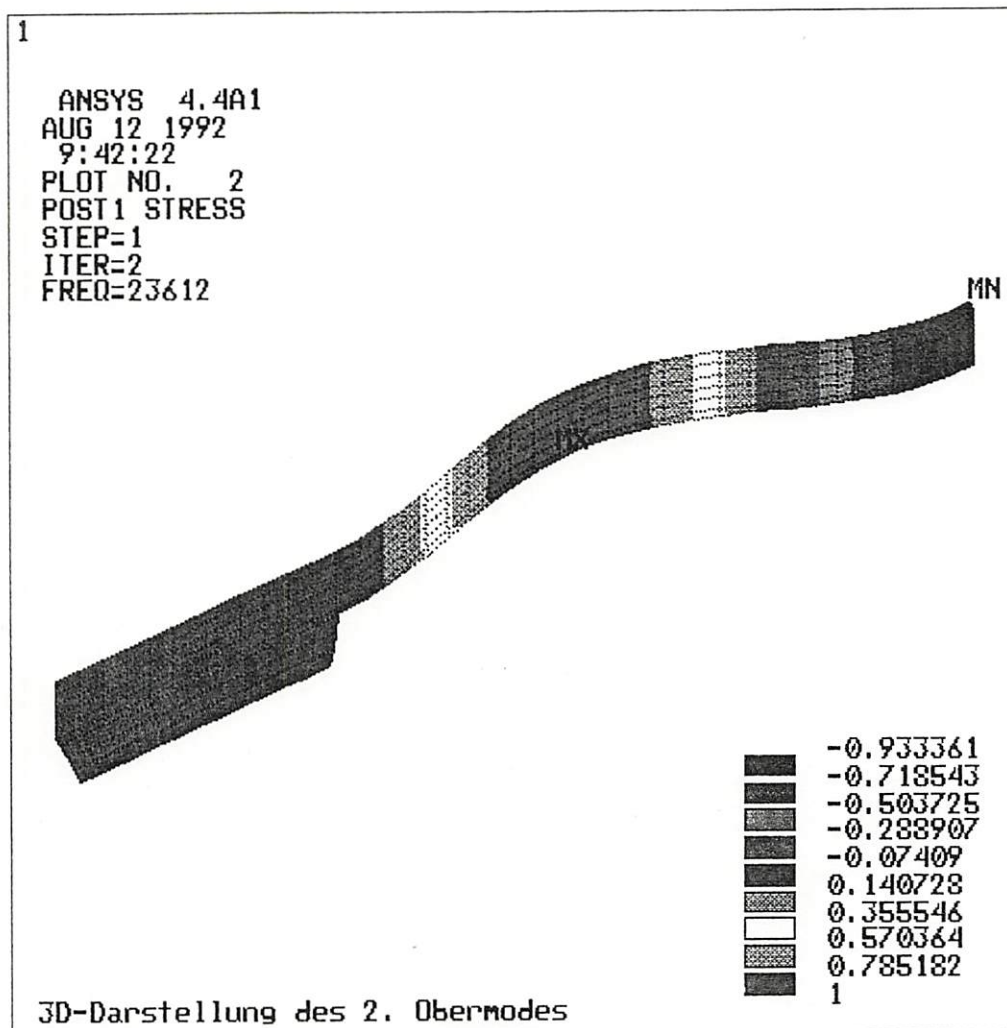


Bild 8.10: Mit FEM berechnete Eigenschwingungsformen des Balkens

b.) 3D-Darstellung des 2. Obermodes



Aus den FEM-Berechnungen ergaben sich die Werte der Transversalmoden des Balkenmodells mit den Geometriedaten aus Kapitel 3.1, wie in Tab.8.4 zu sehen ist.

Tab.8.4: Ergebnisse der rechnerischen Modalanalyse (FEM)

 $t_{Si} = 50 \mu m$

Mode	Wert
f_0	4,35 kHz
f_2	23,61 kHz

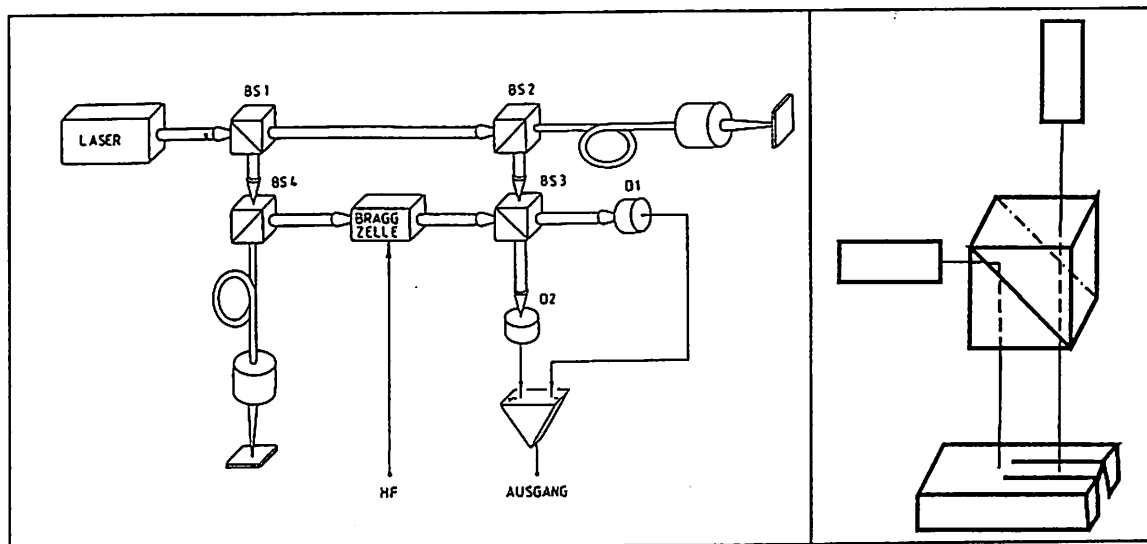
8.5 Differentielle Messung

Wie in Kapitel 4.2 bereits hingewiesen bietet das Laservibrometer die Möglichkeit der Zweistrahlmessung (siehe Bild 8.11a). Dabei wird der Meßstrahl auf die Balkenmitte, der Referenzstrahl über einen Strahlteilerwürfel auf die Einspannung fokussiert (Bild 8.11b). Mit diesem Verfahren können die Relativbewegungen zwischen den zwei Meßpunkten ermittelt werden. Die ausgewertete Phasenverschiebung ist die Differenz aus Meßstrahl- und Referenzstrahlverschiebung. Das Meßverfahren ist geeignet für stark rückreflektierende Oberflächen. So konnte die Anordnung bei Streuung an einer am Rand der Halterung angebrachten Reflexionsfolie so justiert werden, daß die rückgestreute Intensität ausreichend war. Sobald jedoch die Sensorstruktur den Strahlen ausgesetzt wurde, war die Rückstreuintensität nicht mehr ausreichend. Die Ursache liegt vermutlich darin, daß Silizium eine höhere Absorption hat als die Reflexionsfolie. Die Justage wird aufgrund dessen erheblich aufwendiger.

Bild 8.11: Optischer Aufbau für eine differentielle Messung

a.) Laservibrometer

b.) Meßanordnung



8.6 Messung der Kraftempfindlichkeit

$$l = 10 \text{ mm}$$

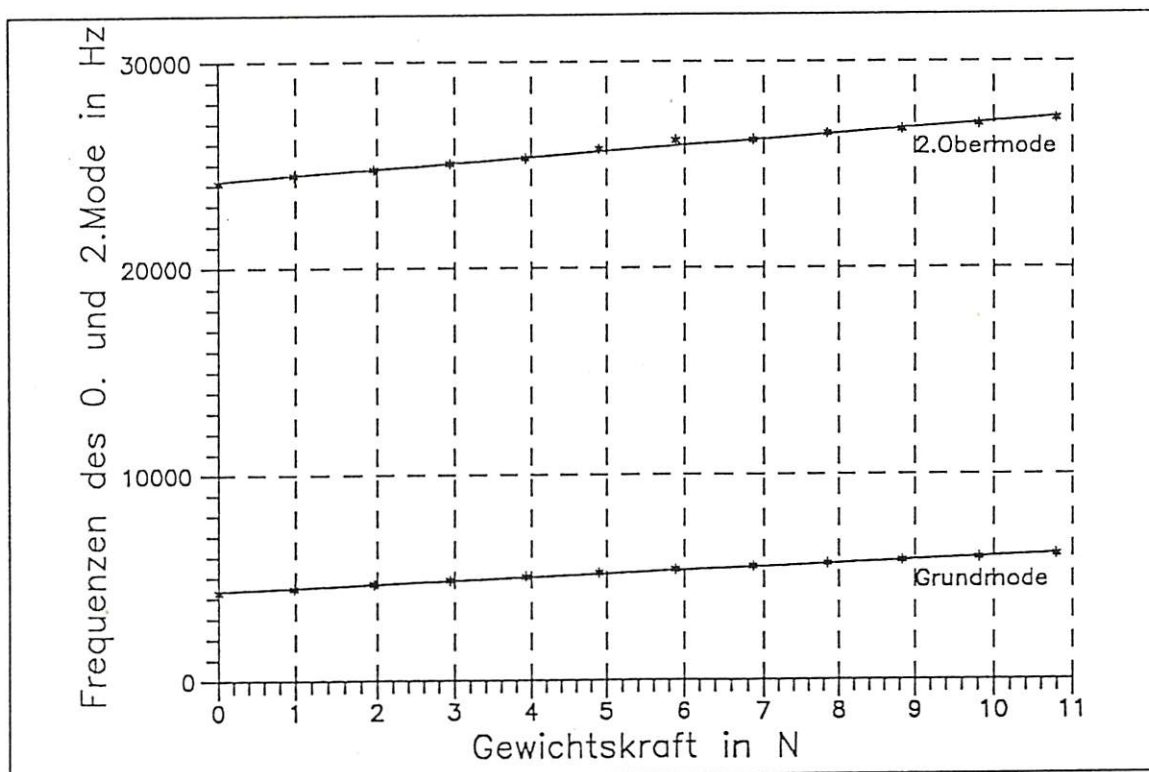
$$t_{\text{Si}} = 50 \text{ }\mu\text{m}$$

Mit Hilfe der Kraftmeßvorrichtung konnten die Kraftempfindlichkeiten, d.h. die Verschiebung der Eigenfrequenzen des Balkens bei Kraftbeaufschlagung, bestimmt werden. Die Strukturen wurden mit variierender Gewichtskraft belastet. Es wurden Massen von $m_1 = 100 \text{ g}$ bis $m_{11} = 1100 \text{ g}$ in Schritten von $\Delta m = 100 \text{ g}$ angekoppelt und jeweils ein Spektrum aufgenommen. Den Resonanzfrequenzen der beiden Schwingungsmoden wurde die den Massen entsprechende Gewichtskraft zugeordnet:

$$F_G = m \cdot g \quad \text{mit } g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Aus diesen Wertepaaren wurde die Kraftempfindlichkeitskennlinie in Bild 8.12 ermittelt.

Bild 8.12: Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der eingeleiteten axialen Kraft



Aus den Kennlinien, die im gemessenen Bereich von $F_G = 0 - 11 \text{ N}$ annähernd linear verlaufen, wurden die Kraftempfindlichkeiten der Moden ermittelt und in Tabelle 8.5 festgehalten.

Tab.8.5: Kraftempfindlichkeiten $\eta = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta F}$ der Moden im Bereich $F = 0 - 11 \text{ N}$

	Grundmode f_0	2.Obermode f_2
η	0,04 N ⁻¹	0,011 N ⁻¹

8.7 Messung der Temperatur-/ Leistungsempfindlichkeit

$l = 8 \text{ mm}$
 $t_{Si} = 34 \mu\text{m}$
 Dreifach leitend

In Kapitel 2.3 wurde der Einfluß der Temperatur bereits theoretisch behandelt. An dieser Stelle soll nun der Temperatureinfluß meßtechnisch erfaßt werden.

Durch die periodische Bestromung der Heizerwiderstände und die Speisung der DMS-Brücke mit einer symmetrischen Spannung von $U_{\text{DMS}} = \pm 12 \text{ V}$ entstehen auf der Balkenstruktur hohe Temperaturen. Aufgrund dieser Temperaturen verändern sich die Material- und Geometrieparameter, was eine Verschiebung der Resonanzfrequenzen verursacht. Eine Messung der Temperaturverteilung auf dem Balken ist an einem Kraftsensor mit Hilfe einer Infrarotkamera bereits extern durchgeführt worden. Die notwendigen Geräte stehen jedoch im Hahn-Schickard-Institut nicht zur Verfügung.

Stattdessen wurde im Rahmen der Diplomarbeit eine qualitative Abschätzung des Verhaltens bei höheren Temperaturen durchgeführt. Da ein Zusammenhang zwischen der in den Sensor eingespeisten Leistung und der Temperatur besteht, wurden die Heizwiderstände eines fest eingespannten Si-Kraftsensors der Länge $l = 8 \text{ mm}$ mit unterschiedlichen elektrischen Leistungen angesteuert.

Bild 8.13: Resonanzfrequenzverschiebung bei verschiedenen Heizleistungen
 a.) Grundmode

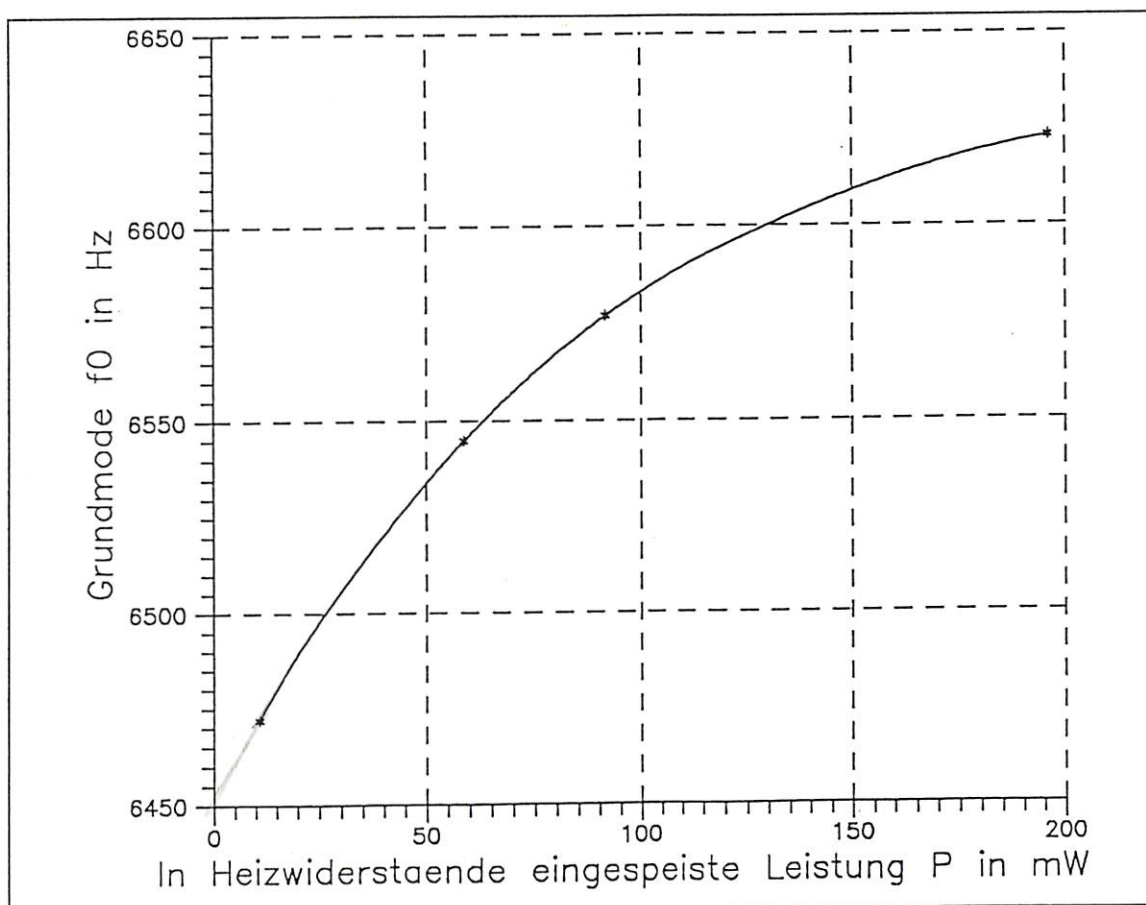
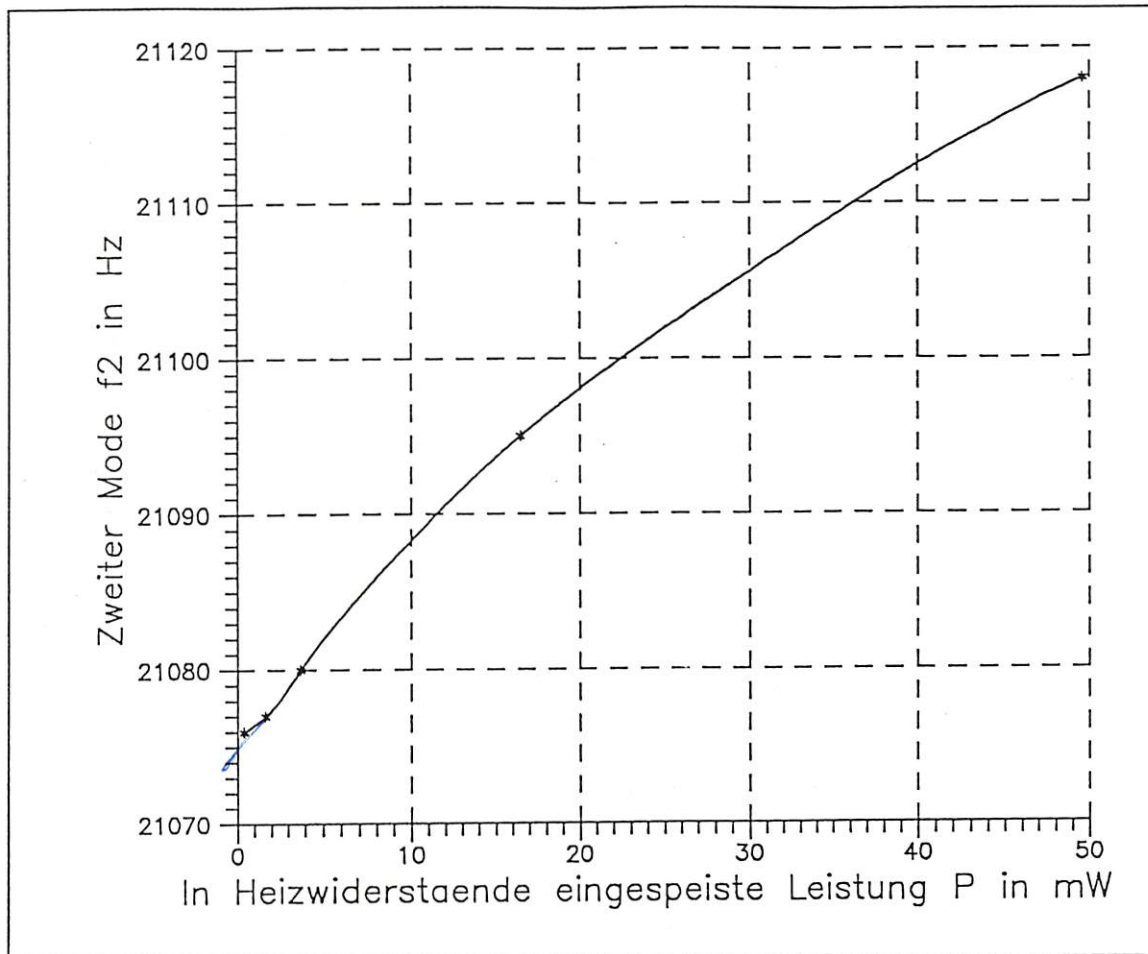


Bild 8.13: Resonanzfrequenzverschiebung bei verschiedenen Heizleistungen
b.) zweiter Obermode



Die Leistungsempfindlichkeit wurde ebenfalls graphisch ermittelt.

Tab.8.6: Leistungsempfindlichkeiten $\pi_{\text{Heiz}} = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta P}$ der verschiedenen Moden bei verschiedenen Heizleistungen

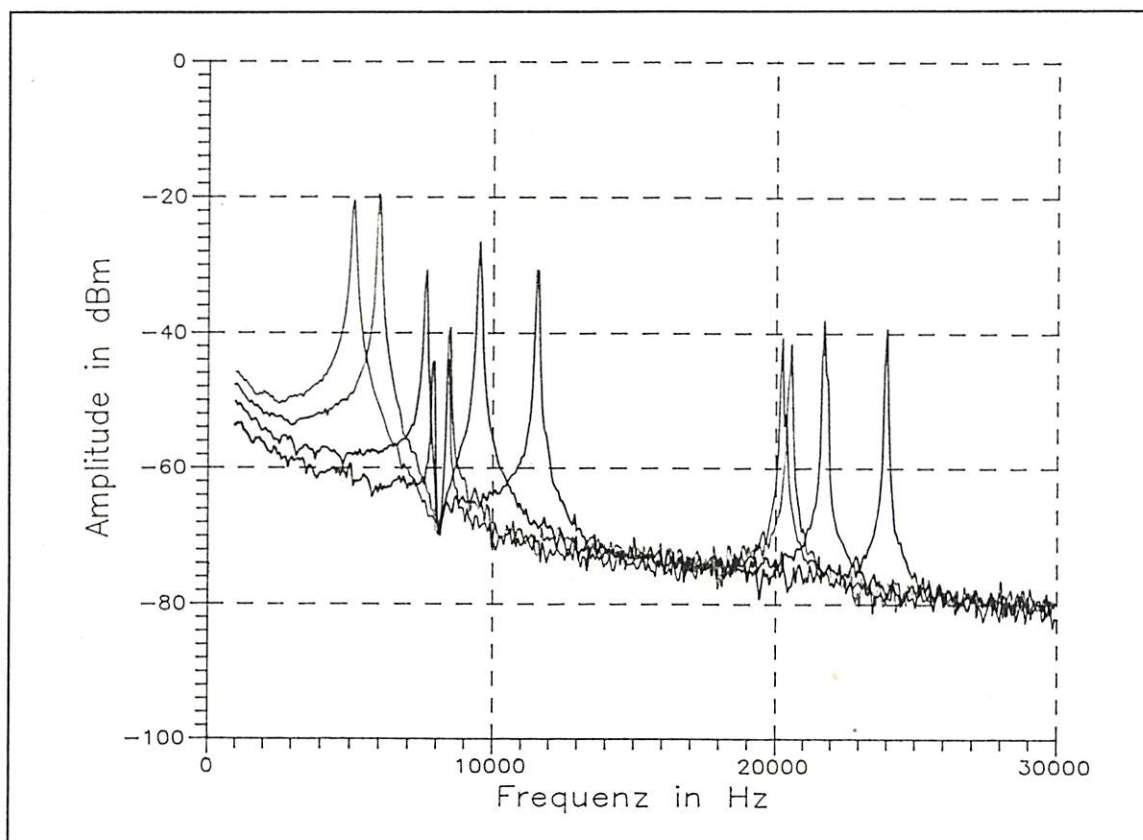
	Grundmode f ₀	2.Obermode f ₂
π_{Heiz} für P = 0-50 mW	250 $\frac{\text{ppm}}{\text{mW}}$	40 $\frac{\text{ppm}}{\text{mW}}$
π_{Heiz} für P = 0-200 mW	130 $\frac{\text{ppm}}{\text{mW}}$	-

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Leistungsänderung und der Frequenzänderung wird sichtbar, wenn die in die DMS-Brücke eingespeiste Leistung variiert wird. Dieser Versuch wurde an einem anderen Sensor mit der selben Balkenlänge $l = 8 \text{ mm}$ durchgeführt. In Bild 8.14 sind die Spektren des Balkens bei vier verschiedenen Speiseseleistungen zu sehen, wobei den Farben verschiedenen Speisespannungen U_{DMS} zugeordnet sind. Mit Kenntnis des Widerstandswertes lassen sich die Verlustleistungen P errechnen.

schwarz	:	$U_{\text{DMS}} = \pm 0 \text{ V}$
grün	:	$U_{\text{DMS}} = \pm 3 \text{ V}$
blau	:	$U_{\text{DMS}} = \pm 6 \text{ V}$
rot	:	$U_{\text{DMS}} = \pm 9 \text{ V}$

$A_{\text{S}} = 34 \mu\text{m}$

Bild 8.14: Verschiebung der Amplitudenspektren verschiedener Temperaturzustände

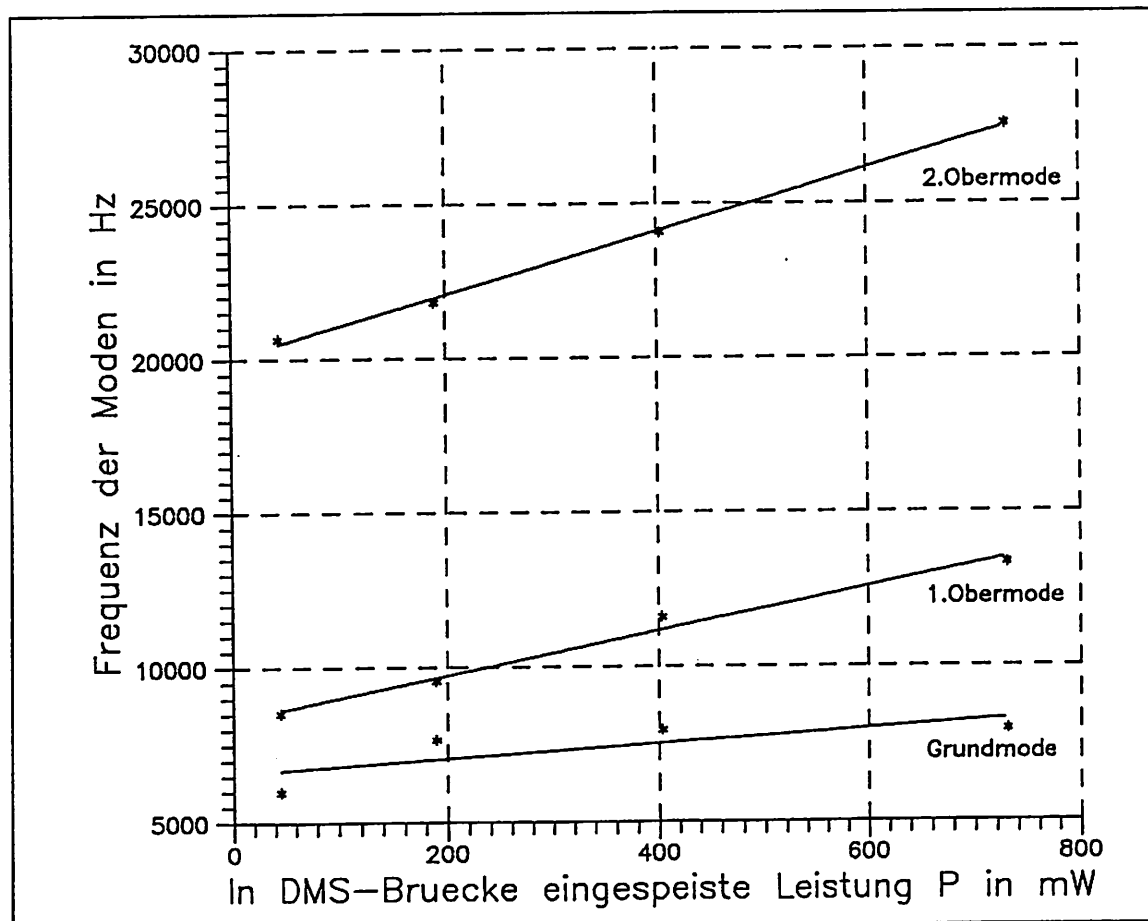


Der jeweils zweite Peak jedes Spektrums konnte zuerst nicht genau zugeordnet werden, denn bei den bisher untersuchten thermisch angeregten Sensoren trat nur der Grundmode und der zweite Obermode auf, aber nie der erste Obermode (siehe Kapitel 8.4). Eine weitere Modalanalyse ergab jedoch, daß an diesem Balken - vermutlich aufgrund einer Unterbrechung in der Leiterbahn zu einem der Heizwiderstände - auch der erste Obermode angeregt wurde.

In Bild 8.15 sind die Frequenzverläufe des Grundmodes und der ersten beiden Obermoden bei verschiedenen DMS-Speiseleistungen dargestellt.

Bild 8.15: Resonanzfrequenzverschiebung bei verschiedenen DMS-Speiseleistungen von oben nach unten:

- a.) Frequenzverläufe des zweiten Obermodes
- b.) Frequenzverläufe des ersten Obermodes
- c.) Frequenzverläufe des Grundmodes



Die Kennlinien wurden linearisiert und die Leistungsempfindlichkeiten ebenfalls graphisch ermittelt.

Tab.8.7: Leistungsempfindlichkeiten $\pi_{\text{DMS}} = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta P}$ der verschiedenen Moden bei verschiedenen DMS-Speiseleistungen

	Grundmode f_0	1.Obermode f_1	2.Obermode f_2
π_{DMS}	$\approx 350 \frac{\text{ppm}}{\text{mW}}$	$\approx 860 \frac{\text{ppm}}{\text{mW}}$	$\approx 510 \frac{\text{ppm}}{\text{mW}}$

9. Zusammenfassung

Ein Meß- und Steuerprogramm wurde erstellt, welches automatisch Spektrum-Daten aus dem Spektrum-Analysator über eine HP-IB-Schnittstelle in den PC-Rechner einliest.

Mit dem Programm können einzelne Messungen:

- * im Rechner vorbereitet
- * am Spektrum-Analysator durchgeführt
- * im Rechner abgespeichert
- * unabhängig vom Spektrum-Analysator ausgewertet werden

Die Messungen können in Form von Meßprotokollen dokumentiert werden.

Die Voraussetzungen für Kraftempfindlichkeitsuntersuchungen an verschiedenen mikro-mechanischen Balkenelementen wurden geschaffen. Die dafür notwendigen Resonatorhalterungen und eine Vorrichtung zur Einleitung einer Zugkraft wurden konstruiert, gefertigt und getestet.

Es wurden an passiv und elektrothermisch angeregten Sensoren Amplitudenspektren aufgenommen und daraus die Resonanzfrequenzen, Amplituden, Schwingungsgüten und Eigenschwingungsformen ermittelt. Bei der Vermessung von jeweils drei Sensoren verschiedener Länge wurde festgestellt, daß Temperaturen, Verspannungen durch Schichtsysteme, durch die Einspannung und die Klebeverbindung große Abweichungen der Meßwerte von den analytisch ermittelten Ergebnissen verursachen. Die Sensoren sollten nicht in einer geschlossenen Resonatorhalterung (siehe Bild 6.2), sondern in einer getrennten Halterung (siehe Bild 6.1) vermessen werden, um die Einflüsse der Einspannung und der Klebeverbindung bestmöglichst zu kompensieren. Die Strukturen sollten zukünftig mit einer Plexiglashaube abgeschirmt werden, damit sie bei einer konstanten Umgebungstemperatur betrieben werden und keiner Luftströmung ausgesetzt sind.

Die Vermessung der Kraftempfindlichkeiten ergab einen weitestgehend linearen Zusammenhang zwischen Kraft und Resonanzfrequenz im betrachteten Bereich von $F_G = 1 \text{ N}$ bis $F_G = 11 \text{ N}$.

Ferner wurde als qualitative Abschätzung die Verschiebung der Resonanzfrequenzen unter Einfluß der in die Widerstandsschichten eingespeisten Leistungen als Maß für die Temperatur vermessen. Die Untersuchungen ergaben, daß sich bei steigender Temperatur die Resonanzfrequenz zu größeren Werten hin verschiebt.

10. Verzeichnisse

10.1 Literaturverzeichnis

- [ALB88] Albert, W.C.
A low cost force sensing crystal resonator applied to weighing
Proc. 42th Ann. Frequency Contr. Symp. (1988) 78
- [BAS90] Using HP Instrument BASIC with the HP 3588A
Hewlett-Packard Company, USA, (1990)
- [BLE84] Blevins, R.D.
Formulas for natural frequency and mode shape
R.E. Krieger Publishing Company, Malabar/Florida, USA , (1984)
- [BRA92] Braxmaier, C.
Diplomarbeit: Aufbau und Erprobung eines Meßplatzes
zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens
von mikromechanischen Grundstrukturen
HSG-IMIT, Villingen, (1992)
- [BÜT91] Büttgenbach, S.
Mikromechanik
B. G. Teubner, Stuttgart , (1991)
- [CEC89] CEC 488 Programming and Reference Manual
CEC, Burlington/Massachusetts, USA, (1989)
- [GMS91] Bartuch, Dr. H.
Persönliche Mitteilung, (1991)
- [HEU89] Heuberger, A.
Mikromechanik
Springer Verlag, Berlin, (1989)
- [INA91] Firmenschrift Linearführungen 601
INA Lineartechnik oHG, Homburg, (1991)

- [KRA89] Krause, W.
Konstruktionselemente der Feinmechanik
Carl Hanser Verlag, München, (1989)
- [LEN89] Lenk, R.
Fachlexikon ABC Physik
Harri Deutsch Verlag, Thun, (1989)
- [LEW90] Lewin, A. , Mohr, F. , Selbach, H.
Heterodyn-Interferometer zur Vibrationsanalyse
Sonderdruck "Technisches Messen" 57, (1990), Heft 9 Seite 335-345
- [MAN90] HP 3588A Operating Manual Set
Hewlett-Packard Company, USA, (1990)
- [MÜL92] Müller, M.
Technischer Ordner zur Diplomarbeit
HSG IMIT, Villingen, (1992)
- [PER91] HP 3588A Performance Test Guide
Hewlett-Packard Company, USA, (1991)
- [POL91] Operator's Manual : OFV 1102 Vibrometer
Polytec GmbH, Waldbronn, (1991)
- [REF90] HP 3588A HP-IB Programming Reference
Hewlett-Packard Company, USA, (1990)
- [SCH90] Schnorrenberg, W.
Spektrumanalyse
Vogel Verlag, Würzburg, (1990)
- [SZA84] Szabó, I.
Höhere Technische Mechanik
Springer Verlag, Berlin, (1984)
- [WAL91] Walsh, D. , Culshaw, B.
Optically activated silicon microresonator transducers:
an assessment of material properties
Sensors and Actuators A, 25-27, (1991) 711-716

10.2 Verzeichnis der Bilder

- Bild 3.1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Kraftsensors
HSG-IMIT, Villingen, H.Haffner, Juli 1992
- Bild 3.2: Frequenzanaloger Kraftsensor mit elektrothermischer Anregung [GMS91]
a.) Prinzip mit Schwingungsrichtung
b.) Ausschnitt aus dem Maskensatz
- Bild 4.1: Geräteplan des optischen Meßplatzes
- Bild 4.2: Optischer Aufbau eines Einpunkt-Vibrometers [LEW90]
a.) Prinzipdarstellung
b.) Praktische Realisierung mit Frequenzmodulation des Referenzstrahles
- Bild 4.3: Die Beziehung zwischen Zeit- und Frequenzbereich [SCH90]
- Bild 5.1: Struktogramm des Hauptprogramms
- Bild 5.2: Bildschirmabdruck des Hauptmenüs aus dem Programm HPMESS.EXE
- Bild 5.3: Bildschirmabdruck der Maske des Menüpunktes 4
- Bild 5.4: Meßprotokoll, automatisiert erstellt mit Graphikprogramm GRAPHER
- Bild 6.1: Resonatorhalterung mit Si-Kraftsensor und Spannrahmen
- Bild 6.2: 3-fach Resonatorhalterung zur statistischen Auswertung der
Amplitudenspektren von Si-Kraftsensoren
- Bild 7.1: Seitenansicht der Vorrichtung zur Krafteinleitung

Bild 8.1: Amplitudenspektrum einer Piezokeramik

Bild 8.2: Amplitudenspektrum der Resonatorhalterung

Bild 8.3: Amplitudenspektrum in der Mitte des Schwingbalkens aufgenommen
a.) nicht normiert b.) auf das Anregungsspektrum normiert

Bild 8.4: Amplitudenspektrum des Frequenzgenerators bei $f_0 = 4.19 \text{ kHz}$
a.) bei $AC_{pp} = 0,5 \text{ V}$ und $DC_{Offset} = 0 \text{ V}$
b.) bei $AC_{pp} = 0,2 \text{ V}$ und $DC_{Offset} = 0,5 \text{ V}$

Bild 8.5: Amplitudenspektrum eines einweg-gleichgerichteten Sinussignals

Bild 8.6: Amplitudenspektrum eines Kraftsensors bei thermischer Anregung

Bild 8.7: Bestimmung der Schwingungsgüten an Amplituden
a.) in linearer Darstellung
b.) in logarithmischer Darstellung

Bild 8.8: Angenommener Temperaturverlauf im Sensor

Bild 8.9: Experimentell ermittelte Eigenschwingungsformen des Balkens

Bild 8.10: Mit FEM berechnete Eigenschwingungsform des Balkens
Finite-Element-Berechnung eines Silizium-Kraftsensors
HSG-IMIT, Villingen, Th.Fabula, August 1992

Bild 8.11: Optischer Aufbau für eine differentielle Messung
a.) Laservibrometer
b.) Meßanordnung

Bild 8.12: Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der eingeleiteten axialen Kraft

Bild 8.13: Resonanzfrequenzverschiebung bei verschiedenen Heizleistungen

Bild 8.14: Verschiebung der Amplitudenspektren verschiedener Temperaturzustände

Bild 8.15: Resonanzfrequenzverschiebung bei verschiedenen DMS-Speiseleistungen

10.3 Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1.1: Graphischer Zeitplan der Diplomarbeit

Tab. 2.1: Temperaturkoeffizienten bei Schichtsystemen [WAL91]

Tab. 3.1: Analytisch berechnete Resonanzfrequenzen der Sensoren

Tab. 4.1: Spezifikationen des Laservibrometers [LEW90]

Tab. 8.1: Theoretische Werte für Meßpunktgröße und Tiefenschärfe
unter Annahme spiegelnder Oberflächen

Tab. 8.2: Ergebnisse einer Meßreihe an Si-Kraftsensoren der Fa.GMS mbH, St.Georgen

Tab. 8.3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisse aus Tab.8.2

Tab. 8.4: Ergebnisse der rechnerischen Modalanalyse (FEM)

Tab. 8.5: Kraftempfindlichkeiten der ersten Moden im Bereich $F = 0 - 11\text{N}$

Tab. 8.6: Leistungsempfindlichkeiten der verschiedenen Moden
bei verschiedenen Heizleistungen

Tab. 8.7: Leistungsempfindlichkeiten der verschiedenen Moden
bei verschiedenen DMS-Speiseleistungen

10.4 Verzeichnis der benötigten Programme

Es sollten in jedem Benutzerverzeichnis der Pfad:

F : \ name \ **HP-DSA \ GRAPHER**

angelegt werden.

In das Verzeichnis F : \ name \ HP-DSA sind folgende Programme zu kopieren:

HP	BAT	:	Batch-Steuerdatei
TASTE	COM	:	Tastaturabfrage für Batchdatei
HPMESS	EXE	:	Meßprogramm
HPPARM	TMP	:	temporäre Datei
HPKOPF	TMP	:	temporäre Datei
HPMESS	INI	:	Initialisierungsdatei

In das Verzeichnis F : \ name \ HP \ GRAPHER sind folgende Programme zu laden:

HP-X	AXS	:	Koordinatenachsen
HP-Y	AXS	:	"
HPSHOWX	AXS	:	"
HPSHOWY	AXS	:	"
HPDATEN	DAT	:	Meßwertedatei
GRAPHER	EXE	:	ausführbare Programme
INSTALL	EXE	:	" "
PLOT	EXE	:	" "
VIEW	EXE	:	" "
GRIDFILE	GRD	:	" "
HPDOKU	GRF	:	Standardgraphikdatei
HPSHOW	GRF	:	Standardgraphikdatei
CENTERED	SYM	:	Symbolzeichensatz
SET1	SYM	:	Textzeichensatz
HPKOPF	TXT	:	Textdatei
HPPARM	TXT	:	"

11. Anhang

11.1 Programmlisting

11.2 Stückliste

11.3 Zeichnungen