

## 4 Strukturmechanische Modellbildung

### 4.1 Problemstellung

Der Resonator ändert abhängig von der Temperaturverteilung seine Resonanzfrequenz (vgl. Abschnitt 1.3). Zur Charakterisierung des Sensorverhaltens wird aus diesem Grund der Einfluß der Temperatur auf die Resonanzfrequenz untersucht. Die Temperaturverteilung über dem Sensor stellt sich normalerweise infolge einer Gasströmung ein. In erster Näherung ist es jedoch sinnvoll, mit einer homogenen Temperaturverteilung zu rechnen. Zur Betrachtung der Biegeschwingungsmoden senkrecht zur Sensorebene, genügt ein zweidimensionales Modell, das einen Schnitt durch die Sensormitte darstellt.

Bei der Modellbildung haben eine Vielzahl von Parametern eine Auswirkung auf die Berechnungsergebnisse. Aus diesem Grund wird beim zweidimensionalen Modell der Einfluß einiger wichtiger Parameter, die hier aufgelistet sind, untersucht:

- Elementierung: Die Feinheit der Vernetzung eines Modells beeinflusst die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse. Am zweidimensionalen Modell wird der Einfluß der Netzfeinheit auf die Berechnungsergebnisse untersucht.
- Materialdaten: Materialdaten spielen bei der Simulation eine sehr große Rolle. Der Unterschied zwischen temperaturabhängigen und -unabhängigen Materialdaten soll untersucht werden.
- Schichtsystem: Der Sensor besteht im wesentlichen aus Silizium. Auf die Sensoroberseite ist herstellungsbedingt eine Siliziumdioxid-Schicht aufgebracht. Der Sensor ist zur elektrischen Kontaktierung und zur mechanischen Stabilisierung auf einem Keramikträger aufgeklebt. Der Einfluß dieser unterschiedlichen Materialien soll ebenfalls untersucht werden.

Zur Betrachtung der Torsionsmode ist es erforderlich ein dreidimensionales Modell zu erstellen. Dabei werden die Erkenntnisse, die bei der Berechnung des zweidimensionalen Modells gewonnen wurden, berücksichtigt. Mit dem dreidimensionalen Modell kann

zusätzlich der Einfluß anisotroper Materialdaten auf die Berechnungsergebnisse untersucht werden.

## 4.2 Erstellen eines zweidimensionalen Modells

### 4.2.1 Materialdaten

FE-Berechnungen werden durch die Materialdaten sehr stark beeinflusst. Deshalb ist bei der Modellerstellung die Auswahl der Materialdaten ein wichtiger Punkt. Gerade bei einem anisotropen Werkstoff wie Silizium, für den unterschiedliche Materialdaten in der Literatur zu finden sind, ist es wichtig, die Werte sorgfältig auszuwählen.

Die Sensoren wurden aus einem (100)-Si-Wafer gefertigt, bei dem die Waferoberfläche in der (100)-Ebene liegt. Dabei gibt (100) die Richtung der Normalen an, die senkrecht zur Waferebene steht [Büt91]. Die Sensoren sind demzufolge parallel zur (110)-Kristallebene angeordnet. Das bedeutet, daß für das zweidimensionale Modell die Materialdaten für (110)-Silizium benötigt werden. Zur Untersuchung des Einflusses der Temperaturabhängigkeit werden die Daten temperaturabhängig und -unabhängig verwendet. In **Tabelle 4.1** sind die Materialdaten für (110)-Silizium aufgelistet (Bezugstemperatur  $T = 25\text{ °C}$ ).

Material	E-Modul [N/m <sup>2</sup> ]	Poisson- zahl	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeausdeh- nungskoeff. [1/K]	Literatur- quelle
Silizium (110)	$1,689 \cdot 10^{11}$	0,0625	2329	$2,620 \cdot 10^{-6}$	[Bus89]
Siliziumdioxid	$0,73 \cdot 10^{11}$	0,17	2200	$0,609 \cdot 10^{-6}$	[Hil90]
Keramik (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$3,1 \cdot 10^{11}$	0,24	3900	$6,300 \cdot 10^{-6}$	[Gro92]

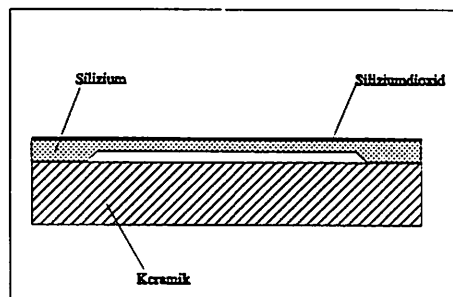
**Tab 4.1:** Materialdaten für eine Bezugstemperatur von  $T = 25\text{ °C}$

Die temperaturabhängigen Materialdaten sind im Anhang aufgeführt.

### 4.2.2 Geometrie

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter (vgl. Abschnitt 4.1) werden einige Anforderungen an das Modell gestellt. Um den Einfluß der Elementierung untersuchen zu können, muß das Modell eine variable Elementierung zulassen. Das wird erreicht, indem die Modellerstellung parametrisiert erfolgt.

Bei der Vernetzung wurde das zweidimensionale Element PLANE42 (STIF42 in ANSYS44A), das zwei Freiheitsgraden pro Knoten (Verschiebung in x- und y-Richtung) besitzt, verwendet. Für die Materialdaten wurde eine separate Eingabedatei erstellt, so daß es möglich ist, verschiedene Materialdaten für dieselbe Geometrie zu verwenden. Die Eingabedatei des Modells ist außerdem so aufgebaut, daß die unterschiedlichen Schichten des Sensors unabhängig voneinander betrachtet werden können. In **Bild 4.1** ist schematisch der Aufbau des zweidimensionalen Modells dargestellt.



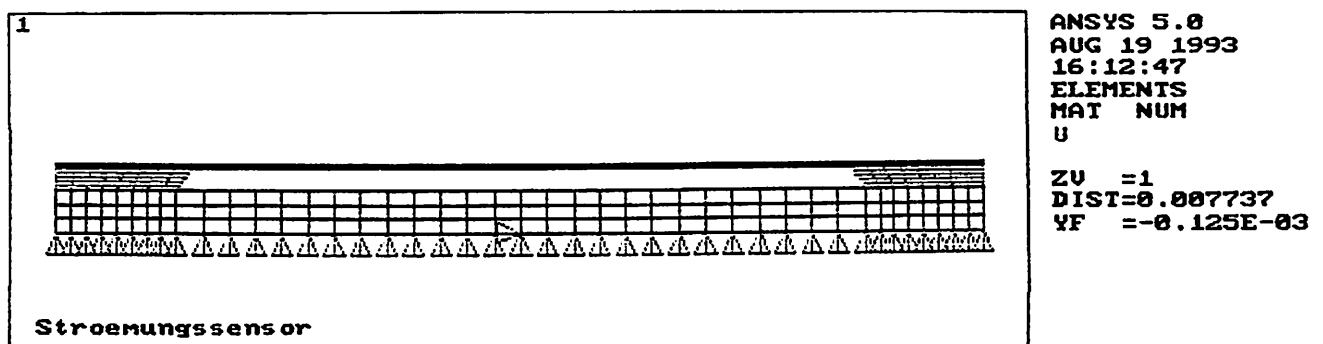
**Bild 4.1:** Schematische Darstellung der Geometrie des zweidimensionalen Modells

In der Realität ist unterhalb des Resonators eine Aussparung in der Keramik. Bei dem zweidimensionalen Modell interessiert jedoch der Einfluß der Wärmeausdehnung des Keramikträgers. Aus diesem Grund ist die Keramikplatte bei diesem Modell durchgängig berücksichtigt (vgl. Bild 2.5). Die Randbereiche des Keramikträgers werden nicht berücksichtigt, da sie auf die Berechnungsergebnisse einer rein strukturmechanischen Berechnung keinen Einfluß haben.

### 4.2.3 Randbedingungen

Mit den Randbedingungen definiert man bei FE-Berechnungen die "Umgebung" des zu simulierenden Systems. Festlegen von Randbedingungen bedeutet bei der FEM das Belegen ausgewählter Freiheitsgrade mit definierten Werten. In dem betrachteten zweidimensionalen Modell sind jedem Knoten zwei Freiheitsgrade zugeordnet (vgl. Abschnitt 4.2.2). Das Sperren der Freiheitsgrade bestimmter Knoten, die z.B. am Rand des Modells liegen, indem deren Wert auf Null gesetzt wird, entspricht einer festen Einspannung.

Bei der Einspannung des Sensors müssen zwei Fälle unterschieden werden. Betrachtet man den Sensor ohne Keramikträger, so wird der Sensor an seiner Unterseite fest eingespannt, d.h. die Freiheitsgrade aller Knoten die auf der Unterseite des Sensors liegen, werden gesperrt. Berücksichtigt man den Keramikträger, so ändert sich die Einspannung. Die Verschiebungen aller Knoten, die sich an der Unterseite des Keramikträgers befinden, werden in vertikaler Richtung gesperrt. Zusätzlich wird die Verschiebung eines Knotens der Keramikträgerunterseite in horizontaler Richtung gesperrt. Somit ist das Modell in vertikaler Richtung fixiert, kann sich jedoch in horizontaler Richtung ausdehnen, Bild 4.2.



**Bild 4.2:** Darstellung der Randbedingungen beim zweidimensionalen Modell mit Keramikträger

Die konstante homogene Temperaturverteilung im Modell kann nicht über die Belegung von Freiheitsgraden erfolgen, da beim verwendeten Elementtyp die Temperatur kein Freiheitsgrad ist. Aus diesem Grund wird die Temperaturverteilung als Last definiert, d.h. sie wird zwar den einzelnen Knoten zugeordnet, ist jedoch kein Freiheitsgrad.

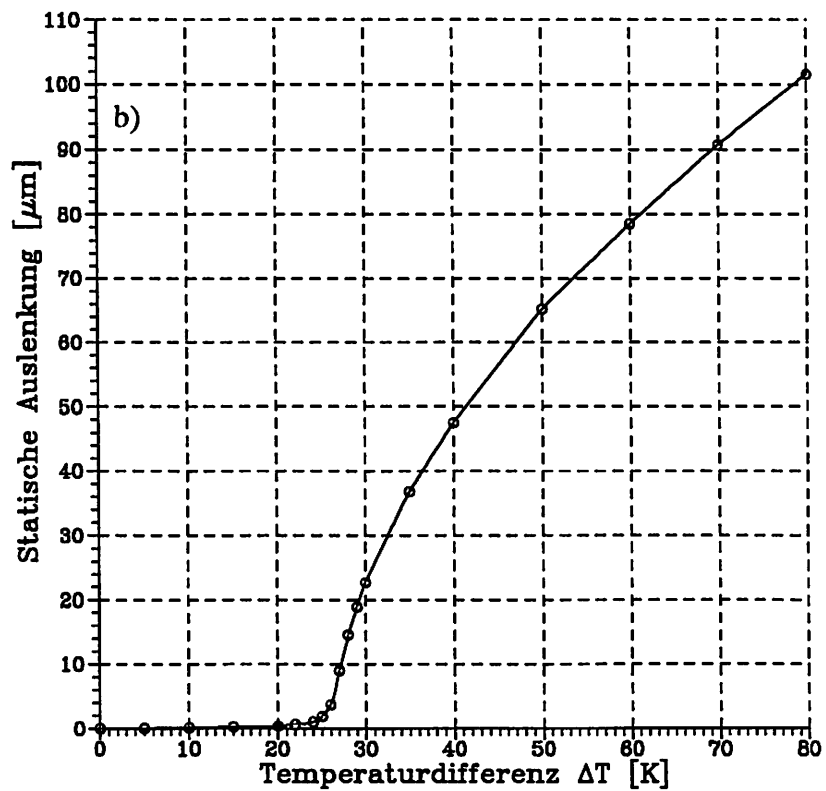
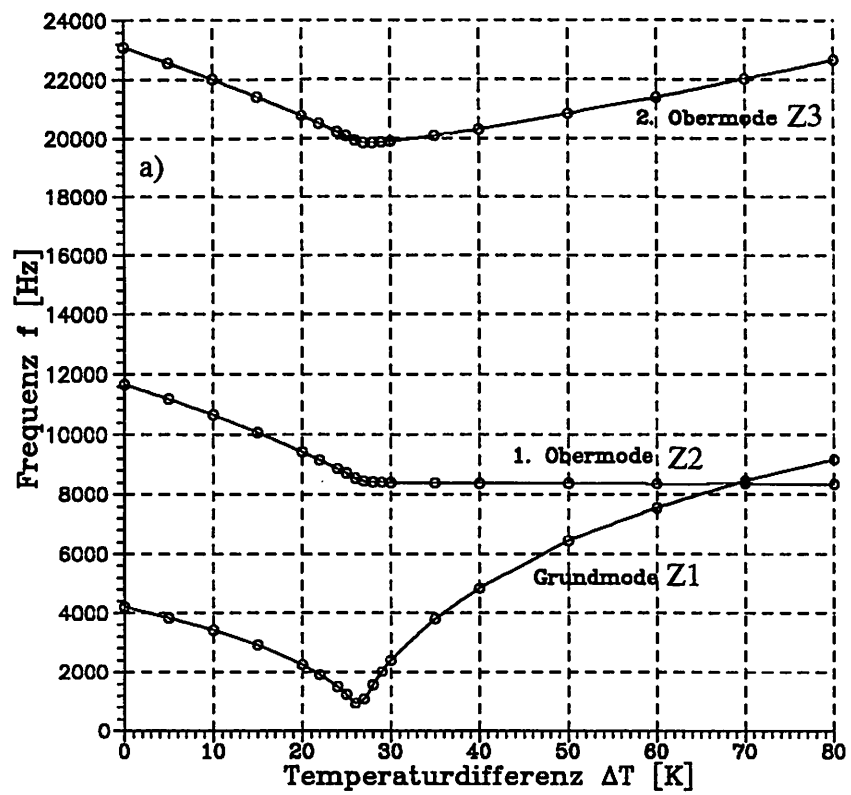
### 4.3 Interpretation der Berechnungsergebnis

#### *Sensorverhalten:*

In Bild 4.3 a) und b) ist die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz und die Abhängigkeit der statischen Auslenkung des Balkens von der Temperaturdifferenz dargestellt. Die gezeigten Kurvenverläufe sind charakteristisch für den Sensor. Der in diesem Bild dargestellte Kurvenverlauf wurde für einen reinen Siliziumsensor, d.h. ohne Siliziumdioxidschicht und ohne Keramikträger berechnet. Es wurden temperaturabhängige Materialdaten verwendet. Berechnet wurden die ersten drei Biegeschwingungsmoden Z1, Z2 und Z3.

Die berechneten Kurven lassen sich in zwei Bereiche aufteilen. Bis zu einer Temperaturdifferenz von ca. 27 K nimmt die Resonanzfrequenz der betrachteten Mode ab, die Auslenkung des Balkens ist gering. In diesem Bereich bauen sich, infolge der durch die feste Einspannung des Sensors verhinderten Wärmeausdehnung, Druckspannungen im Balken auf. Eine Erhöhung der Druckspannung führt zu einer Verringerung der Resonanzfrequenz. Bei einer Temperaturdifferenz von ca. 27 K erreichen die Druckspannungen den Wert der kritischen Knicklast. Erwärmt man den Sensor weiter, knickt dieser aus und die Resonanzfrequenz der Mode Z1 und Z3 steigt wieder. Die Mode Z2 bleibt in etwa konstant. In diesem zweiten Bereich der Kurve werden die Druckspannungen im Balken zunächst abgebaut, bevor sich dann Zugspannungen aufbauen.

Die Auslenkung des Balkens nimmt im zweiten Bereich der Kurve stark zu und erreicht bei einer Temperaturdifferenz von 80 K einen Wert von ca. 100  $\mu\text{m}$ . Für die folgenden Betrachtungen werden die drei Moden Z1, Z2 und Z3 berechnet. Es werden jedoch nur die beiden Moden Z1 und Z2 ausgewertet, da der Einfluß der verschiedenen Modellparameter bei der Betrachtung dieser Moden gut untersucht werden kann.



**Bild 4.3:** Charakteristisches Sensorverhalten. a) Frequenz in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz. b) Auslenkung der Balkenmitte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

### *Elementierung:*

Das zweidimensionale Modell wurde mit drei unterschiedlich feinen Vernetzungen berechnet. Die Netzfeinheit hat einen Einfluß auf die Steifigkeit des Modells. Ist das Modell zu grob vernetzt, wird das Verhalten der Struktur zu steif.

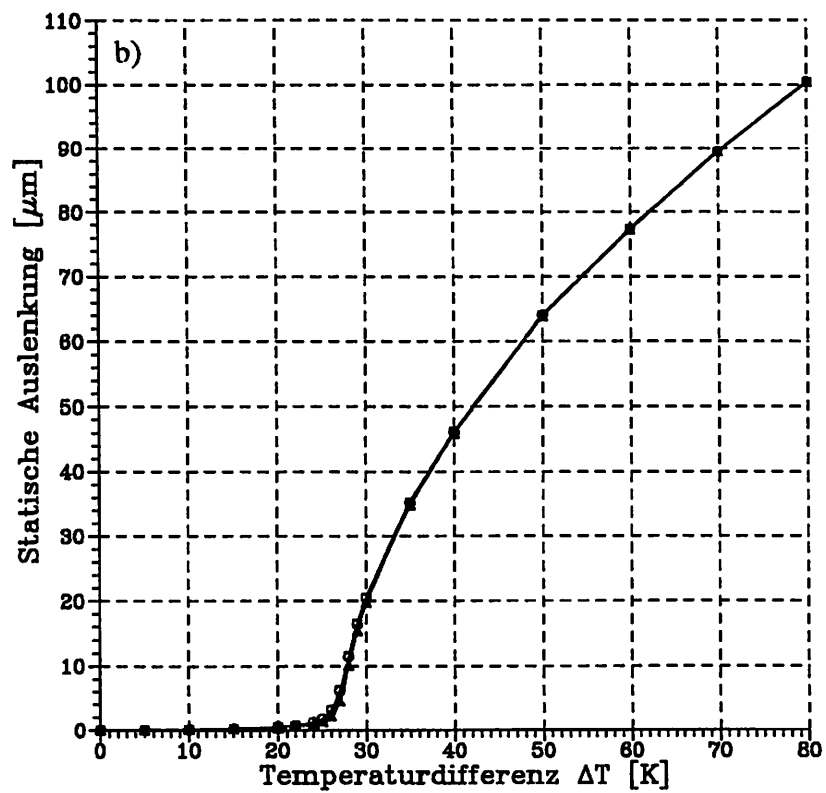
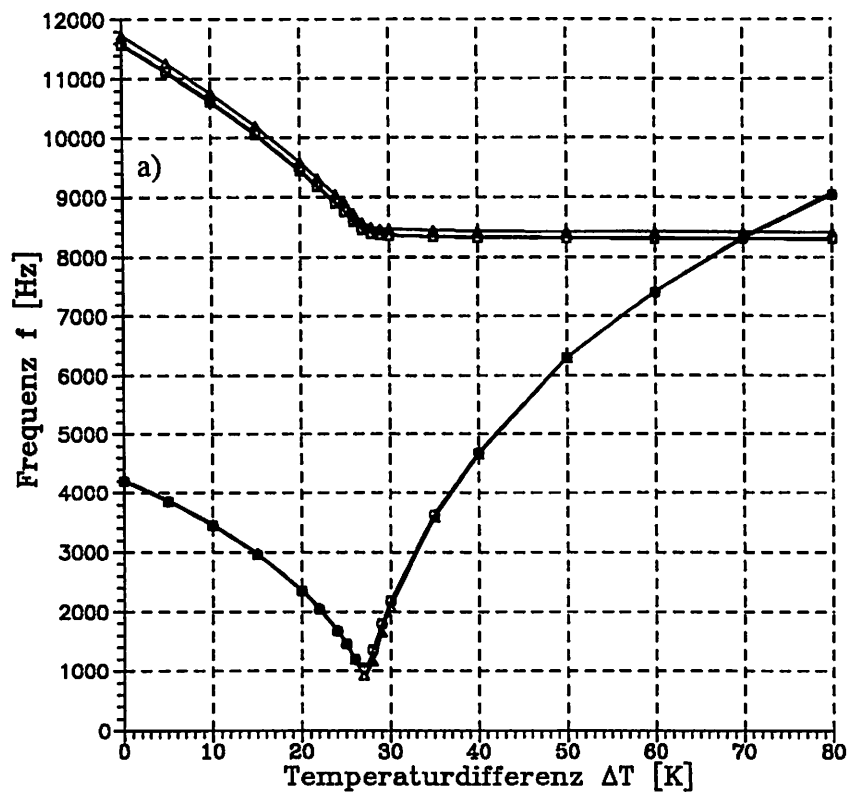
Ausgehend von einem Modell mit 824 Elementen wurde die Elementierung variiert. Es wurde zunächst die Elementierung des Balkens lokal verfeinert (980 Elemente). Desweiteren wurde ein Modell mit geringerer Netzfeinheit (206 Elemente) erstellt. Alle drei Modelle wurden mit Silizium und Siliziumdioxid allerdings ohne Keramikträger berechnet. Dabei wurden temperaturabhängige Materialdaten verwendet. Berechnet wurde die Resonanzfrequenz und die maximale Auslenkung des Balkens in Abhängigkeit der Temperaturüberhöhung. In **Bild 4.4 a) und b)** sind die Kurvenverläufe der drei Berechnungen für die Grundmode und die erste Obermode dargestellt.

Betrachtet man die Kurvenverläufe, stellt man fest, daß die hier berechneten Modelle näherungsweise die gleichen Ergebnisse liefern. Es genügt also eine relativ grobe Vernetzung, um die Frequenzen ausreichend genau zu berechnen. Für weitere Untersuchungen wird das Modell mit der groben Vernetzung (206 Elementen) benutzt.

### *Materialdaten:*

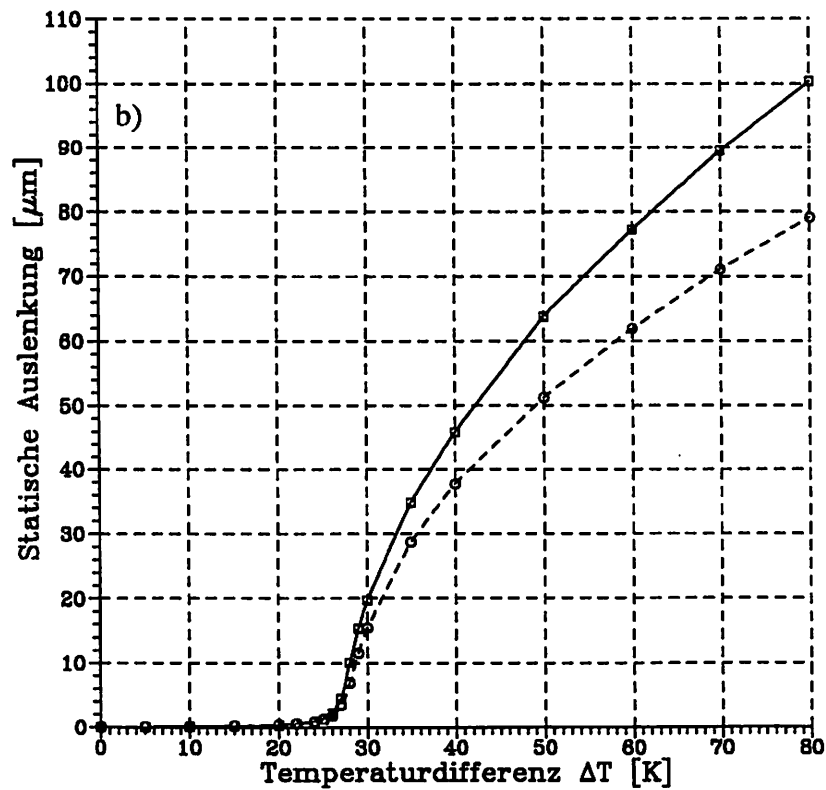
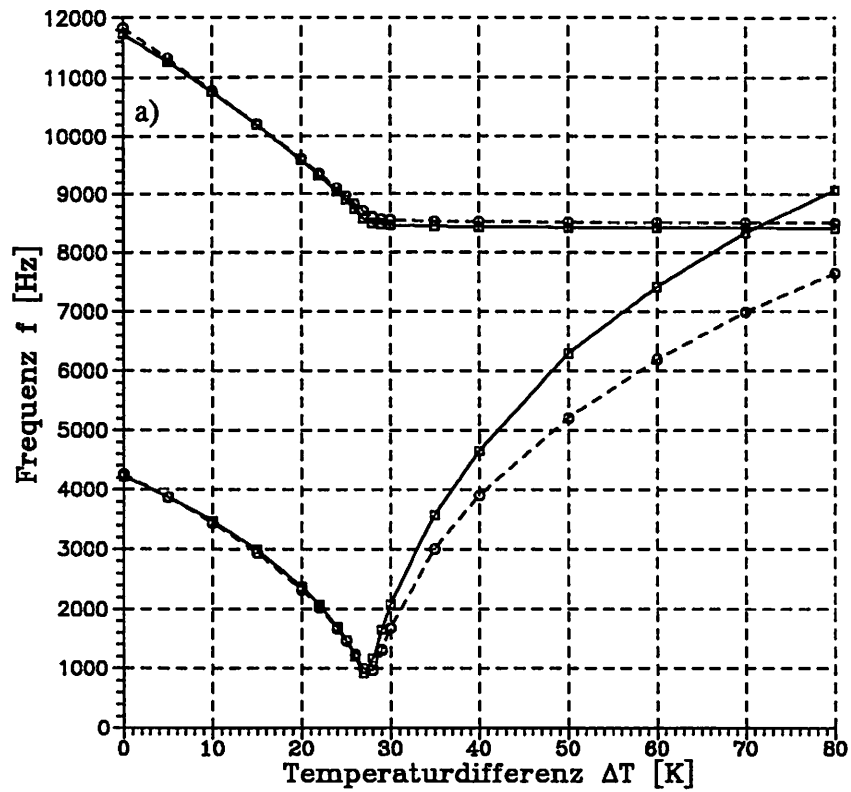
Die bisherigen Berechnungen wurden mit temperaturabhängigen Materialdaten durchgeführt. Um den Einfluß der Materialdaten auf die Berechnungsergebnisse zu untersuchen, wurden Berechnungen mit temperaturunabhängigen Materialdaten durchgeführt. In **Bild 4.5 a) und b)** sind die Berechnungsergebnisse für temperaturabhängige und -unabhängige Materialdaten gegenübergestellt.

Bis zur kritischen Temperaturdifferenz (ca. 27 K) sind die Kurvenverläufe für die temperaturabhängigen und -unabhängigen Materialdaten annähernd gleich. Bei weiterer Temperaturerhöhung steigt die Resonanzfrequenz der ersten Mode bei dem Modell mit temperaturabhängigen Materialdaten schneller als bei dem Modell mit temperaturunabhängigen Materialdaten. Der Kurvenverlauf der ersten Obermode ist in beiden Fällen etwa gleich. Außerdem ist die Auslenkung des Balkens beim temperaturabhängigen Modell größer als beim temperaturunabhängigen. Entscheidend für diese Kurvenverläufe ist hauptsächlich der Wärmeausdehnungskoeffizient, der beim temperaturabhängigen Modell



**Bild 4.4:** a) Frequenz in Abhängigkeit der Temperatur b) Auslenkung der Balkenmitte in Abhängigkeit der Temperatur ( $\Delta$  206 Elemente,  $\circ$  824 Elemente,  $\square$  980 Elemente)





**Bild 4.5:** a) Frequenz in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz, b) Auslenkung des Balkens in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz. □ temperaturabh., ○ temperaturunabh.

mit zunehmender Temperatur immer größer wird. Der Unterschied zwischen dem temperaturabhängigen und -unabhängigen Wärmeausdehnungskoeffizienten beträgt bei einer Temperaturdifferenz von 80 K ungefähr 12 %. Der Unterschied der Balkenauslenkung beträgt 20 %. Die 8 % Differenz werden durch den Einfluß des E-Moduls und der Dichte verursacht. Bei der Resonanzfrequenz der Grundmode beträgt der Unterschied etwa 14 %. Die Differenz von ca. 6% gegenüber der Auslenkung könnte daher rühren, daß der durch die erhöhte Temperatur kleinere E-Modul die Beigesteifigkeit so verändert, daß sich der Balken weiter auslenkt, jedoch die Spannungen kleiner werden und deshalb die Frequenz nicht im gleichen Maße steigt. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen ist es erforderlich, temperaturabhängige Materialdaten zu verwenden. Verwendet man dennoch temperaturunabhängige Materialdaten, beträgt der Fehler zwischen 10 und 20 %.

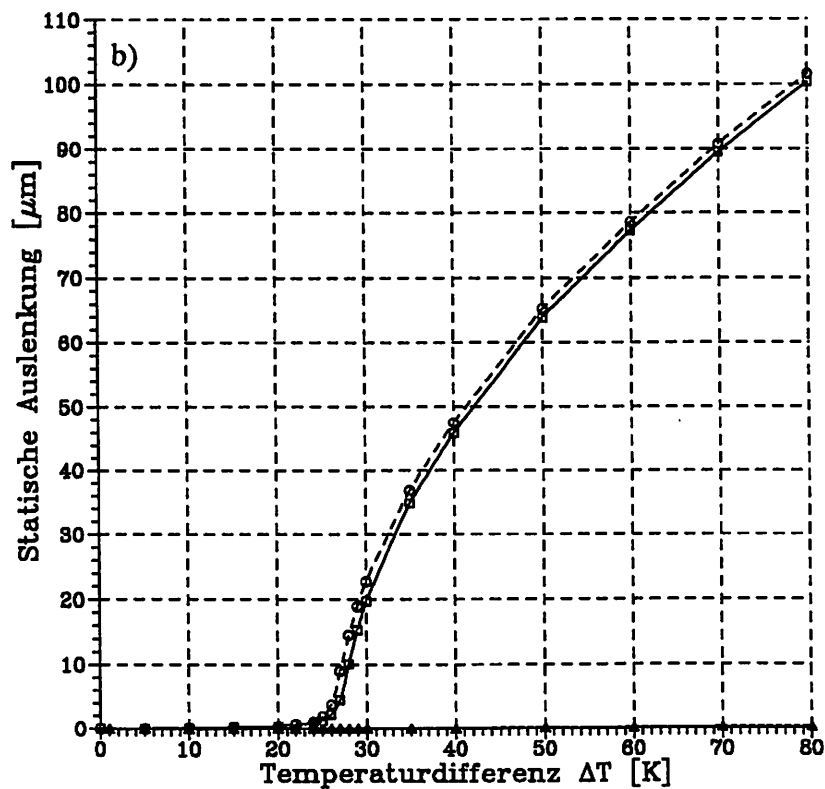
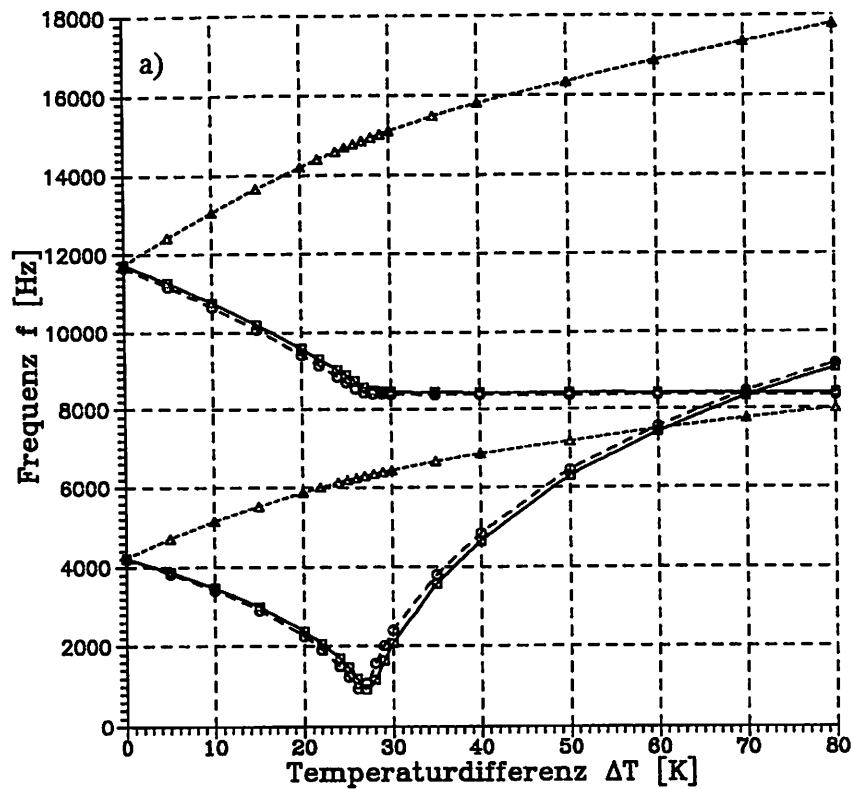
#### *Schichtsystem:*

Um den Einfluß der verschiedenen Schichten auf das Sensorverhalten zu untersuchen, werden drei verschiedene Modelle erstellt und verglichen:

- Silizium-Resonator,
- Silizium-Resonator mit Siliziumdioxidschicht ( $\text{SiO}_2$ ) und
- Silizium-Resonator mit  $\text{SiO}_2$ -Schicht auf Keramikträger.

Dabei werden die zuvor gewonnenen Erkenntnisse eingesetzt. Alle drei Modelle erhalten die Netzfeinheit des 206-Elemente-Modells und es werden temperaturabhängige Materialdaten verwendet. In **Bild 4.6 a) und b)** ist die Resonanzfrequenz und die Auslenkung des Balkens in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für die drei Modelle dargestellt.

Der Einfluß der  $\text{SiO}_2$ -Schicht ist gering. Der Verlauf der Kurven mit und ohne  $\text{SiO}_2$ -Schicht ist annähernd gleich. Betrachtet man die Resonanzfrequenz der Grundmode, stellt man eine Differenz  $< 300$  Hz fest. Die Auslenkung des Balkens unterscheidet sich um ca.  $2 \mu\text{m}$ . Im Gegensatz dazu hat der Keramikträger einen sehr großen Einfluß auf das Sensorverhalten. Die Resonanzfrequenzkurve hat einen deutlich anderen Verlauf. Ausgehend von der Grundfrequenz bei einer Temperaturdifferenz von 0 K, steigt die Resonanzfrequenz des Modells mit Keramikträger sofort an. Im Balken des Sensors bauen sich demzufolge sofort Zugspannungen auf. Vergleicht man die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Materialien, stellt man fest, daß die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik einen ca. 3-fach höheren Wert als Silizium aufweist.



**Bild 4.6:** a) Resonanzfrequenz in Abh. der Temperaturdifferenz b) Auslenkung des Balkens in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ( $\circ$  Si,  $\square$  Si + SiO<sub>2</sub>,  $\triangle$  Si + SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Das hat zur Folge, daß sich der Keramikträger stärker ausdehnt als der Sensor und somit der Balken sofort unter Zugspannungen steht. Aus diesem Grund erfährt der Balken bei diesem Modell nur eine sehr geringe Auslenkung ( $< 0,25 \mu\text{m}$ ).

*Zusammenfassung der Ergebnisse:*

In **Tabelle 4.2** sind die berechneten Simulationsmodelle aufgelistet.

Modell	Materialdaten	Elementierung	Schichten
TU1a	temperaturunabhängig	164	Si
TU1b	temperaturunabhängig	206	Si + SiO <sub>2</sub>
TU1c	temperaturunabhängig	332	Si + SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
TA1a	temperaturabhängig	164	Si
TA1b	temperaturabhängig	206	Si + SiO <sub>2</sub>
TA1c	temperaturabhängig	332	Si + SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
TA2b	temperaturabhängig	824	Si + SiO <sub>2</sub>
TA3b	temperaturabhängig	980	Si + SiO <sub>2</sub>

**Tab 4.2:** Übersicht der berechneten Simulationsmodelle

In **Tabelle 4.3** sind die Resonanzfrequenzen für die Grundmode, die erste Obermode und analytisch berechnete Werte der verschiedenen Simulationsmodelle aufgelistet. Die Frequenzen wurden für eine Temperaturdifferenz von 0°C betrachtet. Zur analytischen Abschätzung wurde Gleichung (3-5) (Abschnitt 3.1.1) verwendet.

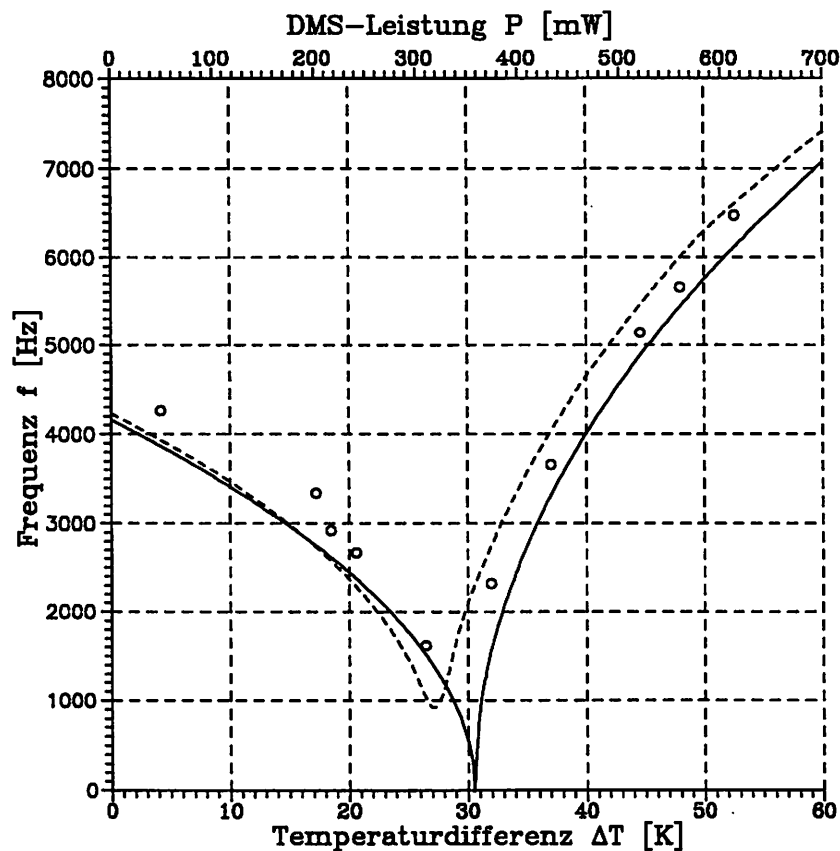
Modell	Grundmode Z1 [Hz]	1. Obermode [Hz] Z2 / Verhältnis Z2:Z1	2.Obermode [Hz] Z3 / Verhältnis Z3:Z1
analytisch	4339	11961 / 2,757	23448 / 5,404
TU1a	4233	11756 / 2,777	23303 / 5,505
TU1b	4258	11827 / 2,778	23444 / 5,506
TU1c	4217	11690 / 2,772	20281 / 4,809
TA1a	4196	11653 / 2,777	23101 / 5,505
TA1b	4223	11727 / 2,777	23247 / 5,505
TA1c	4223	11727 / 2,777	23246 / 5,505
TA2b	4198	11588 / 2,760	22775 / 5,425
TA3b	4195	11568 / 2,757	22701 / 5,411

**Tab. 4.3:** Resonanzfrequenzen verschiedener Simulationsmodelle im Vergleich mit der analytischen Abschätzung

Die Abweichung der Simulationsergebnisse von der analytischen Abschätzung sind für die Grundmode < 3,4 %. Bei der ersten Obermode betragen die Abweichungen < 3,3 %. Die Schwankungen beim Verhältnis der beiden Moden ist < 1 %. Somit kann man festhalten, daß die verwendeten Simulationsmodelle für eine Temperaturdifferenz von 0 K gut mit dem analytischen Ansatz übereinstimmen. Desweiteren kann man festhalten, daß ein relativ grob elementiertes Modell das Schwingungsverhalten des Sensors gut beschreibt. Die Temperaturabhängigkeit der Materialdaten hat einen großen Einfluß auf die Simulationsergebnisse. Daher sollten, soweit dies möglich ist, temperaturabhängige Materialdaten bei der Simulation verwendet werden. Der Einfluß des Keramikträgers verändert das Sensorverhalten grundlegend. Das prinzipielle Sensorverhalten ergibt sich,

aus der Simulation ohne Keramikträger. Zur Beschreibung des Verhaltens des gesamten Sensorsystems ist es dagegen erforderlich, den Keramikträger zu berücksichtigen.

Die Gleichungen (3-7) und (3-8) (Abschnitt 3.1.2) beschreiben analytisch die Änderung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz. Dieser Kurvenverlauf zeigt das prinzipielle thermische Sensorverhalten auf. In **Bild 4.7** ist ein Vergleich zwischen Simulationsergebnissen, Meßergebnissen und dem analytisch an die Meßergebnisse angepaßten Kurvenverlauf aufgetragen.



**Bild 4.7:** Abhängigkeit der Resonanzfrequenz der Grundmode von der Temperaturdifferenz des Sensors (○ Meßpunkte nach [Wie93], --- FEM, — analytisch angepaßt)

## 4.4 Erstellen eines dreidimensionalen Modells

### 4.4.1 Materialdaten

In ANSYS besteht die Möglichkeit, bei dreidimensionalen Modellen den Einfluß anisotroper temperaturabhängiger und -unabhängiger Materialdaten zu berücksichtigen. Bei anisotropen Materialien ist der Elastizitätsmodul abhängig von der Kristallrichtung. Ausgehend vom verallgemeinerten Hookeschen Gesetz  $\sigma_i = c_{ij} \cdot \epsilon_j$  erhält man zur Beschreibung des elastischen Verhaltens eines anisotropen Materials eine 6 x 6 Elastizitätsmatrix. Es läßt sich zeigen, daß diese Matrix symmetrisch ist. Somit benötigt man im allgemeinsten Fall 21 Konstanten, die Elastizitätsmatrix zu besetzen. Bei Kristallen mit hoher Symmetrie gelten zusätzliche Relationen zwischen den Koeffizienten. Außerdem kann bei Festkörpern näherungsweise von isothermen adiabaten Verformungen ausgegangen werden, so daß bei Silizium (kubische Symmetrie) drei unabhängige Konstanten zur Besetzung der Elastizitätsmatrix genügen [Heu89, Nye90]:

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & & & & c_{44} & 0 \\ & & & & & c_{44} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

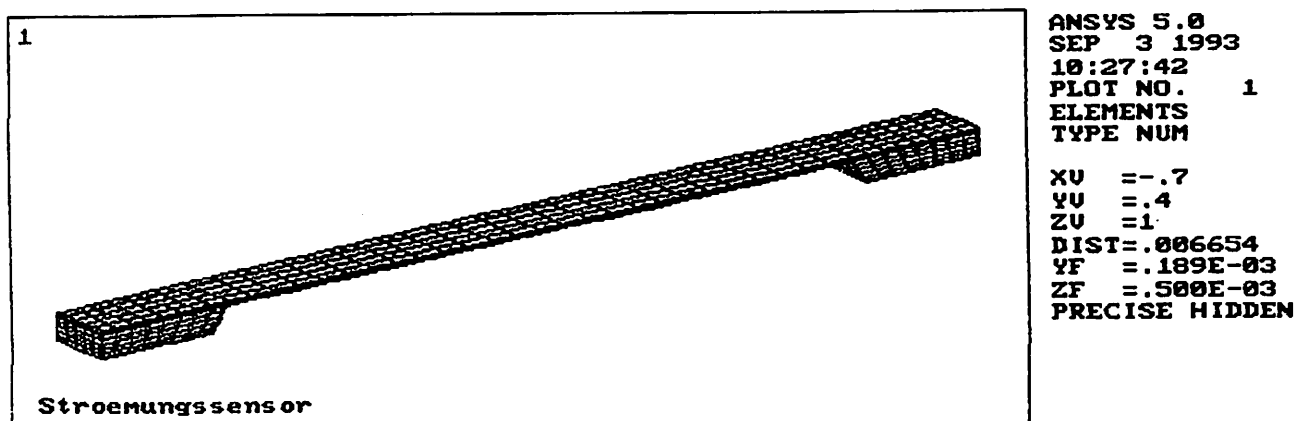
Hierbei sind die  $c_{ij}$  Werte für den Elastizitätsmodul in verschiedenen Kristallrichtungen. In ANSYS gibt es den Elementtyp SOLID64 (STIF64 in ANSYS44A), mit dem das anisotrope Materialverhalten simuliert werden kann. Bei der Definition anisotroper Materialdaten in ANSYS können die Koeffizienten  $c_{ij}$  eingegeben werden. Dies kann auch für verschiedene Temperaturen geschehen, so daß mit temperaturabhängigen anisotropen Elastizitätsmoduln gerechnet werden kann. Die richtungsunabhängigen Materialwerte (z.B. die Dichte) können in üblicher Weise temperaturabhängig oder -unabhängig definiert werden. In **Tabelle 4.4** sind Werte der Koeffizienten  $c_{ij}$  und die nicht richtungsabhängigen Materialwerte für Silizium, wie sie beim dreidimensionalen temperaturunabhängigen Modell verwendet wurden, aufgelistet. Die anisotropen temperaturabhängigen Materialwerte für Silizium sind im Anhang zu finden.

Silizium	Wert	Einheit	Literaturquelle
$c_{11}$	$1,656 \cdot 10^{11}$	[N/m <sup>2</sup> ]	[Bus89]
$c_{12}$	$0,639 \cdot 10^{11}$	[N/m <sup>2</sup> ]	[Bus89]
$c_{44}$	$0,795 \cdot 10^{11}$	[N/m <sup>2</sup> ]	[Bus89]
Dichte	2329	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Bus89]
Wärmeausdehnungs- koeffizient	$2,62 \cdot 10^{-6}$	[1/K]	[Bus89]

**Tab 4.4:** Anisotrope temperaturunabhängige Materialwerte für Silizium

#### 4.4.2 Geometrie

Durch Erweiterung des zweidimensionalen Modells (vgl. Abschnitt 4.2.2) in die dritte Dimension, wurde in ANSYS ein dreidimensionales Modell erstellt. Modelliert wurde der Balken (Länge = 10 mm, Breite = 1 mm, Dicke = 50  $\mu$ m) mit dem Einspannbereich. Dieses Modell berücksichtigt nicht den Siliziumrahmen, da er auf das Schwingungsverhalten des Balkens keinen Einfluß hat. Im wesentlichen sollte mit dem dreidimensionalen Modell der Einfluß der anisotropen Materialdaten auf das Temperaturverhalten des Sensors und die Resonanzfrequenz der Torsionsmode betrachtet werden. Der Einfluß des Keramikträgers und der SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde nicht berücksichtigt. In **Bild 4.8** ist das dreidimensionale Modell dargestellt.



**Bild 4.8:** Darstellung des dreidimensionalen Simulationsmodells



#### 4.4.3 Randbedingungen

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens wird der Sensor mit einer konstanten homogenen Temperatur beaufschlagt. Die Temperatur ist bei dem verwendeten Elementtyp kein Freiheitsgrad, so daß sie als Last definiert werden muß. Die Einspannung erfolgt an der Unterseite des Sensors. Dabei werden die Verschiebungsfreiheitsgrade der Knoten an der Unterseite des Sensors (vgl. Bild 4.8) festgehalten.

#### 4.5 Interpretation der Berechnungsergebnisse

##### *Materialdaten*

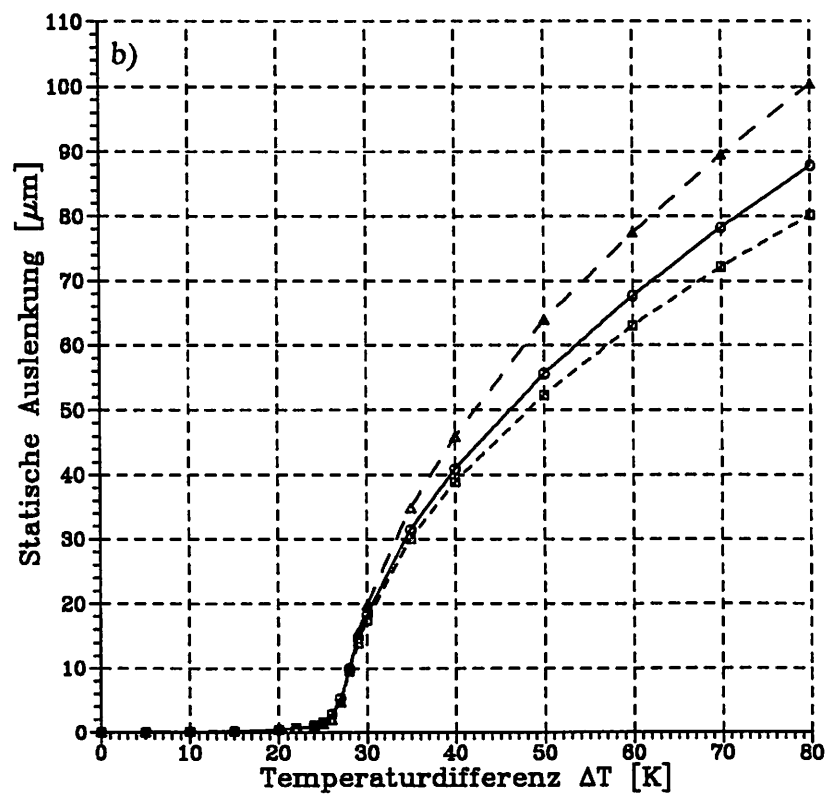
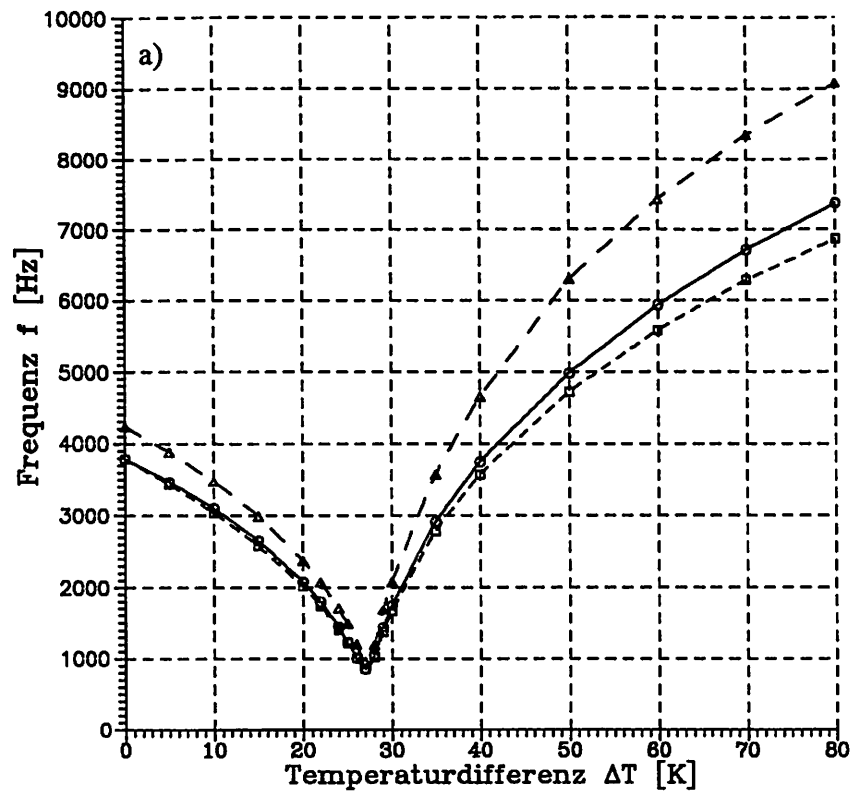
In Bild 4.9 a) und b) ist der Verlauf der Resonanzfrequenz der Grundmode und die Auslenkung der Balkenmitte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für verschiedene Materialdaten dargestellt. Verwendet wurden temperaturabhängige isotrope, temperaturunabhängige anisotrope und temperaturabhängige anisotrope Materialdaten für Silizium.

Die Resonanzfrequenz und die Auslenkung der Balkenmitte zeigen bei anisotropen Materialdaten deutlich geringere Werte als bei isotropen. Die Werte für anisotrope temperaturabhängige Materialdaten liegen etwas höher als die Werte für anisotrope temperaturunabhängige Materialdaten. Somit ist es für ein exaktes dreidimensionales Modell erforderlich, mit temperaturabhängigen anisotropen Materialdaten zu rechnen.

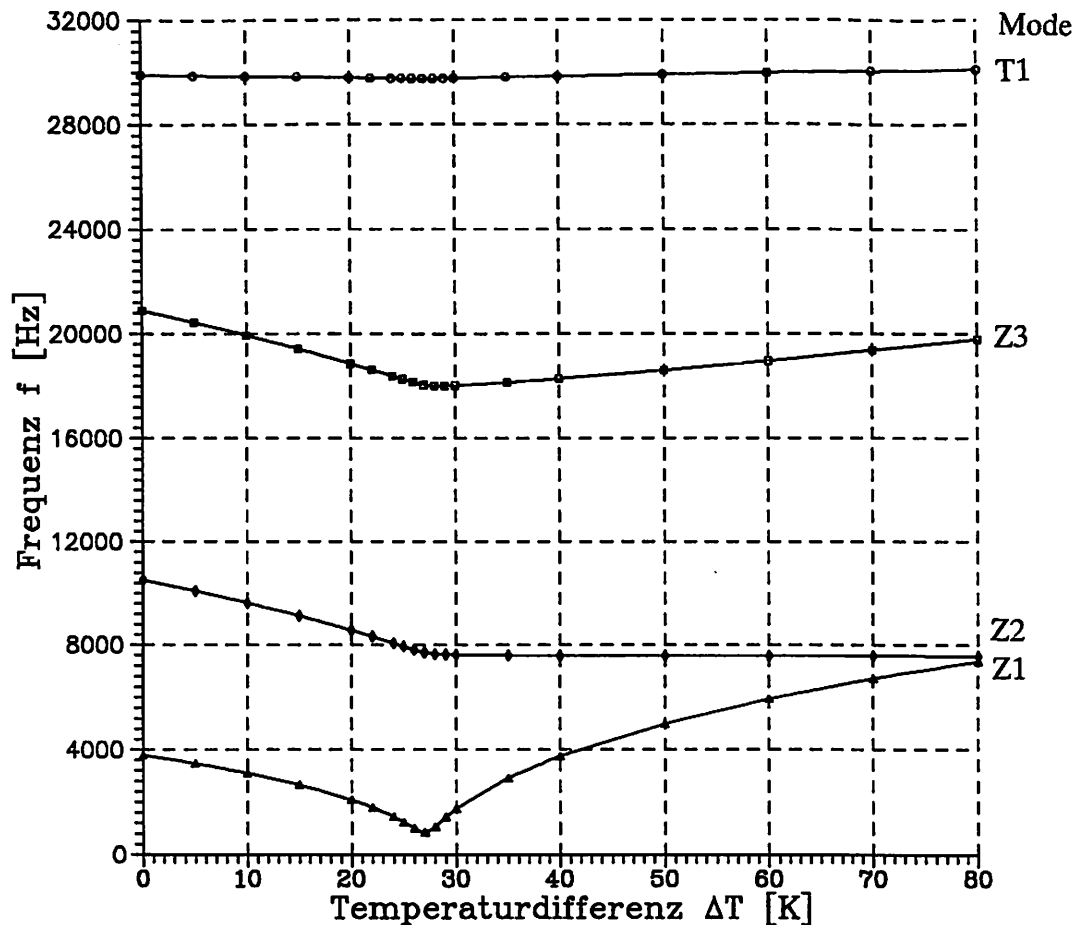
##### *Torsionsmode*

In Bild 4.10 sind die ersten drei Biegeschwingungsmoden und die erste Torsionsmode T1 in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz dargestellt. Berechnet wurden diese Kurvenverläufe mit temperaturabhängigen anisotropen Materialdaten.

Die drei Biegeschwingungsmoden zeigen das vom zweidimensionalen Modell bekannte Verhalten. Die erste Torsionsmode zeigt ganz schwach den V-förmigen Verlauf. Allerdings ist die Temperaturabhängigkeit dieser Schwingungsform sehr gering. Ein Grund dafür könnte sein, daß der Balken eine hohe Torsionssteifigkeit aufweist und deshalb auf die Spannungsänderungen infolge der Temperaturunterschiede nur schwach reagiert.



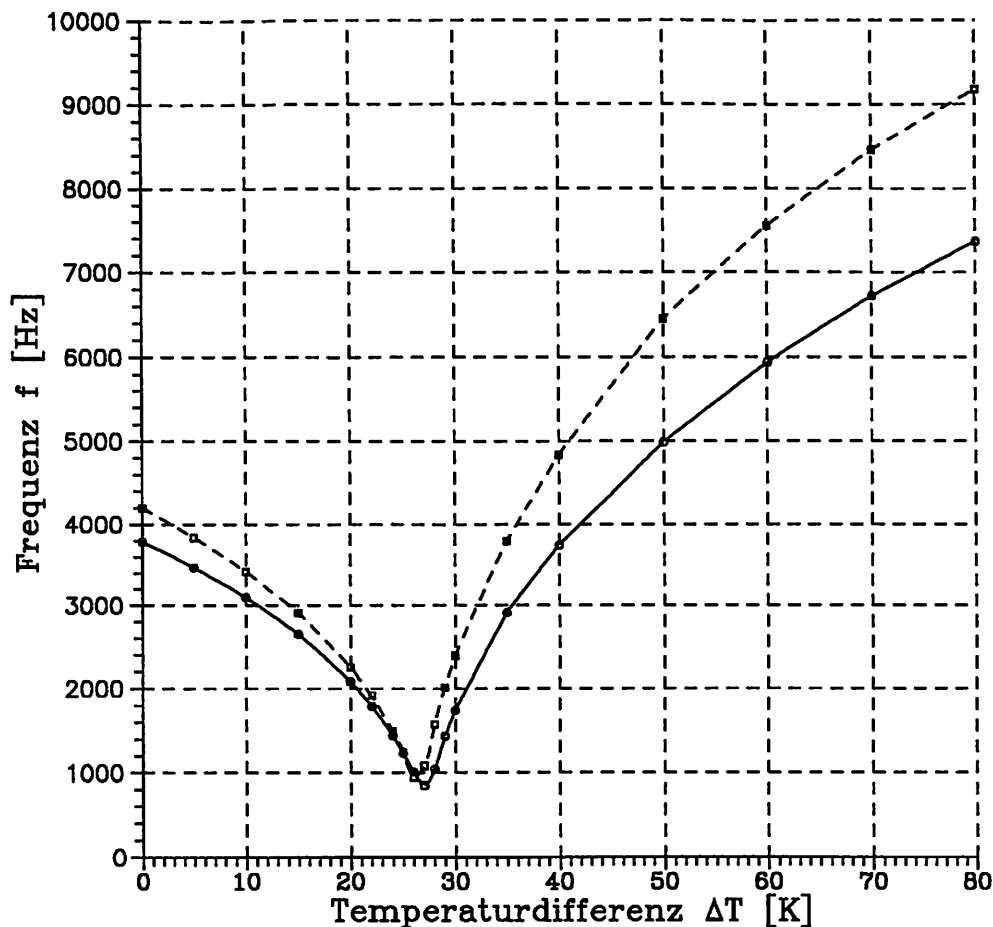
**Bild 4.9:** a) Resonanzfrequenz der Grundmode b) Auslenkung in Balkenmitte  
 ( $\Delta$  tempabh. isotrop,  $\square$  tempunabh. anisotrop,  $\circ$  tempabh. anisotrop)



**Bild 4.10:** Darstellung der ersten drei Biegeschwingungsmoden und der ersten Torsionsmode in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

#### *Vergleich mit dem zweidimensionalen Modell*

Das anisotrope Materialverhalten von Silizium kann nur mit einem dreidimensionalen Modell simuliert werden. Verwendet man ein zweidimensionales Modell, muß man mit isotropen Materialdaten rechnen und erhält fehlerbehaftete Ergebnisse. Um die Größenordnung des Fehlers abzuschätzen wurde die Ergebnisse des zweidimensionalen mit denen des dreidimensionalen Modells verglichen. In **Bild 4.11** ist die Resonanzfrequenz der Grundmode in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für das zwei- und das dreidimensionale Modell dargestellt. Bei beiden Modellen wurde die  $\text{SiO}_2$ -Schicht und der Keramikträger vernachlässigt.



**Bild 4.11:** Vergleich von zwei- und dreidimensionalem Modell.  $\text{SiO}_2$ -Schicht und Keramikträger vernachlässigt ( $\square$  zweidimensional, isotrop  $\circ$  dreidimensional, anisotrop)

Die Frequenzen beim zweidimensionalen Modell liegen aufgrund der isotropen Materialdaten etwas höher als beim dreidimensionalen Modell, was auf eine erhöhte Steifigkeit schließen lässt. Bei einer Temperaturdifferenz von 80 K beträgt der Unterschied ca. 1800 Hz bzw. 24 %. Im Bereich der kritischen Temperatur ist der Unterschied nicht so groß, je größer aber die Temperaturdifferenz wird, desto größer wird der Fehler.

*falsch, das Element koordinatensystem  
nicht  $45^\circ$  verdreht wurde.*

## Zusammenfassung der Ergebnisse

In **Tabelle 4.5** sind die berechneten Modelle aufgelistet.

Modell	Materialdaten	Elementzahl	Schichten
2DISOTA	isotrop/temperaturabhängig	164	Si
3DISOTA	isotrop/temperaturabhängig	820	Si
3DAISTU	anisotrop/temperaturunabhängig	820	Si
3DAISTA	anisotrop/temperaturabhängig	820	Si

**Tab 4.5:** Übersicht der berechneten Simulationsmodelle

In **Tabelle 4.6** sind die Resonanzfrequenzen der ersten drei Biegeschwingungsmoden und der Torsionsmode aufgelistet und mit analytisch berechneten Werten verglichen. Sie wurden für eine Temperaturdifferenz von 0 K berechnet. Die analytische Betrachtung erfolgte anhand der Gleichung (3-5), (Abschnitt 3.1.1).

Modell	Grundmode Z1 [Hz]	1. Obermode Z2 [Hz] / Z2:Z1	2. Obermode Z3 [Hz] / Z3:Z1	Torsionsmode T1 [Hz]
analytisch	4339	11961 / 2,757	23448 / 5,404	29136 [Ble84]
2DISOTA	4196	11653 / 2,777	23101 / 5,505	—
3DISOTA	4227	11739 / 2,777	23274 / 5,506	29740
3DAISTU	3783	10512 / 2,779	20890 / 5,522	29914
3DAISTA	3783	10512 / 2,779	20890 / 5,522	29911

**Tab. 4.6:** Resonanzfrequenzen verschiedener Moden im Vergleich mit der analytischen Berechnung

Die Abweichungen der Simulationsergebnisse von der analytischen Berechnung sind bei der Grundmode < 15 %, bei der ersten Obermode < 14 % und bei der zweiten Obermode < 13 %. Betrachtet man den Unterschied der Frequenzen zwischen isotropen und

anisotropen Materialdaten stellt man Abweichungen für die Grundmode von  $< 12 \%$ , für die ersten Obermode  $< 12 \%$ , bei der zweiten Obermode  $< 12 \%$  und für die Torsionsmode  $< 1 \%$  fest. Der Unterschied zwischen analytischer Betrachtung und dreidimensionalem Modell mit anisotropen temperaturabhängigen Materialdaten entsteht durch die Verwendung unterschiedlicher Materialdaten. Somit stimmt das analytisch Modell mit dem Simulationsmodell sehr gut überein, wenn man den Fehler von  $12 \%$  berücksichtigt, der durch das Verwenden von isotropen Materialdaten entsteht. Die Torsionsmode liegt bei etwa  $30 \text{ kHz}$  und ist weitgehend unempfindlich gegenüber Temperaturänderungen.

## **5 Kopplung der Programmpakete ANSYS und FIDAP**

### **5.1 Beschreibung der Schnittstellen**

Zur Bestimmung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit muß eine gekoppelte Feldberechnung durchgeführt werden. Dabei ist das strömungsmechanische mit dem strukturellen Modell zu koppeln. Entsprechende Schnittstellen sind in ANSYS und FIDAP implementiert.

#### **ANSYS**

In ANSYS existiert eine Schnittstelle zur Übertragung von Geometriedaten und Randbedingungen an FIDAP. Mit dem Programm ANSFID, das als Zusatzroutine in ANSYS zur Verfügung steht, wird aus den ANSYS-Daten eine Datei (FIMESH) erzeugt, die in FIDAP eingelesen werden kann. Dabei ist entscheidend an welche FIDAP-Version die ANSYS-Schnittstelle angepaßt ist. Für die derzeit eingesetzte Version FIDAP 6.04, existiert eine Schnittstelle in ANSYS44A. Mit dem Befehl 'cdwrite' werden in ANSYS die Modelldaten in eine Datei (FILE28) geschrieben [AUM89]. Diese Datei wird von dem Programm ANSFID benötigt um die Datei 'FIMESH' zu erzeugen.

Bei der Benutzung der ANSYS/FIDAP-Schnittstelle sind folgende Dinge zu beachten:

- Es dürfen nur bestimmte Elemente in ANSYS verwendet werden.
- Elementgruppen die man später in FIDAP benutzen möchte, sollten schon in ANSYS definiert werden.
- Die Knoten- und Elementnumerierung muß fortlaufend sein (1 bis n).

In **Tabelle 5.1** sind FIDAP-Elementtypen und die in ANSYS entsprechenden Elementtypen aufgelistet.

<b>FIDAP-Elementtyp</b>	<b>ANSYS-Elementtyp</b>
2- oder 3-Knoten Linienelement	STIF1
3-Knoten Dreieckelement	STIF42 (Dreieck)
7-Knoten Dreieckelement	STIF2
4-Knoten Viereckelement	STIF42
9-Knoten Viereckelement	STIF82
4-Knoten Tetraederelement	STIF45 (Tetraeder)
10-Knoten Tetraederelement	STIF92
6-Knoten Keilelement	STIF45 (Prisma)
8-Knoten Quaderelement	STIF45

**Tab. 5.1:** Elementtypen in FIDAP und korrespondierende Elementtypen in ANSYS

In FIDAP ist es sinnvoll, verschiedene Elementgruppen zu definieren. Diese Gruppen werden später benutzt, um Elemente selektiv auswählen zu können. Erstellt man ein Simulationsmodell mit ANSYS, sollten diese Gruppen schon in ANSYS definiert werden. Elemente werden verschiedenen Gruppen zugewiesen, indem man sie verschiedenen 'Real-Sets' zuweist [AUM89]. Die Elemente der verschiedenen 'Real-Sets' werden von dem Programm ANSFID erkannt und in FIDAP-Elementgruppen zusammengefaßt.

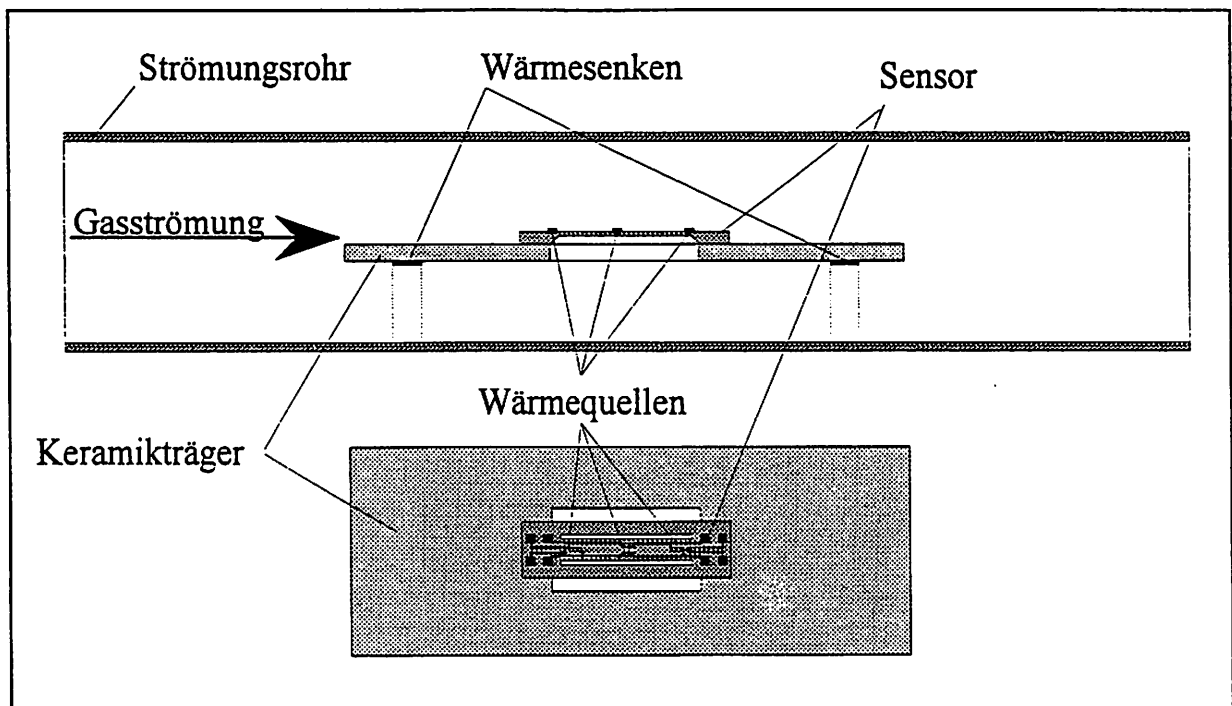


## FIDAP

In FIDAP existiert eine Schnittstelle über die Berechnungsergebnisse knotenweise an ANSYS übertragen werden können. Mit dem FIDAP-Befehl 'neutral' können z.B Knotentemperaturen in einer für ANSYS lesbaren Form in eine Datei geschrieben werden. Dabei muß man darauf achten, welche ANSYS-Version von der FIDAP-Schnittstelle unterstützt wird. FIDAP 6.04 unterstützt ANSYS bis Version 4.4A. Da für die strukturellen Berechnungen ANSYS 5.0 verwendet wurde, mußte die 'neutral-Datei' mit Hilfe des UNIX-Hilfsprogramms 'awk' konvertiert werden.

### 5.2 Entwicklung eines Simulationsmodells

Für die gekoppelte Berechnung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung ist es erforderlich, ein Modell zu entwickeln, das sowohl zur strömungsmechanischen als auch zur strukturellen Simulation geeignet ist. In **Bild 5.1** ist schematisch der Aufbau des Modells dargestellt.



**Bild 5.1:** Schematische Darstellung des Simulationsmodells für Fluid-Struktur-Berechnungen

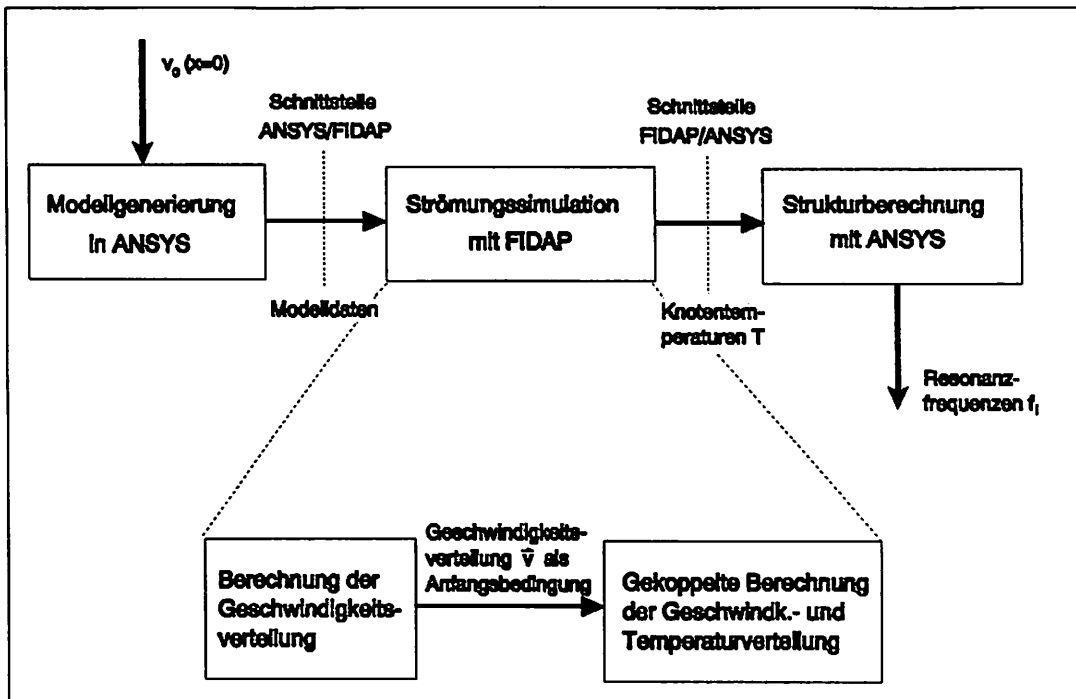
Durch die Größenordnungsunterschiede der Sensorabmessungen entsteht bei der Vernetzung das Problem, genügend gute Aspektverhältnisse bei den Elementen zu erreichen. Der Rohrdurchmesser beträgt 24 mm, der Balken dagegen ist nur 50  $\mu\text{m}$  dick. Zur Vermeidung numerischer Schwierigkeiten, muß eine Grenzsicht um den Sensor herum sehr fein vernetzt werden, da in diesem Bereich z.B. sehr hohe Druckgradienten auftreten.

Bei der Generierung dieses Modells wurden 8 Elementgruppen definiert:

- Elemente, die das Gas repräsentieren,
- Elemente, die den Siliziumsensor beschreiben,
- Keramikträger-Elemente,
- Elemente, die die Wärmequelle in Balkenmitte beschreiben,
- Elemente, die die Wärmequellen am Balkenrand beschreiben,
- Linienelemente über den gesamten Einströmbereich des Rohres,
- Linienelemente über den gesamten Ausströmbereich des Rohres und
- Linienelemente, die die Sensoroberfläche bedecken.

Die einzelnen Gruppen wurden definiert um Randbedingungen, Anfangsbedingungen und Materialdaten besser zuweisen zu können und um diese Elemente im Postprozessor einzeln ansprechen zu können.

Zur Durchführung der gekoppelten Berechnung müssen die Programme ANSYS und FIDAP gekoppelt werden. In **Bild 5.2** ist die Kopplung der Programmpaket schematisch dargestellt. Die Modellgenerierung erfolgt in ANSYS. Über die Schnittstelle ANSFID werden die Geometriedaten und Randbedingungen an FIDAP übergeben. In FIDAP erfolgt die Strömungssimulation, die in zwei Teile aufgespalten ist. Zuerst wird die Geschwindigkeitsverteilung des Gases im Rohr berechnet. Diese Geschwindigkeitsverteilung wird dann als Anfangsbedingung zur Berechnung der Temperaturverteilung im Rohr in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsverteilung benutzt. Die errechnete Temperaturverteilung im Resonator wird mit dem Befehl 'neutral' an ANSYS übertragen. In ANSYS wird mit dieser Temperaturverteilung ein statischer Rechenlauf zur Berechnung der Verspannung des Sensors durchgeführt. Für diesen verspannten Sensor werden abschließend die Resonanzfrequenzen verschiedener Biegeschwingungsmoden berechnet. Die Kopplung von Fluid- und Strukturmechanik erfolgt also über die Temperatur. Der Einfluß der Fluidkräfte auf den Resonator wird nicht berücksichtigt.



**Bild 5.2:** Strategie zur gekoppelten Berechnung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung mit den Programmpaketen ANSYS und FIDAP

## 6 Strömungsmechanische Modellbildung

### 6.1 Problemstellung

Bei der strömungsmechanischen Simulation soll die Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsverteilung berechnet werden. Dabei müssen zum einen die thermischen Effekte (Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung) und zum anderen die Gasströmung (Geschwindigkeitsverteilung) richtig abgebildet werden. Über die Randbedingungen besteht dabei in FIDAP die Möglichkeit das Modell der Realität anzupassen und die Ergebnisse zu beeinflussen. Nachfolgend sind die Randbedingungen, die definiert wurden, aufgelistet:

- Eintrittsgeschwindigkeit des Gases am Rohranfang,
- Geschwindigkeit des Gases an der Rohrwand und der Sensoroberfläche,
- Gastemperatur am Rohranfang,
- Temperatur der Rohrwand,
- Größe und Ort der Wärmequellen und
- Größe und Ort der Wärmesenken.

Über die Befehlseingabe gibt es in FIDAP die Möglichkeit, die Gleichungen, die bei der Simulation gelöst werden, zu beeinflussen. Außerdem hat die Vernetzung des Modells einen Einfluß auf die Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung. Es gibt also einige Modellparameter, die bei der Strömungssimulation variiert werden können und deren Einfluß anhand verschiedener Modelle untersucht werden sollte.

### 6.2 Modellerstellung

#### 6.2.1 Materialdaten

Bei der strömungsmechanischen Simulation wurde ein zweidimensionales Modell verwendet, da der Rechenaufwand bei einer dreidimensionalen Strömungsberechnung zu groß wäre. Aus diesem Grunde wurden beim strömungsmechanischen Modell für Silizium isotope temperaturunabhängige Materialdaten verwendet. Als strömendes Gas wurde Luft verwendet. Die Materialdaten für Luft und Keramik wurden temperaturunabhängig benutzt. In **Tabelle 6.1** sind die Materialdaten von Luft, Silizium und Keramik ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aufgelistet.

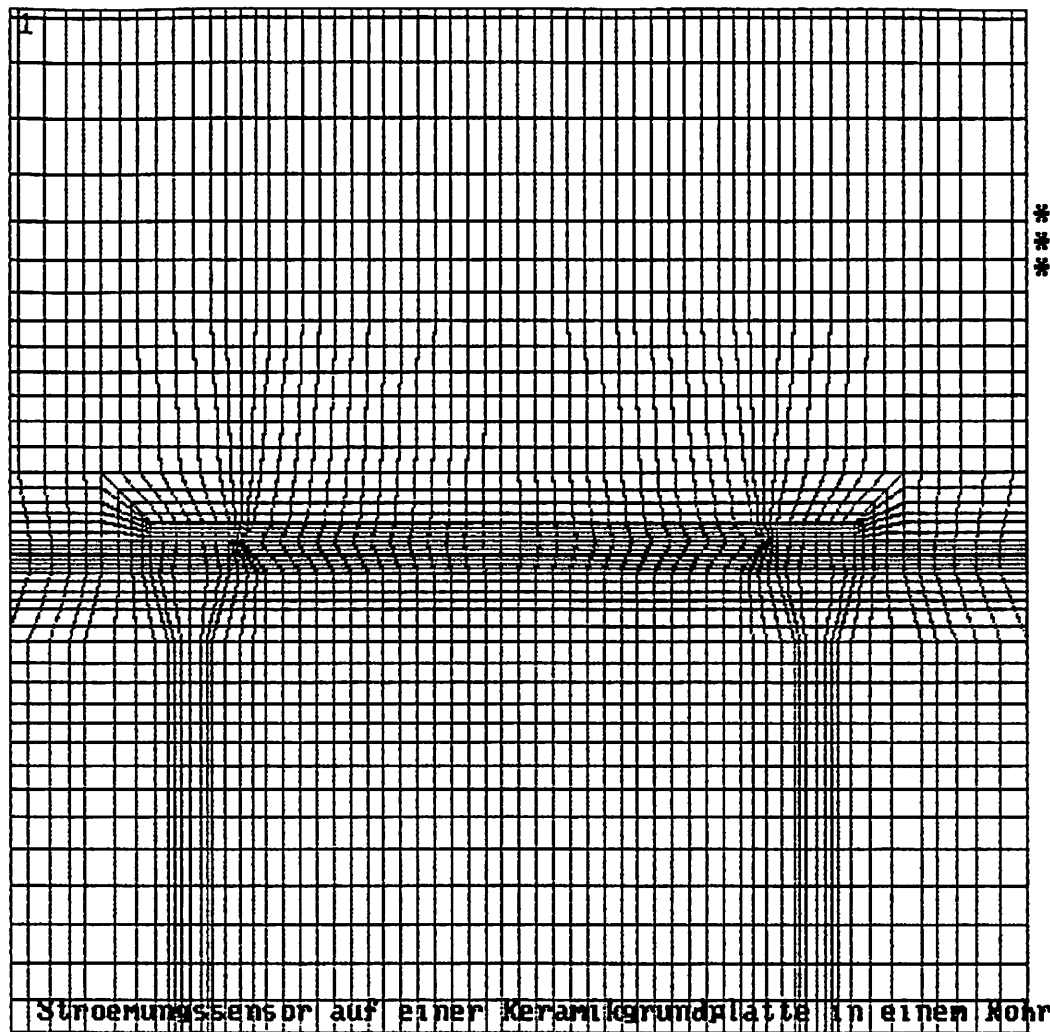
Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	kinem. Viskosität [m <sup>2</sup> /s]	Literaturquelle
Luft	1,2	1007	0,026	$15 \cdot 10^{-6}$	[Dub87]
Silizium	2329	703	156	----	[Büt91]
Keramik (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3240	645	20	----	[Gro92]

**Tab 6.1:** Materialdaten von Luft, Silizium und Keramik für die Strömungssimulation

### 6.2.2 Geometrie

Zur strömungsmechanischen Simulation wurde der in Bild 5.1 (Abschnitt 5.2) dargestellte Aufbau modelliert. In einem Randbereich um den Sensor herum treten bei der Strömungsberechnung hohe Gradienten auf. Aus diesem Grund wurde dieser Bereich feiner vernetzt. Bei der Elementierung ist allgemein darauf zu achten, daß das Aspektverhältnis der Elemente, die die Strömung beschreiben (Materialdaten von Luft), nicht zu groß wird, da sonst numerische Schwierigkeiten bei der Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung auftreten.

Der Keramikträger wurde ohne die Aussparung unterhalb des Balkens modelliert. Somit wird die Strömung an der Unterseite des Balkens nicht berücksichtigt, was jedoch geringfügige Auswirkungen auf die Strömung hat. In **Bild 6.1** ist die Vernetzung des strömungsmechanischen Modells im Bereich des Sensors dargestellt.



ANSYS 4.4A  
 AUG 31 1993  
 15:31:33  
 PREP7 ELEMENTS  
 MAT NUM

ZU =1  
 \*DIST=0.010179  
 \*XF =0.325E-03  
 \*YF =0.012003

**Bild 6.1:** Darstellung der Vernetzung des strömungsmechanischen Modells (Ausschnitt) im Bereich des Sensors

### 6.2.3 Randbedingungen

Die Einstömgeschwindigkeit der Luft am Rohreintritt wurde über die Belegung von Freiheitsgraden festgelegt. Die Geschwindigkeit über den gesamten Rohreintritt ist dabei konstant. Über die Strömungsverhältnisse (laminar/turbulent) im Rohr gibt die Reynoldszahl  $Re$  Aufschluß. In einem kreisrunden Rohr hat man für  $Re < 2320$  laminare Strömung [Sig91]. Die Reynoldszahl ist abhängig von der Dichte  $\rho$ , der Fluidgeschwindigkeit  $v$ , der charakteristischen Länge  $L$  und der dynamischen Viskosität  $\eta$  und ist folgendermaßen definiert:

$$Re = \frac{\rho \cdot L \cdot v}{\eta} \quad (6-1)$$

Für die hier betrachtete Luftströmung in einem Rohr (charakteristische Länge  $L$  = Rohrdurchmesser = 24 mm) ergibt sich bis zu einer Geschwindigkeit von 1,46 m/s eine laminare Strömung. Näherungsweise kann man also im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und 2 m/s von einer laminaren Strömung ausgehen. Oberhalb von 1,46 m/s müßte die Strömung eigentlich turbulent berechnet werden. Da der Simulationsaufwand bei der turbulenten Strömungssimulation jedoch sehr groß ist und die Anwendung des betrachteten Sensors im Geschwindigkeitsbereich  $< 1$  m/s liegt, wurde laminar gerechnet. An der Rohrwand wurde Haftung (Strömungsgeschwindigkeit:  $v = 0$  m/s) angenommen, so daß sich eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung einstellt. An der gesamten Sensor- und Keramikoberfläche wurde ebenfalls Haftung definiert.

Die Anfangstemperatur der Luft wurde auf 20°C festgelegt. Die Temperatur der Rohrwand wurde auf 20°C konstant festgehalten. Zur Simulation der Wärmequellen wurden drei Elemente definiert, die sich am Rand und in der Mitte des Balkens befinden. Diese Elemente wurden mit Hilfe des Befehls 'source' als konstante Wärmequellen modelliert [FUM91]. Dabei kann der Betrag der pro Fläche erzeugten Wärmemenge eingegeben und variiert werden.

Der Keramikträger mit dem Sensor ist im realen Aufbau auf zwei Metallstiften gelagert, die zunächst eine undefinierte Wärmesenke darstellen. Zur Untersuchung des Einflusses von Wärmesenken an der Unterseite des Keramikträgers wurden im Bereich der Lagerungsstellen die Temperaturen an den Knoten auf 20°C konstant festgehalten und somit Wärmesenken simuliert.

## 6.3 Interpretation der Berechnungsergebnisse

### *Temperaturverteilung ohne Strömung*

Die Temperaturverteilung an der Sensoroberfläche hängt sehr stark von den definierten thermischen Randbedingungen bei der Simulation ab. Zur Bestimmung der Temperaturverteilung an der Sensoroberfläche wurden bei der Fa. Bizerba in Balingen Thermographiemessungen der Sensoroberfläche mit einer Infrarotkamera durchgeführt. Dabei ist zu beachten, daß diese Kamera nur ungenaue Ergebnisse liefert. Zum einen ist die Orts- und Temperaturlösung der Kamera sehr gering und zum anderen wurde der Emissionskoeffizient von Silizium (0,6) verwendet, obwohl sich auch andere Materialien auf der Sensoroberfläche befinden.

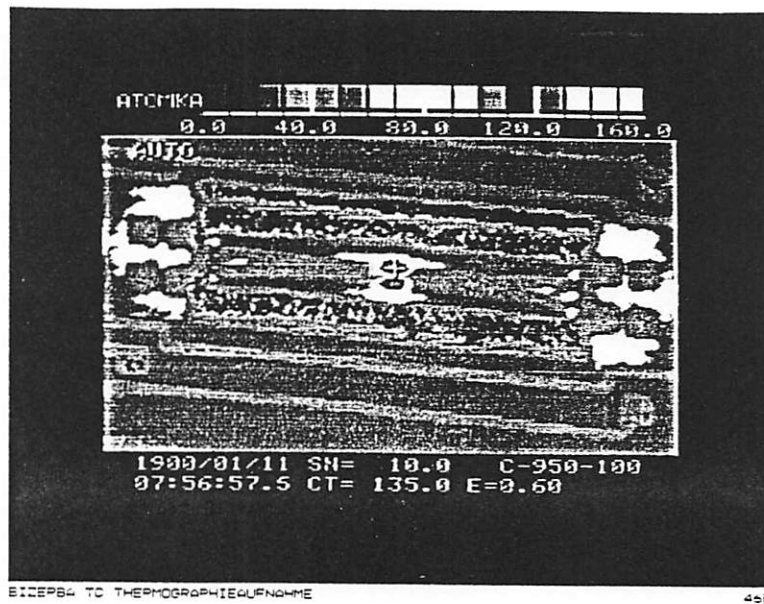
Bei diesen Messungen wurde die DMS-Leistung des Sensors variiert, um die Temperaturverteilung bei verschiedenen Betriebszuständen zu ermitteln. Als Halterung für den Sensoraufbau wurden verschiedene Materialien mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften verwendet. Auf diese Art konnte der Einfluß verschiedener Wärmesenken untersucht werden. In **Bild 6.2** ist eine Thermographief Aufnahme des Sensors ( $P_{\text{DMS}} = 600 \text{ mW}$ ,  $P_{\text{Heiz}} = 180 \text{ mW}$ ) dargestellt. Der Keramikträger wurde nur an einem Ende befestigt, so daß der Sensor und der Großteil des Keramikträgers sich frei in Luft befanden. Diese Befestigung stellt eine kleine Wärmesenke dar.

Aus dieser Thermographief Aufnahme wurden entlang der Sensormittellinie die Temperaturen ausgelesen und in einem Diagramm aufgetragen. In **Bild 6.3** ist die Temperaturverteilung entlang der Sensormittellinie dargestellt.

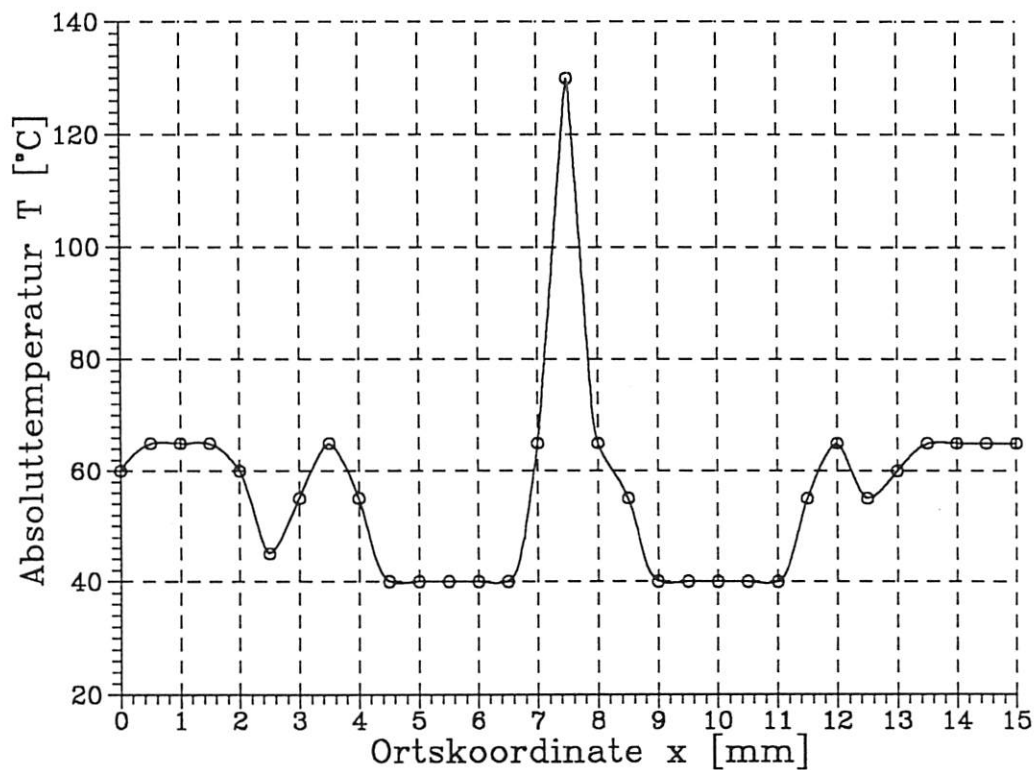
Bei der Simulation wurde versucht diese Temperaturverteilung durch Variation der Wärmequellen und -senken nachzubilden. In **Bild 6.4** sind die in FIDAP berechneten Temperaturverteilungen dargestellt. Es wurden folgende Modelle berechnet:

- mit Wärmesenken, Wärmequellen:  $5 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$  in Sensormitte,  $3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$  am Sensorrand
- ohne Wärmesenken, Wärmequellen:  $2,7 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$  in Sensormitte,  $0,8 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$  am Sensorrand



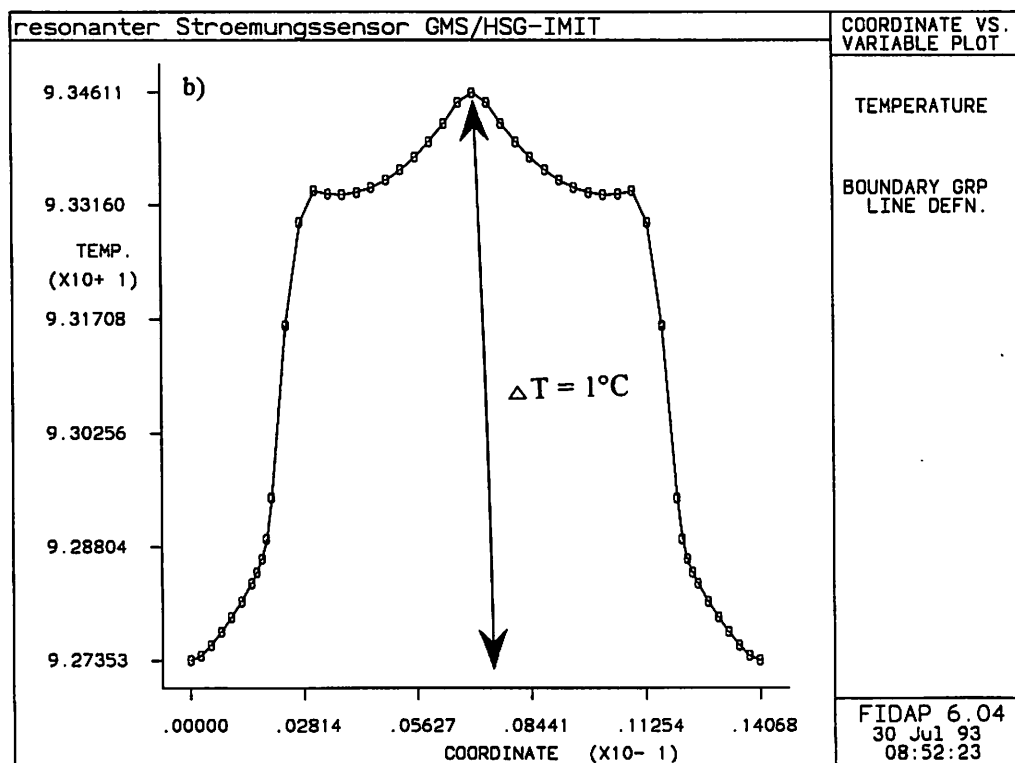
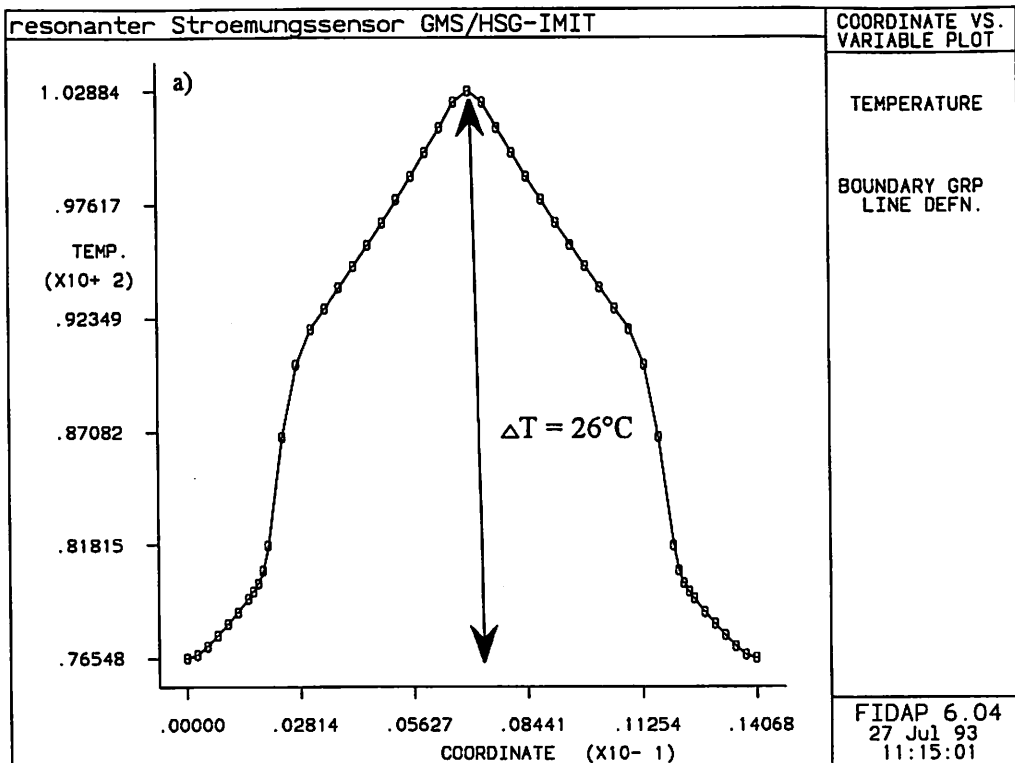


**Bild 6.2:** Thermographieaufnahme des Sensors bei freier Befestigung des Keramikträgers ( $P_{\text{DMS}} = 600 \text{ mW}$ ,  $P_{\text{Heiz}} = 180 \text{ mW}$ )



**Bild 6.3:** Gemessene Temperaturverteilung entlang der Sensormittellinie bei freischwebendem Sensor ( $P_{\text{DMS}} = 600 \text{ mW}$ ,  $P_{\text{Heiz}} = 180 \text{ mW}$ )

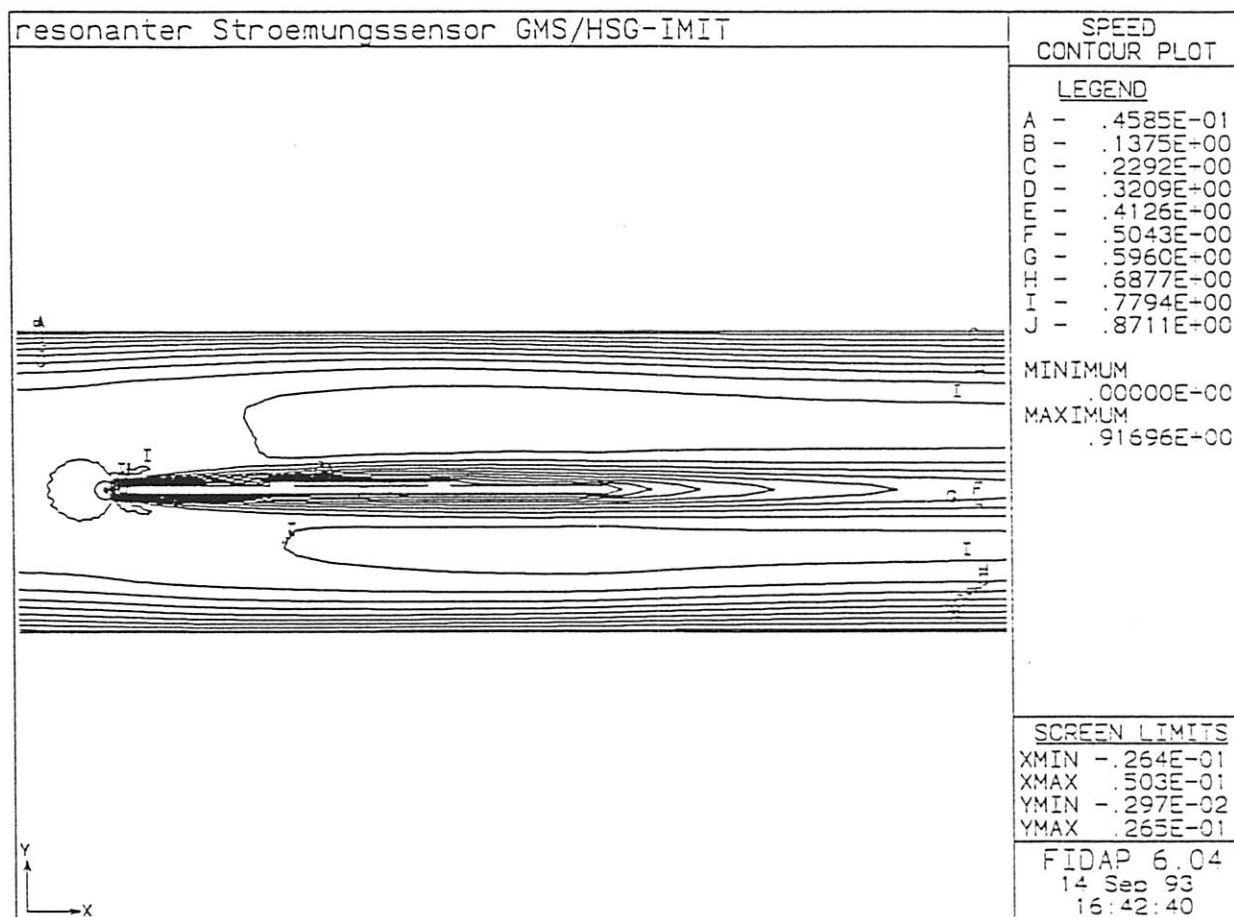
Bei dem Modell mit Wärmesenken mußten größere Wärmequellen definiert werden, um die gleichen Sensortemperaturen zu erhalten. Im Anhang sind weitere berechnete Temperaturverteilungen für verschiedene Modellparameter abgebildet.



**Bild 6.4:** Temperaturverteilung: a) Wärmesenken, Wärmequellen:  $5 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ ,  $3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ . b) Wärmequellen  $2,7 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$ ,  $0,8 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$

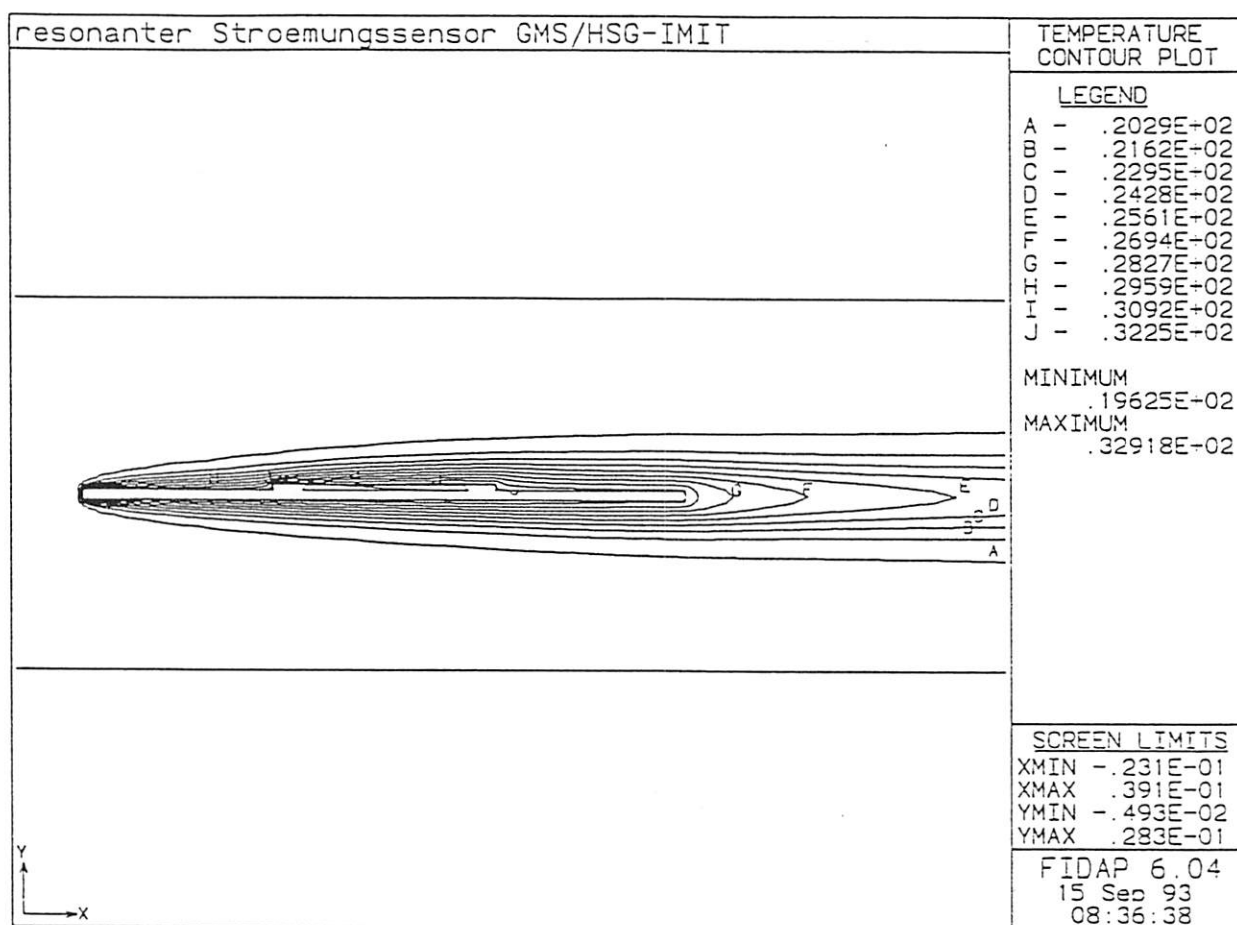
### Temperaturverteilung infolge Luftströmung

Bei der Strömungssimulation wird zunächst die Geschwindigkeitsverteilung der Luft berechnet, bevor in einem zweiten Berechnungsschritt die Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsverteilung ermittelt wird. Bei dem ersten Berechnungsschritt wird die Zähigkeit des strömenden Mediums (Luft) über die Befehlseingabe 'icnode(velo=stokes)' so hoch gesetzt, daß die elementspezifische Reynoldszahl kleine Werte annimmt [FUM91]. Auf diese Weise erhält man eine sehr gute Geschwindigkeitsverteilung, die numerisch problemlos berechnet werden kann. Bei der Berechnung der Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsverteilung wird wieder mit der realen Zähigkeit gerechnet. In **Bild 6.5** ist die Geschwindigkeitsverteilung bei einer Anfangsgeschwindigkeit am Rohreintritt von 0,6 m/s dargestellt.



**Bild 6.5:** Berechnete Geschwindigkeitsverteilung bei einer Anfangsgeschwindigkeit am Rohreintritt von 0,6 m/s

In **Bild 6.6** ist die Temperaturverteilung, die sich infolge der in Bild 6.5 gezeigten Geschwindigkeitsverteilung einstellt, dargestellt.



**Bild 6.6:** Temperaturverteilung im Strömungsrohr bei einer Geschwindigkeit am Rohreintritt von 0,6 m/s

## 7 Kopplung der strömungs- und strukturmechanischen Modelle

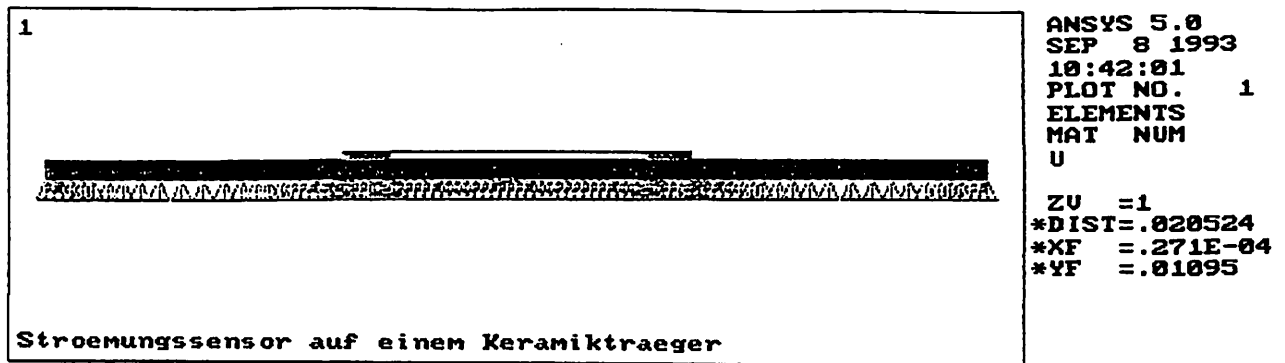
### 7.1 Problemstellung

Bei der rein strukturmechanischen Simulation wurden die Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz berechnet (Kap. 4). Dabei wurden homogene Temperaturverteilungen definiert. Zur Berechnung der Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit müssen Temperaturverteilungen, die sich infolge der Strömung einstellen, verwendet werden. In Kapitel 6 wurde beschrieben, wie diese Temperaturverteilungen in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden. Verwendet man diese Temperaturverteilungen bei der strukturmechanischen Simulation, erhält man die Resonanzfrequenzen für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten. Trägt man die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit auf, so erhält man die Sensorkennlinie.

### 7.2 Modellerstellung

Das geometrische, zweidimensionale Modell, das in ANSYS für die strömungsmechanische Simulation erstellt wurde, wird für die strukturmechanische Simulation in ANSYS übernommen (vgl. Kapitel 5). Da die in FIDAP berechneten Temperaturverteilungen knotenweise an das strukturmechanische Modell übertragen werden, ist es zwingend, daß die Knotennumerierung beider Modelle identisch ist. Im Gegensatz zur strömungsmechanischen Simulation betrachtet man bei der strukturmechanischen Simulation nur den Sensor mit dem Keramikträger, d.h. das umströmende Gas wird vernachlässigt.

Die Randbedingungen unterscheiden sich beim strömungs- und strukturmechanischen Modell. Beim strömungsmechanischen Modell sind alle Bewegungsfreiheitsgrade an der Sensoroberfläche und des Keramikträgers festgehalten. Im Gegensatz dazu ist beim strukturmechanischen Modell nur der Keramikträger an der Unterseite eingespannt. Aus diesem Grund wurde für die Eingabe der Randbedingungen unterschiedliche Dateien erstellt, die je nach Bedarf eingebunden werden können. In **Bild 7.1** ist das Modell zur strukturmechanischen Simulation mit den definierten Randbedingungen dargestellt.



**Bild 7.1:** Modell zur strukturellen Simulation (strömungsabhängige Temperaturverteilung) mit Randbedingungen

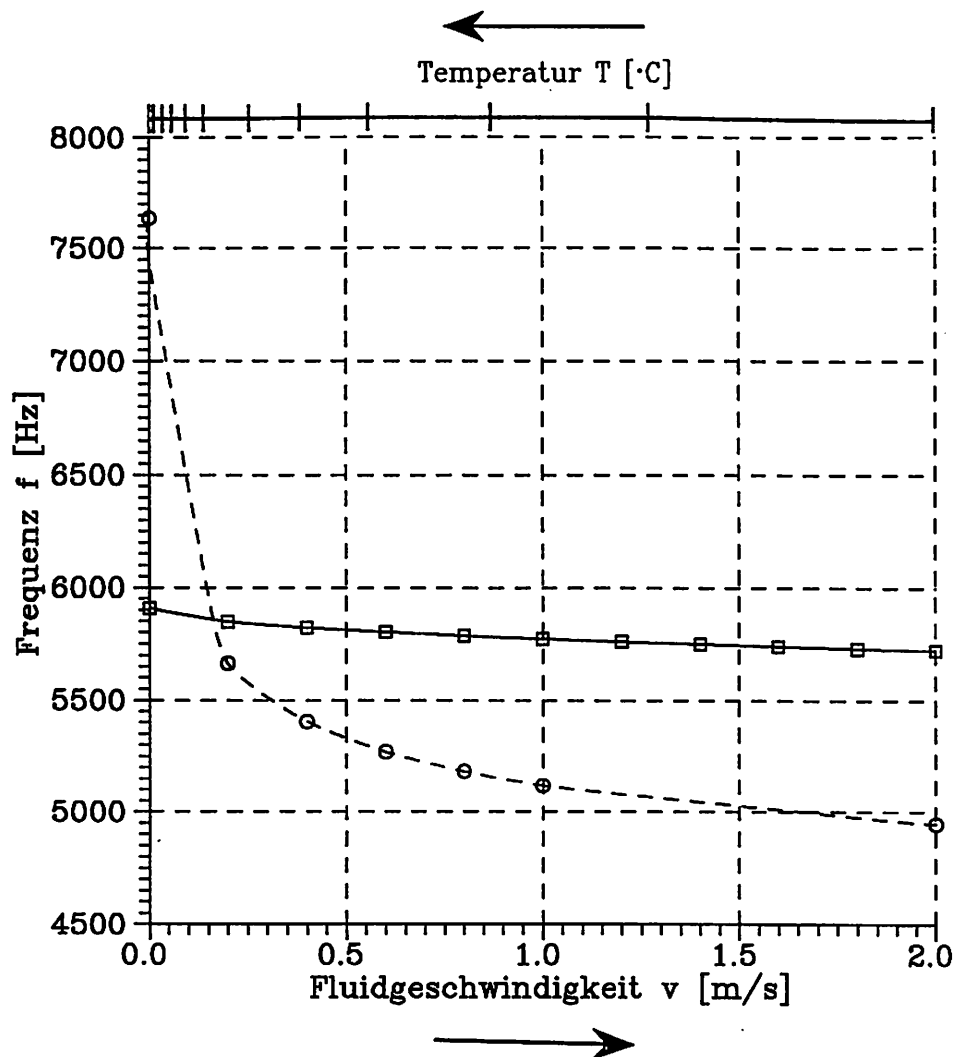
Bei der strömungsmechanischen Simulation in FIDAP wurden temperaturunabhängige Materialdaten verwendet. Da die strukturelle Simulation in einer gesonderten Berechnung durchgeführt wird, können temperaturabhängige Materialdaten verwendet werden.

### 7.3 Interpretation der Berechnungsergebnisse

In **Bild 7.2** ist die Resonanzfrequenz des Resonators in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit der Luft mit und ohne Wärmesenke am Keramikträger dargestellt.

Beide Kurven weisen einen monoton fallenden Verlauf auf. Das ist zum einen darauf zurückzuführen, daß der Keramikträger berücksichtigt wurde (vgl. Bild 4.6), zum anderen liegen die Temperaturen für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich oberhalb der kritischen Temperatur. In diesem Temperaturbereich zeigen alle Kurven einen monotonen Verlauf (vgl. Bild 4.3).

Berücksichtigt man bei der Berechnung die Wärmesenken, erhält man eine Strömungsempfindlichkeit von ca. 130 Hz / m/s in dem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 1 m/s. Im selben Geschwindigkeitsbereich erhält man ohne Wärmesenke eine Empfindlichkeit von ca. 2500 Hz / m/s. Der Grund dafür liegt darin, daß das Modell ohne Wärmesenken durch die Luftströmung stärker abgekühlt wird, als das Modell mit Wärmesenken. Die Temperaturen liegen bei dem Modell ohne Wärmesenke im Bereich zwischen 30 und 100°C, d.h. die Temperatur kommt der kritischen Temperatur sehr nahe. Betrachtet man den Kurvenverlauf dieses Temperaturbereichs in Bild 4.3, stellt man fest, daß die Emp-



**Bild 7.2:** Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit  
(○ ohne Wärmesenke, □ mit Wärmesenke)

findlichkeit nahe der kritischen Temperatur am höchsten ist. Bei dem Modell mit der Temperatursenke sind betragsmäßig größere Wärmequellen definiert, um die gemessenen Temperaturen an der Sensoroberfläche zu erreichen. Zum Keramikträger hin nimmt die Temperatur in diesem Modell stark ab, bleibt jedoch im Bereich des Sensors auch bei Strömung hoch. Bei diesem Modell liegen die Temperaturen mit Strömung im Bereich zwischen 84 und 100°C, also weiter von der kritischen Temperatur entfernt. In diesem Temperaturbereich lässt die Empfindlichkeit nach.

## **8 Experimentelle Untersuchungen**

### **8.1 Problemstellung**

Bei der FE-Simulation erhält man Näherungslösungen, die sehr stark von den verwendeten Modellparametern abhängen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Messungen durchzuführen, anhand derer die Simulationsergebnisse beurteilt werden können. Dabei ist sowohl das dynamische als auch das statische Verhalten des Sensors (Balkenlänge 10 mm, Balkenbreite 1 mm, Balkendicke 50  $\mu\text{m}$ ) bei verschiedenen Betriebsparametern von Interesse. Es wurden Messungen durchgeführt, bei denen folgende Betriebsparameter variiert wurden:

- DMS-Leistung
- externe Wärmequelle

Da zunächst das prinzipielle Sensorverhalten untersucht werden sollte, wurden diese Messungen ohne Strömungseinfluß durchgeführt. In [Wie93] wurde zusätzlich der Strömungseinfluß an diesem Sensor untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit standen zur Verfügung.

### **8.2 Einfluß der elektrischen Verlustleistung auf das Sensorverhalten**

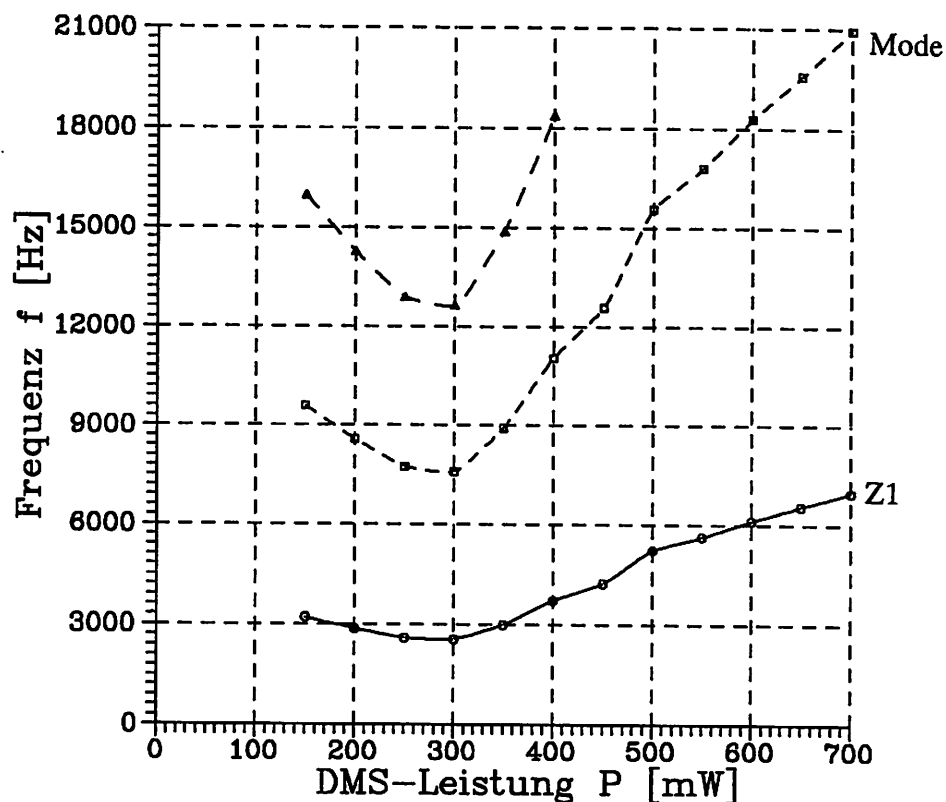
An der Sensoroberfläche sind elektrische Widerstände aufgebracht, die beim Sensorbetrieb Verlustleistung abgeben und den Sensor erwärmen (vgl. Abschnitt 2.1). Die Verlustleistung dieser Widerstände und somit die Erwärmung des Sensors kann man durch den Stromfluß in den Widerständen variieren. Bei den Messungen wurde die Heizleistung konstant auf 180 mW eingestellt, die DMS-Leistung wurde zwischen 0 und 700 mW variiert. Auf diese Weise wurden folgende statische und dynamische Größen des Sensors bestimmt:

- das Modenspektrum,
- die laterale dynamische Amplitudenverteilung und
- die statische Auslenkung in Balkenmitte.



### Modenspektrum

Bei der optischen Bestimmung des Modenspektrums mit Hilfe von Laservibrometer und Spektrum-Analysator (vgl. Abschnitt 2.3.1) erhält man die Resonanzfrequenzen der Schwingungsmoden in einem bestimmten Frequenzbereich. In **Bild 8.1** sind die gemessenen Resonanzfrequenzen für verschiedene DMS-Leistungen dargestellt.

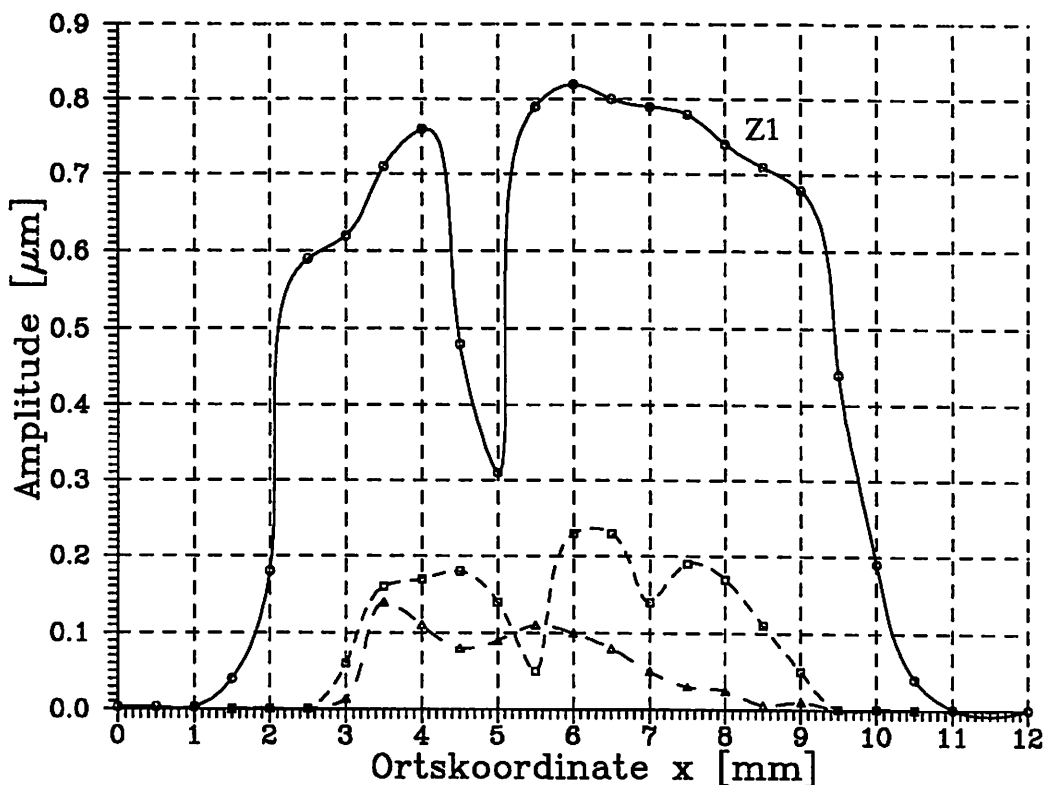


**Bild 8.1:** Gemessene Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit der DMS-Leistung  
(○ Grundmode, □ 1. Obermode, △ 2. Obermode)

Bei allen drei Kurven kann man deutlich ein Minimum bei ca. 300 mW erkennen. Bei dieser DMS-Leistung ist demzufolge die kritische Temperatur erreicht. Im Gegensatz zu den simulierten Kurven steigt die Resonanzfrequenz der nächst höheren Mode bei den Messungen nach dem Knick wieder an. Ein Grund dafür könnten die undefinierten Randbedingungen bei den Messungen sein. Der Sensor hat eine hohe Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Spannungen, die z.B. durch die Einspannung hervorgerufen werden. Die Befestigung des Keramiktägers mit dem Sensor erfolgte durch Einklemmen in einer Messingvorrichtung. Somit sind die Meßwerte nicht exakt reproduzierbar, liefern jedoch größenordnungsmäßig Anhaltspunkte für die Simulation.

### Laterale dynamische Amplitudenverteilung

Bei dieser Messung wurde die Amplitude der Schwingung in Balkenlängsrichtung für eine konstante DMS-Leistung von 200 mW abgetastet. Mit dieser Messung sollte die Schwingungsform der verschiedenen Moden untersucht werden. In **Bild 8.2** ist die Amplitude an verschiedenen Orten auf dem Balken für drei Moden dargestellt.



**Bild 8.2:** Gemessene Amplitudenverteilung in Balkenlängsrichtung

(○ Grundmode, □ 1. Obermode, △ 2. Obermode)

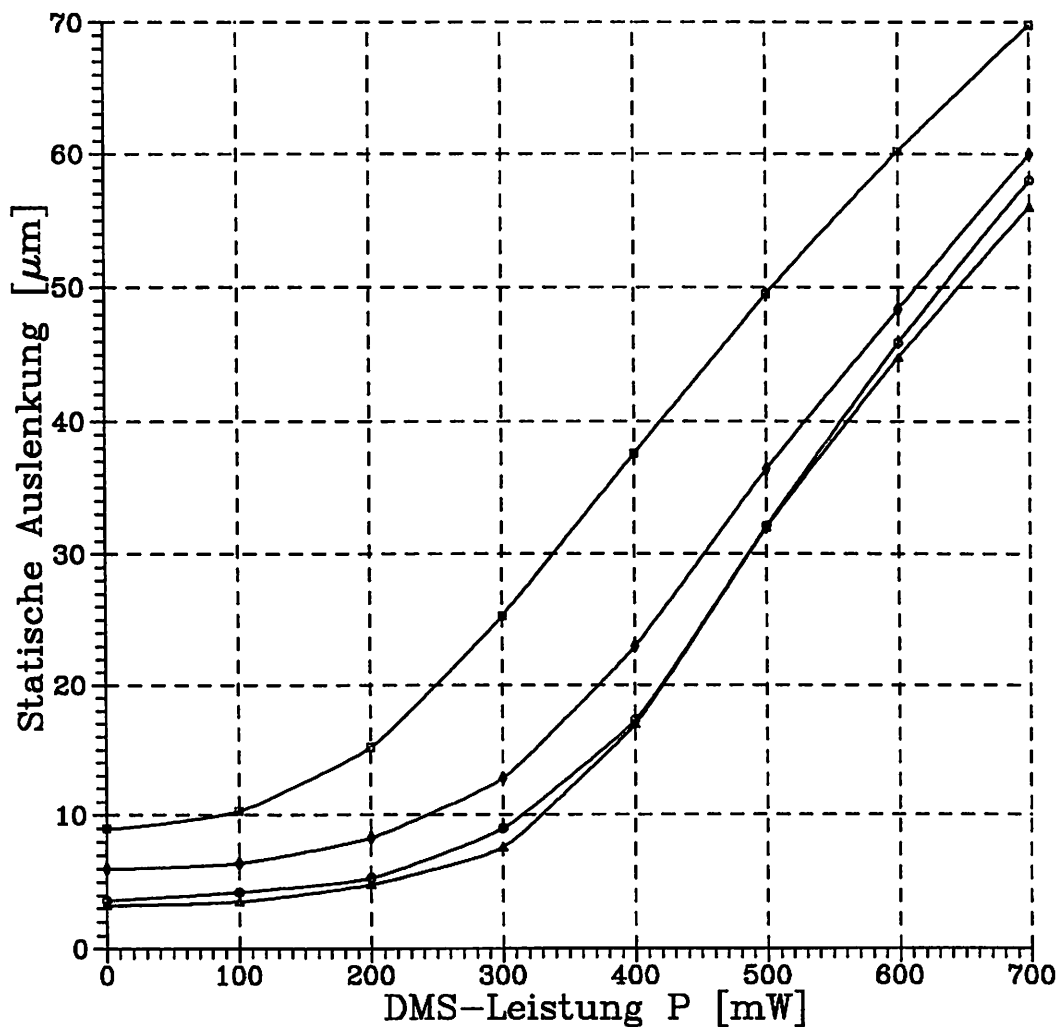
Die Amplitudenverteilung der Grundmode konnte bis auf zwei Meßpunkte näherungsweise gemessen werden. Die Kurven der Obermode geben nur wenig Aufschluß über die Schwingungsform. Die Schwingungsamplituden der Obermode waren sehr klein, was zu großen Ableseungenauigkeiten führte. Außerdem arbeitete die Anregungsschaltung bei dieser Messung nicht mehr zuverlässig. Folgende Probleme traten bei der Messung auf:

- Die Anregungsschaltung erkannte die Resonanzfrequenz nicht genau und regte nur in der Nähe der Resonanzfrequenz an.
- Die Amplitude der Schwingung sowie die Frequenz unterlagen im "eingeschwungenen Zustand" großen Schwankungen.
- Bei kleinen Schwingungsamplituden erkannte die Anregungsschaltung die Resonanzfrequenz nicht und erreichte keinen stationären Betriebszustand mehr.

Die Schwingungen wurden optisch mit dem Laservibrometer längs des Balkens abgetastet und mit dem Spektrum-Analysator verarbeitet.

### *Statische Auslenkung des Balkens*

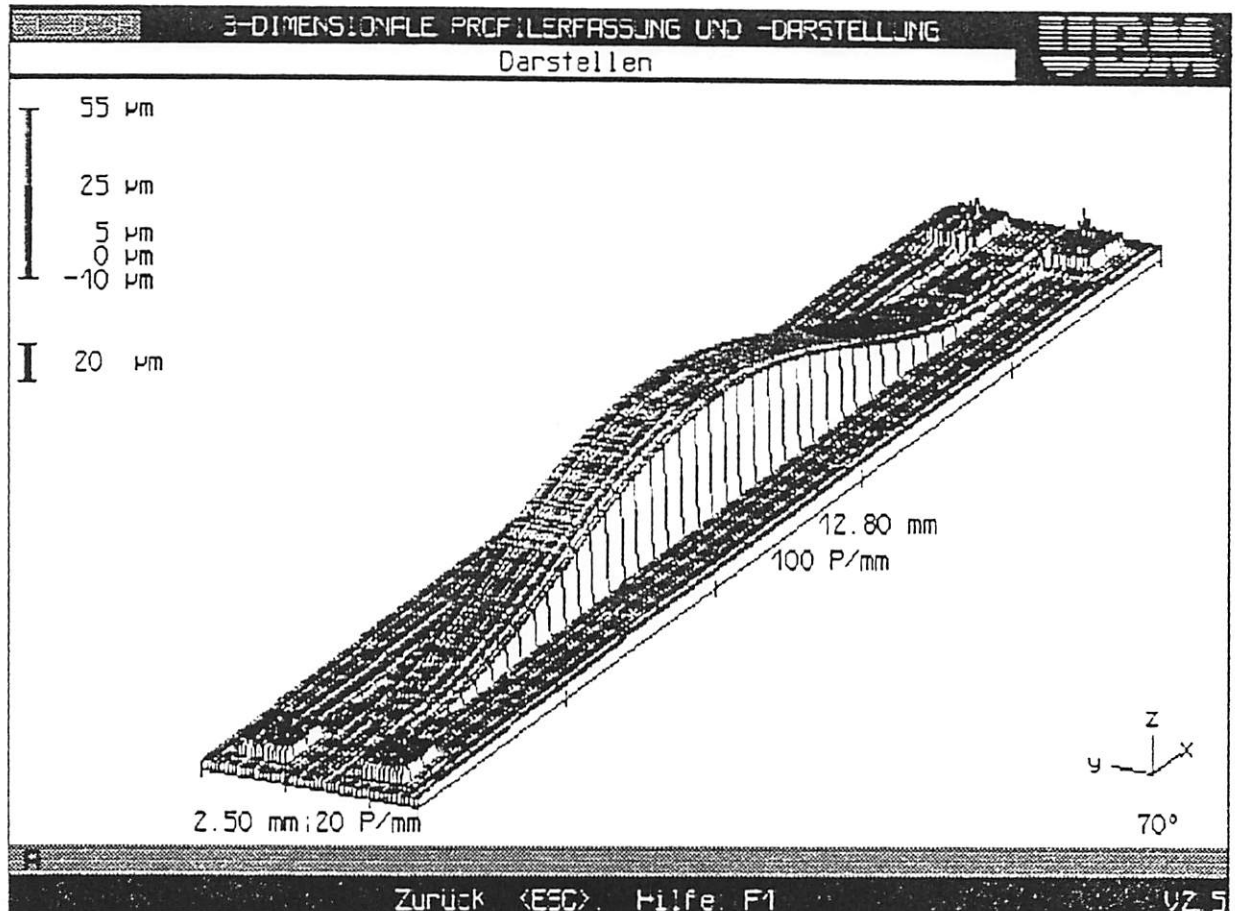
Mit Hilfe eines optischen Tastschnittgeräts wurde die statische Auslenkung des Balkens in Abhängigkeit der DMS-Leistung in Balkenmitte gemessen. Bei dieser Messung sollte die kritische Temperatur und die Auslenkung des Balkens bei maximaler DMS-Leistung bestimmt werden. Die Messung erfolgte ohne Anregung ( $P_{\text{Heiz}} = 0 \text{ mW}$ ). In **Bild 8.3** ist die statische Auslenkung des Balkens in Abhängigkeit der DMS-Leistung für vier verschiedene Sensoren dargestellt.



**Bild 8.3:** Statische Auslenkung des Balkens in Abhängigkeit der DMS-Leistung vier verschiedener Sensoren

Es ist deutlich zu erkennen, daß die Balken im Grundzustand ( $P_{\text{DMS}} = 0 \text{ mW}$ ) schon etwas ausgelenkt sind. Diese Auslenkung ist auf herstellungsbedingte Spannungen zurückzuführen. Erwärmt man den Sensor langsam, d.h. erhöht man die DMS-Leistung, nimmt die Auslenkung des Balkens geringfügig zu. Erreicht man die kritische Temperatur bei einer DMS-Leistung von ca. 200 bis 300 mW, nimmt die Auslenkung bei weiterer Erwärmung deutlich stärker zu. Die Sensoren, die im Grundzustand eine größere Auslenkung aufweisen, knicken schon bei geringeren Temperaturen. Das läßt darauf schließen, daß diese Sensoren im Grundzustand schon unter Druckspannungen stehen. Bei der maximalen DMS-Leistung von 700 mW schwankte die Auslenkung der Balken zwischen  $55 \mu\text{m}$  und  $70 \mu\text{m}$ .

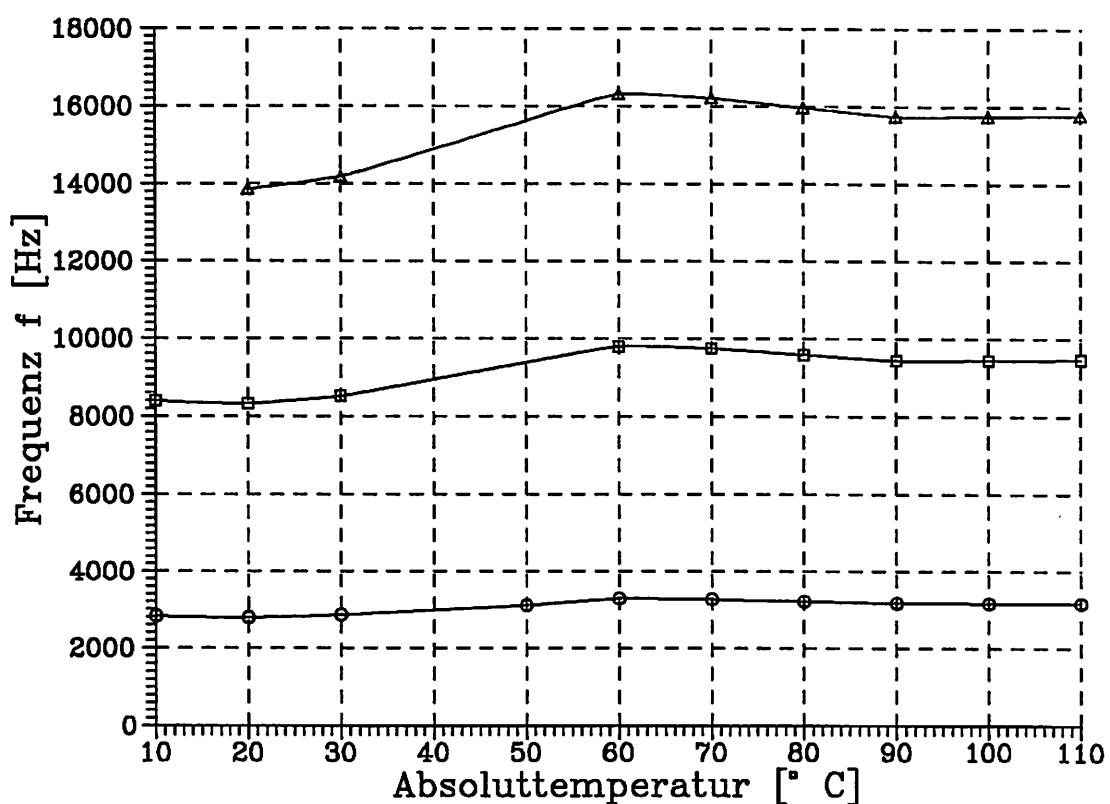
Um eine Vorstellung davon zu erhalten in welcher Art der Balken ausknickt, wurde bei der maximalen DMS-Leistung eine dreidimensionale Profilaufnahme des Sensors durchgeführt, die in **Bild 8.4** zu sehen ist.



**Bild 8.4:** 3D-Profilaufnahme des ausgeknickten Balkens bei einer DMS-Leistung von 700 mW

### 8.3 Einfluß einer externen Wärmequelle auf das Sensorverhalten

Bei der strukturmekanischen Simulation wurde das Modell mit einer homogenen Temperaturverteilung beaufschlagt. Bei den Messungen hatte man bisher immer inhomogene Temperaturverteilungen, die wegen der undefinierten Randbedingungen bei der Messung in einer Simulation nicht genau abgebildet werden können. Aus diesem Grund wurden Messungen durchgeführt, bei denen der Sensor mit dem Keramikträger auf einem beheizten Tisch aufgespannt wurde. Die DMS-Leistung wurde bei dieser Messung auf einen konstanten Wert eingestellt. Mit dieser Meßanordnung wurde das Modenspektrum in Abhängigkeit der Heiztischtemperatur aufgenommen. In **Bild 8.5** ist dieser Zusammenhang für eine DMS-Leistung von 200 mW dargestellt.



**Bild 8.5:** Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Heiztischtemperatur

( $P_{\text{DMS}} = 200 \text{ mW}$ , ○ Grundmode, □ 1. Obermode, △ 2. Obermode)

Die Kurven zeigen bei diesen Messungen ein gänzlich verändertes Verhalten. Die Resonanzfrequenzen steigen bei zunehmender Temperatur leicht an und werden ab einer Temperatur von ca. 60°C wieder kleiner. Das veränderte Verhalten läßt sich auf den Einfluß des Keramikträgers infolge Erwärmung und Abkühlung zurückführen. Bei den

Messungen, bei denen nur die DMS-Leistung variiert wird, hat der Keramikträger keinen so großen Einfluß, da er auf einem Messingklotz befestigt ist, der eine große Wärmesenke darstellt und seine Temperatur weitgehend konstant hält.

#### **8.4 Vergleich der Meß- und Simulationsergebnisse**

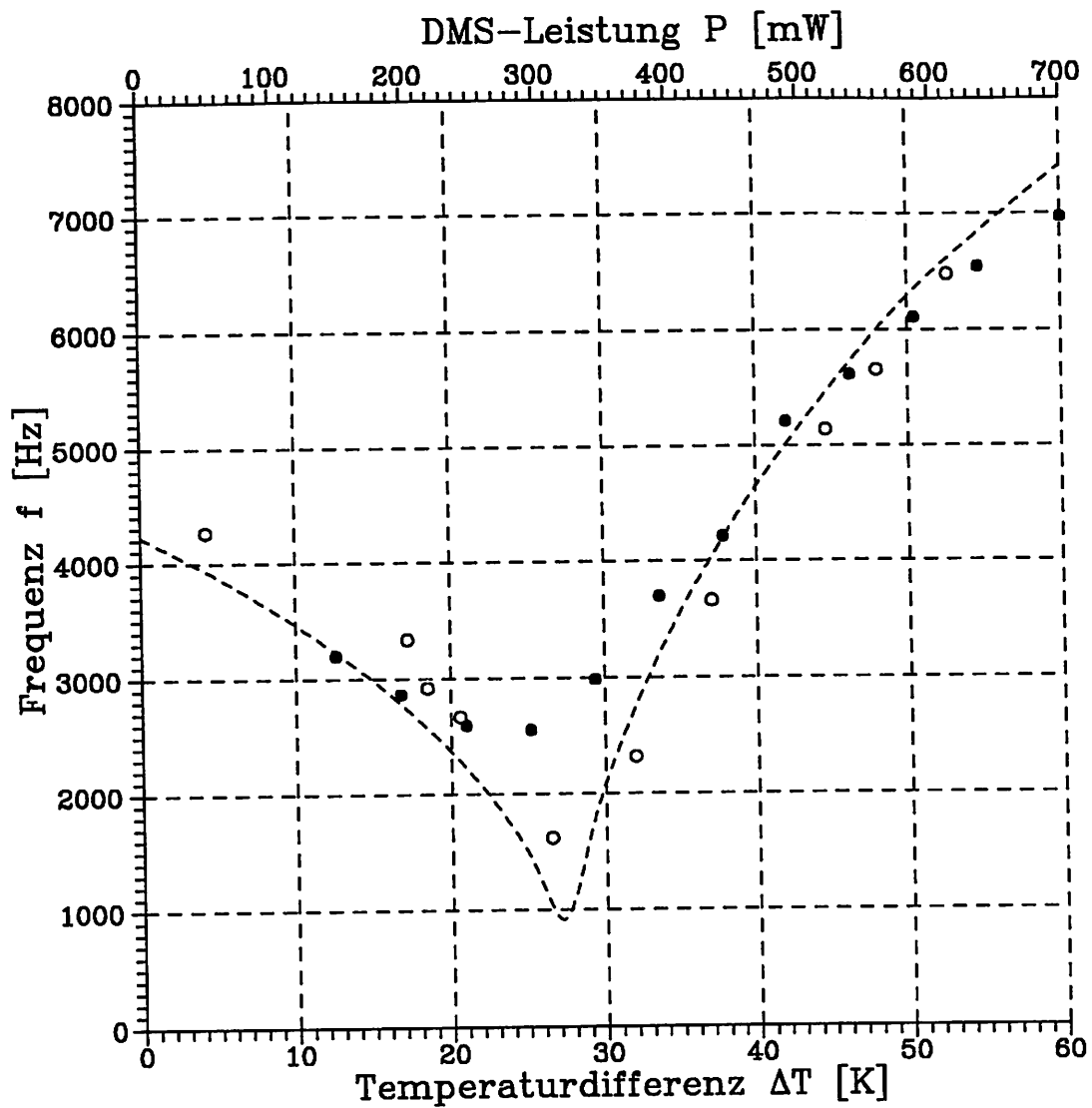
Der betrachtete Sensor ist sehr empfindlich gegenüber verschiedenen Einflüssen, die in der Simulation selektiv untersucht werden können. Bei Messungen lassen sich die verschiedenen Einflüsse nicht gesondert betrachten. Die Randbedingungen wie z.B. die Einspannung des Sensor und die Wärmeabfuhr durch die Einspannung waren bei den Messungen undefiniert, somit nicht reproduzierbar und daher nicht simulierbar. Ein Vergleich zwischen den Meß- und den Simulationsergebnissen kann aus diesem Grund auch keine quantitativen Ergebnisse liefern. Dieser Vergleich dient aber dazu die Simulation qualitativ einordnen zu können.

In **Bild 8.6** ist ein Vergleich der Resonanzfrequenz der Grundmode in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Messung (Bild 8.1) und Simulation dargestellt. Bei den Messungen wurde die DMS-Leistung variiert und für den Vergleich mit dem Faktor 0,084 [Bar93] in eine Temperaturdifferenz umgerechnet.

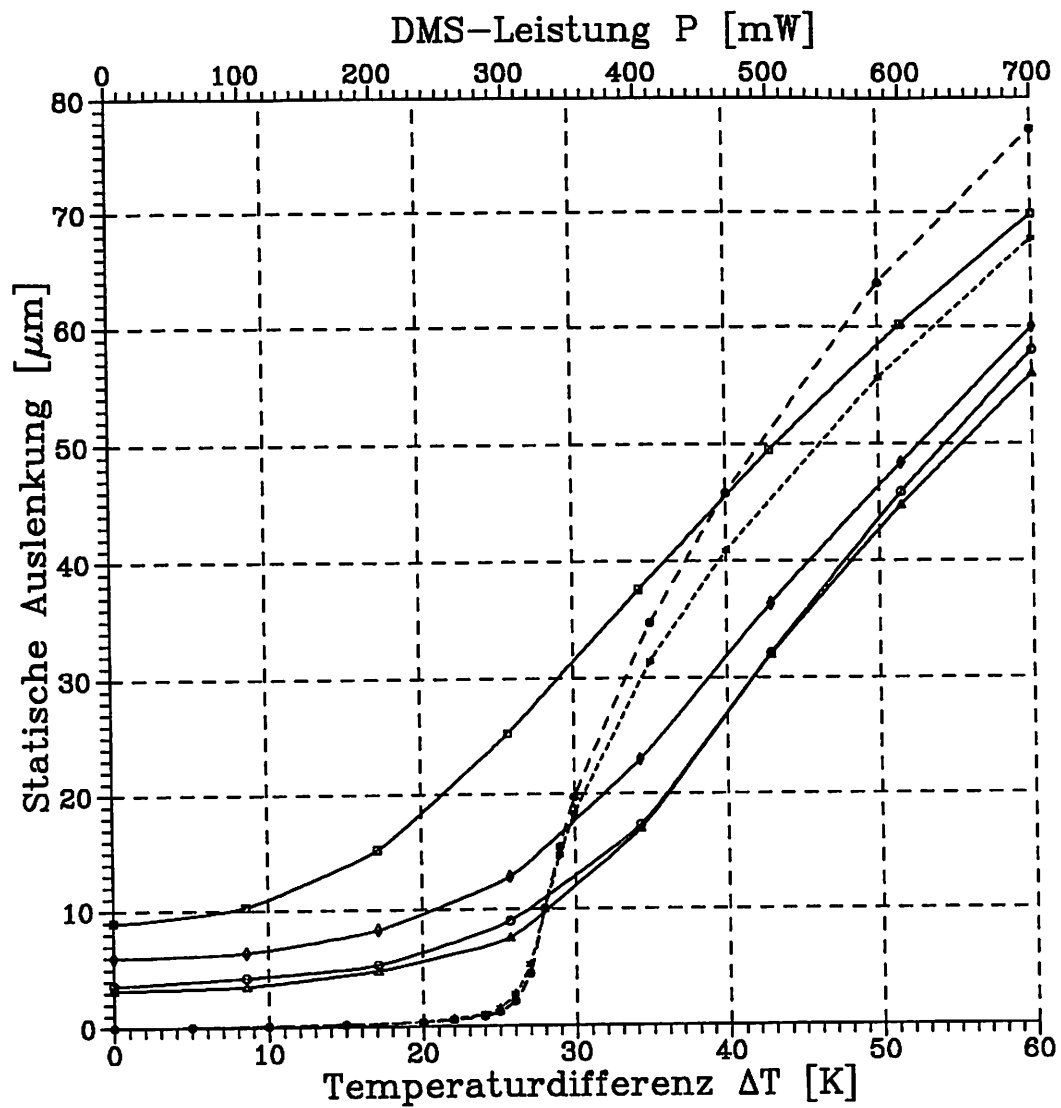
Für den gesamten Temperaturbereich ergibt sich eine gute Übereinstimmung, so daß man davon ausgehen kann, daß das strukturmechanische Modell (Si + SiO<sub>2</sub>, 206 Elemente) zur Charakterisierung des prinzipiellen Sensorverhaltes gut geeignet ist. Die Annahme einer homogenen Temperaturverteilung führt, solange der Keramikträger nicht berücksichtigt wird, zu guten Näherungslösungen.

In **Bild 8.7** ist ein Vergleich der Auslenkung in Balkenmitte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Messung und Simulation dargestellt.

Die Simulationsergebnisse stimmen größenordnungsmäßig sehr gut mit den gemessenen Werten überein. Das Ergebnis des dreidimensionalen Modells, das mit anisotropen temperaturabhängigen Materialwerten berechnet wurde, liegt näher an den gemessenen Werten als das Ergebnis des zweidimensionalen Modells, das mit isotropen temperaturabhängigen Werten berechnet wurde.



**Bild 8.6:** Abhängigkeit der Resonanzfrequenz der Grundmode von der Temperaturdifferenz/DMS-Leistung (○ Meßpunkte [Wie93], ● Meßpunkte, — FE-Simulation)



**Bild 8.7:** Abhängigkeit der Balkenauslenkung von der Temperaturdifferenz  
 (— Messungen, - - - FEM (2D-Modell), --- FEM (3D-Modell))



## 9 Ausblick

Ziel weiterer Untersuchungen wird es sein, das universelle frequenzanaloge Sensorprinzip, das gegenüber vielen verschiedenen Einflußgrößen empfindlich ist, an spezielle Anwendungsfälle anzupassen. Betrachtet man die Anwendung als Strömungssensor, bieten die in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodelle die Möglichkeit, anhand Parametervariationen eine zielgerichtete Voraboptimierung eines neuen Sensoraufbaus durchzuführen. Dabei ist vor allem die Halterung des Sensors von sehr großer Bedeutung. Der Sensor sollte in einer Halterung befestigt werden, die äußere mechanische Spannungen kompensiert, Längenausdehnungen infolge Erwärmung nicht auf den Sensor überträgt und eine definierte Wärmesenke darstellt.

Anhand eines solchen Sensoraufbaus mit klar definierten thermischen und mechanischen Randbedingungen ließe sich ein FE-Modell entwickeln, dessen Simulationsergebnisse einen guten Vergleich mit Meßergebnissen ermöglichen sollte. Mit einem solchen realitätsnahen Simulationsmodell läßt sich der Einfluß verschiedener Modellparameter weiter untersuchen und der Sensor für eine spezielle Anwendung optimieren.

Ein dreidimensionales Modell, bei dem man das anisotrope Materialverhalten von Silizium simulieren kann, liefert bei der strukturmechanischen Simulation gute Ergebnisse. Auch bei der strömungsmechanischen Simulation könnten mit einem dreidimensionalen Modell einige zusätzliche Effekte simuliert werden, deren Auswirkung beim zweidimensionalen Modell nicht berücksichtigt werden können. Der Rechen- und Modellierungsaufwand bei der dreidimensionalen Strömungssimulation ist jedoch so groß, daß nur die Berechnung eines voroptimierten dreidimensionalen Modells sinnvoll ist. Aus diesem Grunde kann mit einem so großen Modell lediglich eine abschließende Optimierung unter Variation ausgewählter Modellparameter durchgeführt werden.

## 10 Zusammenfassung

Zur Charakterisierung des mechanischen Verhaltens eines frequenzanalogen Siliziumbalckenresonators mit elektrothermischer Anregung und resistiver Abtastung unter Temperaturlast wurde ein zweidimensionales strukturmechanisches Modell erstellt. Anhand dieses Modells wurde der Einfluß verschiedener Modellparameter auf die Simulationsergebnisse untersucht und die Sensorkennlinie bestimmt. Zur Verifizierung des Kurvenverlaufs dienten analytischen Berechnungen und Messungen. Dabei war die Übereinstimmung zwischen Simulation, analytischer Berechnung und Messung sehr gut. Zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens unter Temperaturlast ist das zweidimensionale strukturmechanische Modell ausreichend.

Mit einem in die dritte Dimension erweiterten Modell ließen sich die Einflüsse dreidimensionaler Effekte wie z.B. anisotropes Materialverhalten untersuchen. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden mit den Ergebnissen der zweidimensionalen Modelle verglichen.

Zur gekoppelten Berechnung war es erforderlich die beiden Programmpakete ANSYS und FIDAP über vorhandene Schnittstellen zu koppeln. Dabei wurde eine Berechnungsstrategie angewendet, bei der die Modellgenerierung in ANSYS44A, die strömungsmechanische Berechnung in FIDAP und die strukturmechanische Berechnung in ANSYS50 erfolgte.

Zur Simulation der Strömungseigenschaften des mikromechanischen Sensors wurde ein zweidimensionales Modell erstellt. Die verschiedenen Modellparameter beeinflussen die Berechnungsergebnisse erheblich. Insbesondere die thermischen Randbedingungen haben einen sehr großen Einfluß auf die Ergebnisse. Das strömungsmechanische Modell liefert Näherungsergebnisse, die zur groben Abschätzung des thermischen Verhaltens des Sensors dienen können.

Die Temperaturverteilung im Sensor infolge der Luftströmung in einem Strömungsrohr ergibt sich bei der strömungsmechanischen Simulation. In einer strukturmechanischen Simulation werden die aus dieser Temperaturverteilung resultierenden mechanischen Spannungen bestimmt. Zur abschließenden Berechnung der Resonanzfrequenzen dient eine Modalanalyse. Bei dieser gekoppelten Fluid-Struktur-Berechnung erfolgt die Kopplung über die Temperatur. Der Einfluß von Fluidkräften auf das Sensorverhalten konnten auf diese Weise nicht betrachtet werden. Das gekoppelte Modell liefert Näherungslösungen die größenordnungsmäßig mit Meßwerten übereinstimmen.

Zur Einordnung und Überprüfung der Simulationsergebnisse lieferten verschiedene Experimente die Vergleichswerte. Bei diesen Messungen wurde festgestellt, daß der Sensoraufbau empfindlich gegenüber sehr vielen Einflußgrößen ist und daß die Meßergebnisse nur größenordnungsmäßige Anhaltspunkte für die Simulation liefern.

Analytische Betrachtungen, die zur groben Abschätzung von Skalierungseffekten und zur Problemübersicht dienen, begleiteten die Simulationen.