

---

# **DOKUMENTATION MIKROTECHNIK**

---

**Nr.9 November 1992**

# Zu dieser Ausgabe

---

## Entwurf Simulation Resonatoren

---

Bei der Realisierung von mikromechanischen Komponenten und Systemen, sind neben der für die Bauelementfunktion technologisch zu realisierenden Funktionsprinzipien auch die prozeßtechnischen Randbedingungen wie z.B. Fertigungstoleranzen und Schichteigenstressungen bereits in der Entwurfsphase zu berücksichtigen. Reale mikromechanische Komponenten zeigen aufgrund der Miniaturisierung und der hohen Integration eine Wechselwirkung verschiedener physikalischer Einflußgrößen, die zu einer Überlagerung und damit zu unerwünschten Störeinflüssen führen können. Zusätzlich stellt man durch zunehmend komplexer werdende Strukturgeometrien und Materialzusammensetzungen erhöhte Anforderungen an den mikromechanischen Entwurf, die den Einsatz entsprechender rechnergestützter Entwurfs- und Simulationsverfahren bedingen. Zur Zeit existieren keine kommerziell erhältlichen, durchgehenden Entwurfswerkzeuge, die die vielfältigen Modellierungsanforderungen beim Entwurf von mikromechanischen Systemen abdecken. In der Praxis kom-

men daher analytische und numerische Berechnungsmethoden (z.B. Finite-Elemente-Methode) zum Einsatz, von denen einige Beispiele in dieser Ausgabe enthalten sind. Mikromechanisch hergestellte Resonatoren lassen sich als frequenzstabilisierendes Element (Schwingquarz) in Oszillatorschaltungen, aber auch als mikromechanische Teststrukturen zur Bestimmung von Materialeigenschaften mikrotechnisch hergestellter Dünnschichtsysteme infolge ihrer Frequenzempfindlichkeit einsetzen. Eine weitere wichtige Anwendung sind resonante mikromechanische Sensoren, welche durch ihr frequenzanaloges Ausgangssignal für die Präzisionsmessung verschiedener physikalischer Größen (z.B. Kraft, Druck, Temperatur) verwendet werden können. Im Rahmen eines BMFT-Verbundprojektes hat das IMIT in erfolgreicher Zusammenarbeit mit klein- und mittelständischen Firmen die Prozeßtechnologien in Silizium und Quarz für die Herstellung mikromechanischer, frequenzanaloger Sensoren für verschiedene Meßgrößen entwickelt.

  
Dipl.-Phys. T. Fabula

**Autor(en):** Najafi, Khalil

**Titel:** Smart sensors

**Quelle:** Journal of micromechanics and microengineering,  
11 2 (1991) S.86

**Inhalt:**

Dieser Übersichtsartikel zeigt den momentanen Stand der Technik bei integrierten intelligenten Sensoren (Smart Sensors).

Von intelligenten Sensoren spricht man, wenn das Signal des eigentlichen Sensorelementes (physikalischer Wandler) noch im gleichen Bauelement analog verarbeitet, in ein digitales Signal umgewandelt, nach vorgegebenen Algorithmen digital verarbeitet und an ein übergeordnetes Bussystem weitergeleitet wird. Integriert sind derartige Sensoren, wenn diese Funktionen auf einem Siliziumchip oder zumindest in einem Hybridbaustein vereinigt sind.

Im Artikel wird die Architektur und die einzelnen Funktionsblöcke von intelligenten Sensoren vorgestellt und diskutiert. Die Herstellungstechnologien werden kurz beschrieben. Probleme der Aufbau- und Verbindungstechnik werden erwähnt. Eine Reihe von Beispielen für integrierte intelligente Sensoren werden vorgestellt.

**Bewertung:**

Für den Entwurf, die Simulation und die Meßtechnik bringen derartigen Mikrosysteme eine Reihe neuer Probleme. Neben den einzelnen Prozessen muß das Zusammenspiel aller Baugruppen vom physikalischen Prozeß im Sensor über analoge und digitale Signalverarbeitung bis zur Anbindung an ein Bussystem beachtet werden. Entsprechende Entwurfs-, Simulations- und Meßwerkzeuge stehen derzeit noch nicht zur Verfügung.

**Autor(en):** Lee, H.-C. und Huang, R.-S.

**Titel:** A theoretical study on field emission array for microsensors

**Quelle:** IEEE Transactions on electron devices, 39 2  
(1992) S.313

**Inhalt:**

Die Arbeit beinhaltet theoretische Studien über die Feldemission von mikromechanischen Strukturen im Vakuum. Untersucht werden Arrays von kegelförmigen und stegförmigen Emitterstrukturen. Der Kollektor besteht aus einer ebenen Platte mit gleichmäßigem Abstand zu den Emittern. Betrachtet werden die Feldstärke, der Feldverlauf und der emittierte Strom in Abhängigkeit von geometrischen Parametern wie Abstand von Emitter zu Kollektor, Abstand zwischen den Emittern und Spitzenradius.

Im zweiten Teil der Arbeit wird als Kollektor eine Membran angenommen, die sich durch äußeren Luftdruck durchbiegt und damit den Abstand zu den Emittern verändert. Die Durchbiegung der Membran und damit der Abstand zum Emitter-Array wird in Abhängigkeit vom Ort berechnet. Mit den im ersten Teil ermittelten Formeln kann nun die Änderung des emittierten Stromes pro Emitter in Abhängigkeit vom Druck ermittelt werden. Der resultierende Strom aller Emitter zeigt eine deutliche Abhängigkeit vom Druck.

**Bewertung:**

Der Artikel beschreibt eine neue Variante des mikromechanischen Membran-Drucksensors, der bisher üblicherweise piezoresistiv oder kapazitiv ausgelesen wird. Durch das notwendige Vakuum zwischen Membran und Emitter ist er nur für Absolutdruck verwendbar. Eine Variante als Beschleunigungs- oder Wegsensor ist denkbar. Eine meßtechnische Überprüfung der theoretisch ermittelten Werte wäre interessant.

**Autor(en):** Brissaud, M.

**Titel:** Characterization of Piezoceramics

**Quelle:** IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics  
and Frequency Control, Vol. 38 No. 6 (1991)  
S.603

**Inhalt:**

Die Beschreibung von Piezokeramiken und piezoelektrischen Dünnschichten erfolgt auf der Basis der linearen piezoelektrischen Zustandsgleichungen, welche die mechanischen Größen Spannung und Dehnung mit dem elektrischen Feld und der dielektrischen Verschiebung verbinden. Neben den elastischen Materialeigenschaften gehen insbesondere die piezoelektrischen Moduli und Permittivitäten (Dielektrizitätskonstanten) der piezoelektrischen Materialien in die Bestimmungsgleichungen ein. Zur Beschreibung von dynamischen Vorgängen, wird in der Regel von ungekoppelten Schwingungsmoden ausgegangen, was jedoch aufgrund der nichtverschwindenden Querkontraktion und der piezoelektrischen Koppel effekte nicht zutrifft. In der Praxis ist die exakte analytische Beschreibung aufgrund der komplexen Geometrien und Randbedingungen jedoch nicht durchführbar, sodaß vermehrt zur Simulation mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode gegriffen wird. Numerische Berechnungsverfahren weisen jedoch gegenüber analytischen Betrachtungen den Nachteil auf, daß sie relativ aufwendig sind und aufgrund der Parametervielzahl keinen einfachen Überblick beim Entwurf gestatten. Der Autor stellt für die Beschreibung von piezoelektrischen Wandlern einen neuen dreidimensionalen analytischen Ansatz vor, der davon ausgeht, daß die Wellenausbreitung im piezoelektrischen Medium nur entlang der Koordinatenachsen erfolgt. Bei dieser Annahme vereinfachen sich die Zusammenhänge, sodaß analytisch exakt gerechnet und die Anzahl der beschreibenden physikalischen Parameter erheblich reduziert werden kann. Es werden für verschiedene Piezokeramikgeometrien die Spannungen, Dehnungen, elektrischen Impedanzen und elektromechanischen Kopplungsfaktoren für die Auslegung der Wandler angegeben.

**Bewertung:**

Für die Charakterisierung der Materialeigenschaften von piezoelektrischen Medien können die angegebenen Bestimmungsgleichungen herangezogen werden. Gegenüber der eindimensionalen Beschreibung des Mason-Modells erlauben sie eine detailliertere Einsicht in das dynamische Verhalten der Wandler.

**Autor(en):** Kiese Wetter, L.; Houdeau, D.; Löper, G. und Zhang, J.-M.

**Titel:** Wie belastbar ist Silizium in mikromechanischen Strukturen?

**Quelle:** Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Meßtechnik, 6 (1992) S.249

**Inhalt:**

Bei einer Vielzahl von mikromechanischen Strukturen treten mechanische Beanspruchungen des Werkstoffes Silizium auf. Für den Produktentwickler sind daher Angaben zur Werkstoffbelastbarkeit erforderlich. Die übliche Beschreibung über die Bruchzähigkeit versagt bei einkristallinem Silizium in Waferform, da die Oberfläche praktisch defektfrei ist und auch keine Gitterdefekte im Volumen vorhanden sind. Als Bewertungsmaß für die Belastbarkeit werden daher in der vorliegenden Arbeit Biegebruchfestigkeitsuntersuchungen an Waferabschnitten herangezogen.

Verschiedene Verfahren zur Untersuchung der Biegebruchfestigkeit, der verwendete Versuchsaufbau, die Berechnungsmethoden und das verwendete Verteilungsmodell für die Auswertung werden beschrieben. Die Bruchfestigkeit wurde in Abhängigkeit von der Waferorientierung, dem Ziehverfahren zur Herstellung des Si-Einkristalles und der Prüftemperatur ermittelt.

**Bewertung:**

Die vorgestellten Meßverfahren und -ergebnisse sind eine wesentliche Voraussetzung für die Konstruktion und Simulation mikromechanischer Bauelemente. Allerdings müssen die Untersuchungen für bearbeitetes Silizium (z.B. nach Hochtemperaturbelastung oder Tiefenätzungen) noch durchgeführt werden, weil dabei eine wesentliche Änderung der Bruchfestigkeit zu erwarten ist.

**Autor(en):** Bouwstra, S. und Geijselaers, B.

**Titel:** On the resonance frequencies of microbridges

**Quelle:** Techn. Digest, Proc. 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers' 91), San Francisco, USA, (June 23 - 27, 1991) S.538

**Inhalt:**

Verschiedene Festkörpersensoren funktionieren durch eine Frequenzänderung ihres mikromechanischen Resonators. Die schwingende Struktur besteht gewöhnlich aus einkristallinem Silizium oder aus dünnen Schichten. Diese Arbeit beschreibt die exakte analytische Berechnung von Schwingungsformen der Biegeschwingungsmoden von flachen, beidseitig eingespannten Balken, an die eine axiale Kraft angreift. Erweiterungen dieser analytischen Beschreibungen werden für mehrere Aspekte der transversal schwingenden Mikrobrückenstrukturen, für die dieses Modell nicht ausreicht, behandelt. Das Verhalten von vorgebogenen Balken (Buckled Beams) wird modellmäßig beschrieben. Ebenfalls wird das Verhalten von Balken mit kleinem Längen-zu-Breiten -Verhältnis behandelt. Die Deformation der elastischen Aufhängung wird analysiert und es wird gezeigt, daß eine signifikante Auslenkung des Befestigungsbereichs des Balkens bei typischen Auslenkungen der Mikrobrücken auftritt. Die Resultate dieses mathematischen Modells werden mit experimentellen Daten verglichen, die von einem Massendurchfluß-Sensor stammen, der in Form einer resonanten Mikrobrückenstruktur realisiert wurde.

**Bewertung:**

Diese Arbeit, die sehr ausführlich die mathematischen Modellansätze zur Beschreibung von beidseitig eingespannten Balkenstrukturen behandelt, zeigt, daß unter anderem die bei mikrotechnisch hergestellten Strukturen auftretenden Schichtspannungen und Materialvorspannungen einen beträchtlichen Effekt auf das Frequenzverhalten haben.

**Autor(en):** Grattarola, Massimo; Massobrio, Giuseppe und  
Martinoia, Sergio

**Titel:** Modeling  $H^+$ -sensitive FET's with SPICE

**Quelle:** IEEE transactions on electron devices, 39 4  
(1992) S.813

**Inhalt:**

Es wird ein allgemeines physikalisches Modell mit zwei Arten von Bindungsplätzen für Wasserstoffionen-empfindliche ISFET Bauelemente vorgestellt. Das Modell wird dargestellt durch einen Satz von Gleichungen, welche in eine modifizierte Version des Simulationsprogrammes SPICE für analoge elektronische Schaltungen eingegeben werden. Dadurch können die Auswirkungen verschiedener physikalischer Parameter auf die Eigenschaften des ISFET Bauelementes simuliert werden. Die Abhängigkeit der Ausgangsspannung des Bauelementes vom pH-Wert wird für Gates aus Siliziumoxid, Aluminiumoxid und Siliziumnitrid berechnet. Die simulierten Werte werden mit experimentellen Daten von ISFET's mit Aluminiumoxid-Gate verglichen.

Das Modell und das Programm SPICE wurden weiterhin benutzt um das Verhalten einer hypothetischen, partiell pH-unempfindlichen Struktur (REFET) vorherzusagen und um die relativ langsame Antwort eines Aluminiumoxid-Gate ISFET's auf einen pH-Wert-Sprung zu simulieren.

**Bewertung:**

Die Simulation gesamter Mikrosysteme (Sensor, analoge und digitale Meßwertverarbeitung, Aktor, Busanbindung) ist eine wesentliche Voraussetzung für einen effektiven Entwurf. Für die elektronischen Komponenten stehen eine Vielzahl von Simulationsprogrammen (z.B. SPICE) zur Verfügung. Für mikro-mechanische Bauelemente gibt es Programme auf FEM-Basis. Das Zusammenspiel dieser Werkzeuge (z.B. für die im Artikel beschriebene Simulation der Antwort des chemisch-physikalisch-elektronischen Systems auf einen pH-Wert-Sprung) ist noch zu lösen.



**Autor(en):** Merlos, A.; Cané, C.; Bausells, J. und Esteve, J.

**Titel:** Modelization and fabrication of ISFET based sensors

**Quelle:** Microelectronic engineering, Proceedings of the 21st European Solid State Device Research Conference, 15 1-4 (1991) S.423

**Inhalt:**

Ionensensitive ISFET-Strukturen sind für Sensoranwendungen unter anderem deshalb interessant, weil sie sich mit CMOS-Bauelementen auf einem Chip integrieren lassen. Allerdings erfordert diese Integration eine exakte Optimierung der Herstellungstechnologie, um für alle Bauelemente die geforderten Parameter zu erhalten. Aus den technologischen Parametern, wie z.B. Dosis und Energie der Ionenimplantation und Temperatur und Dauer des anschließenden Ausheilprozesses, wurden mit dem Simulationsprogramm SUPREM-3 physikalische Eigenschaften der Bauelemente, wie Dotandeneindringtiefen und -konzentrationen errechnet. Als zweiter Schritt wurden Modelle für das elektrische und ionensensitive Verhalten im Simulationsprogramm SPICE implementiert. Mit Hilfe dieser beiden Werkzeuge können jetzt die technologischen Parameter für ein gewünschtes Bauelementeverhalten optimiert werden. Die Ergebnisse zeigen, daß man CMOS- und ISFET- Bauelemente auf einem Chip integrieren und auch die Parameter optimieren kann.

**Bewertung:**

Ebenso wie die schon beschriebene Arbeit von M. Grattarola et al. werden in dieser Arbeit Simulationsprogramme der Mikroelektronik für neue Aufgaben eingesetzt. Zusätzlich werden hier neben den Bauelementeparametern noch die Parameter der Herstellungstechnologie optimiert.

**Autor(en):** Franeck, H.

**Titel:** Fehlerabschätzung für FEM-Vernetzungen bei ebenen stationären Wärmeleitproblemen

**Quelle:** Technische Mechanik, 12 4 (1992) S.229-234

**Inhalt:**

Finite-Elemente-Programme basieren auf dem Ansatz, daß Körper oder räumliche Bereiche von nahezu beliebig komplexer Struktur und Gestalt in einfach berechenbare Einzelelemente zerlegt werden, die an diskreten Knoten miteinander verbunden sind. Da nur an diesen Knoten Information von einem Element zum anderen übergeben wird, kommt es zwangsläufig zu

Diskretisierungsfehlern, die sich vor allem in Bereichen bemerkbar machen, in denen höhere Gradienten der zu berechnenden Größe vorhanden sind. In einigen FE-Programmen besteht die Möglichkeit, derartige Fehler abzuschätzen, z.B. durch Vergleich des Spannungszustands beiderseits einer Elementgrenze, und die Vernetzung in kritischen Bereichen zu verfeinern.

Der Autor dieses Artikels beschreibt ein Verfahren zur Bewertung von Vernetzungsfehlern in thermischen Berechnungen und damit für allgemeine Potentialprobleme wie z.B. Widerstands- und Torsionsberechnungen. Dieses Verfahren erlaubt es nicht nur, relativ zu grob elementierte Bereiche zu erkennen, sondern auch, die absolute Genauigkeit eines FE-Netzes zu bestimmen. Das Verfahren ist gültig für Elemente ohne Zwischenknoten mit höherem (Hermitem) Polynomansatz und läßt sich auch nachträglich im Postprocessing durchführen. Es verwendet die Tatsache, daß die Elementansatzfunktionen die Ergiebigkeit interner Wärmequellen im Gegensatz zur Wärmestromdichte exakt wiedergeben. Der Diskretisierungsfehler ergibt sich dann aus der Wärmebilanz jedes einzelnen Elements.

**Bewertung:**

Ein wichtiger Aspekt bei Finite-Elemente-Berechnungen ist die problemangepaßte Vernetzung des Modells. Zur Einsparung von Rechenzeit und Speicherplatz ist dieses Netz so grob wie möglich zu wählen, andererseits können bei zu grober Rasterung entscheidende Maxima von Spannung, Temperatur oder elektrischem Widerstand übersehen werden. Ein Kriterium für die Güte der gewählten Vernetzung ist daher sehr wünschenswert.

**Autor(en):** Smith, J.M.

**Titel:** Adaptive mesh refinement for dynamics analysis

**Quelle:** ANSYS technology conference proceedings, (1992)  
S.10.25

**Inhalt:**

Bei Finite-Elemente Analysen hat die Güte der Elementvernetzung einen wesentlichen Einfluß auf die Berechnungsergebnisse, da die zu untersuchenden Strukturen auf einem diskreten Elementnetz berechnet werden. In dem Artikel stellt der Autor ein Verfahren zur adaptiven Netzverfeinerung bei dynamischen Analysen vor, das es erlaubt, automatisiert für einen interessierenden Frequenzbereich die Eigenfrequenzen und Schwingungsformen (Modalanalyse) genau zu berechnen. Im Gegensatz zu statischen Strukturberechnungen, bei dem eine Elementverdichtung in Bereichen hoher Spannungsgradienten erfolgt, ist ein solches Verfahren bei dynamischen Untersuchungen nicht verwendbar. Während bei statischen Berechnungen die Steifigkeit des Gesamtsystems entscheidend ist, d.h. die Dehnungsenergie im System minimiert werden muß, erfordern dynamische Analysen zusätzlich die korrekte Berücksichtigung der Massenverteilung. Unter Zuhilfenahme der aus der experimentellen Modalanalyse bekannten Modal-Assurance- (MAC) und Coordinate-Modal-Assurance- (COMAC) Kriterien werden verschiedene Vernetzungen miteinander sukzessive verglichen und bei unzureichender Korrelation der berechneten Frequenzen und Eigenformen weiter verfeinert. Das MAC-Kriterium dient der Korrelation der Eigenformen, das COMAC-Kriterium der Lokalisierung der ungenügenden Elementvernetzung in der Struktur. Anhand verschiedener überschaubarer Beispiele wird das automatisierte, im Batchbetrieb lauffähige Verfahren ausführlich erklärt und die Auswirkungen auf die Vernetzung grafisch dargestellt.

**Bewertung:**

Bisherige in kommerzielle FEM-Programme implementierte adaptive Elementverfeinerer basieren auf der Minimierung der Dehnungsenergie und sind nur für statische Strukturberechnungen mit konstanten Lastbedingungen anwendbar. Die hier vorliegende Arbeit ermöglicht eine zeitsparende, nicht interaktiv arbeitende adaptive Netzverfeinerung für dynamische Analysen.

**Autor(en):** Borner, H.; Schulz, M. und Villain, J.

**Titel:** Holographische Verformungsmessung und Spannungsberechnung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode an einem Schichtenverbund

**Quelle:** Deutscher Verband für Schweißtechnik (DVS), 129 S.112

**Inhalt:**

Auf Siliziumsubstrat befindliche Strukturen werden häufig auf Trägermaterialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufgeklebt, wodurch erhebliche thermisch bedingte Schichtverspannungen im Bauteil auftreten können. In diesem Fachbeitrag wird zur quantitativen Untersuchung der Grenzschnitt-Spannungen die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt, wobei die Validierung des Modells mittels holographischer Interferometrie im Vordergrund steht. Modelliert wurde ein Schichtverbund bestehend aus Aluminium-Grundplatte (500 $\mu$ m), Kleberschicht (25 $\mu$ m), Siliziumsubstrat (525 $\mu$ m), zweier Polymerfolien (37 u. 50 $\mu$ m) und einer Glasplatte (1100 $\mu$ m). Simuliert wurde ein einmaliger Abkühlvorgang von 100°C (spannungsfreier Aushärtzustand des Klebers) auf 20°C, wobei die Abkühlung eine Verspannung der Baugruppe hervorruft. Die Oberflächendeformation des Bauteils wurde unter Temperaturwechselbeanspruchung und beim Aushärten des Klebers (konst. Temperatur) untersucht. Hierzu diente das Doppelbelichtungsverfahren der holographischen Interferometrie in Verbindung mit der Zwei-Referenzstrahl-Aufnahmetechnik. Die durch unterschiedliche Materialausdehnungskoeffizienten bedingten Verformungen zeigten eine lineare Temperaturabhängigkeit und bestätigte den linear elastischen Modellansatz. Die gemessene Verformung beim Aushärten des Klebers betrug nur ca. 6% gegenüber der maximalen Bauteildurchbiegung und rechtfertigte somit die modellierte Spannungsfreiheit des Verbundes nach dem Aushärten des Klebers. Wie die im Fachbericht dargelegten Ergebnisse zeigen, konnte in Verknüpfung von experimentellen Untersuchungen und numerischer Simulation ein Grundmodell erarbeitet werden, das die realen Bedingungen gut beschreibt. Konkrete Parameterstudien hinsichtlich Werkstoff- und Belastungsvarianten sind darauf aufbauend möglich.

**Bewertung:**

Der Fachbeitrag gibt ein gutes Beispiel für die experimentell gekoppelte Modellbildung von Mikrostrukturen, um in Anbetracht der kleinen Dimensionen ihre Gültigkeit abzusichern.

**Autor(en):** Jordan, E.H. und Walker, K.P.  
**Titel:** A viscoplastic model for single crystals  
**Quelle:** Transactions of the ASME: Journal of Engineering Materials and Technology, 114 (1992) S.19-26

**Inhalt:**

Bauteile in Siliziumtechnik werden aus einkristallinem Silizium hergestellt und unterscheiden sich von keramischen und Polysilizium-Strukturen durch die Anisotropie der meisten physikalischen Effekte. Wenn auch kommerzielle Finite-Elemente-Programme bereits erlauben, die Anisotropie des kubischen Siliziumgitters bei der Berechnung elastischen Werkstoffverhaltens zu berücksichtigen, wird oft mit gemittelten Materialdaten quasi-isotrop gerechnet. Dieses Verfahren ist jedoch zur Ermittlung der Bauteilfestigkeit eigentlich nicht zulässig.

Die Autoren stellen am Beispiel austenitischer Stähle ein FEM-implementiertes Verfahren zum Modellieren der plastischen Verformung von Einkristallen mit kubisch-flächenzentriertem Gitter vor, das die tatsächlich in der Gleitebene wirkende (Schmidtsche) Schubspannung sowie sekundäre Gleitsysteme mit einbezieht. Der Vergleich mit Experimenten zeigt, daß auf diese Weise auch schwer wiederzugebende Effekte wie anisotroper Bauschinger Effekt oder Zug-Druck-Anisotropie dargestellt werden können. Vor der Berechnung müssen allerdings die entsprechenden plastischen Werkstoff-Kenngrößen experimentell ermittelt werden.

**Bewertung:**

Die Mechanik von Strukturen im Mikrometerbereich stellt, soweit exakte Ergebnisse verlangt werden, neue Anforderungen an die Berechnungsmethoden, sodaß traditionelle Ansätze der Kontinuumsmechanik hier nicht uneingeschränkt gelten. Insbesondere die Problemfelder der Festigkeit von Silizium und des Kriechens von Metallisierungen sind noch ungelöst. Dieser Artikel behandelt ursprünglich nicht Siliziumstrukturen, ist aber für diese anwendbar.

**Autor(en):** Harris, R.M.; Maseeh, F. und Senturia S.D.  
**Titel:** Automatic generation of 3-D solid model of a microfabricated strukture  
**Quelle:** Digest of Technical Papers, Transducers '90, (1990) S.36

**Inhalt:**

Die zunehmende Komplexität und individuelle Auslegung von Mikrosystemen im Bereich der Sensorik und Aktuatorik bedingt einen zunehmenden Bedarf an CAD-Tools, die den Entwurf dieser Strukturen geeignet unterstützen. Von primärem Interesse sind hierbei CAD-Werkzeuge zur Simulation des mechanischen Bauteilverhaltens. Dieser Fachbeitrag befaßt sich daher mit der Erzeugung eines 3-D Modells ausgehend von Maskenlayout und Prozeßabfolge. Zudem sollen die Materialeigenschaften der wesentlichen Strukturkomponenten hiermit vorhersagbar sein und ihre mögliche Prozeßabhängigkeit miteinschließen.

Die vorgestellte CAD-Architektur setzt sich aus insgesamt drei Bereichen zusammen, der sog. "Microelektronic CAD", dem "Material Property Simulator" und "Mechanical CAD". Der zuletzt genannte Bereich beinhaltet primär das mechanische CAD- Paket PATRAN zur interaktiven Generierung des 3-D Modells der Mikrostruktur mit Graphik-Display und Schnittstellen zu FEM-Paketen (hier ABAQUS). Teil der Softwareeinheit "Microelectronic CAD" ist der Struktur-Simulator, der Maskenlayout und Prozeßinformation zu einem 3-dimensionalen Modell verschmelzt und so eine Prozeßmodellierung (hier mittels SUPREM-III u. SAMPLE) ermöglicht. Auf die Geometriedaten greift PATRAN direkt zu, die Materialart und die damit verbundenen Prozeßbedingungen jeder Strukturkomponente bilden die Basis für die Systemeinheit "Material Property Simulator". Hier wird entsprechend der Prozeßfolge auf der Basis eines sog. "Process History Files" für jede Strukturkomponente ein Datensatz von Materialeigenschaften generiert. Das Zusammenspiel der genannten CAD-Einheiten wird anhand eines konkreten Maskenlayouts und einer Prozeßfolge, bestehend aus planarer Schichtabscheidung und maskierter Ätzung, vorgestellt. Das erzeugte 3-D Modell war von der mechanischen CAD-Software direkt verwendbar und wurde zur Verformungsanalyse der Struktur erfolgreich verwendet.

**Bewertung:**

Das CAD-System stellt einen wichtigen Schritt dar zur computerunterstützten Integration aller Design- u. Herstellungsphasen von Mikrostrukturen. Fragen, wie z.B. die FE-spezifische Reduzierung oft umfangreicher CAD-Daten bleiben dennoch offen.

**Autor(en):** Hauptmann, P.  
**Titel:** Resonant sensors and applications  
**Quelle:** Sensors and Actuators A, 25-27 (1991) S.371

**Inhalt:**

Die Entwicklung von Sensoren, die ein intrinsisches digitales Ausgangssignal liefern, ist von fundamentaler Bedeutung für die weitere Entwicklung der digitalen Meßwerterfassung und Meßwertkontrolle. Unter intrinsisch digitalen Sensoren versteht der Autor Sensoren, die als Ausgangssignal eine Frequenzverschiebung, einen Zählimpuls oder eine Phasenverschiebung liefern. Mit dieser Review-Arbeit versucht der Autor einen Überblick über resonante Sensoren zu geben, die auf dem Funktionsprinzip von mechanisch resonanten Strukturen aufgebaut sind. Im besonderen wird auf piezoelektrisch angeregte Quarzresonatoren und auf Sensoren eingegangen, die mit mikromechanischen Fertigungsverfahren hergestellt werden. Diese Resonatoren schwingen im Bereich von 20 kHz bis in den Bereich von 100 MHz und höher. Je höher die Güte  $Q$  der resonanten Struktur ist, desto besser ist die Auflösungsgrenze. Silizium- und Quarz-Einkristallmaterial ist aus diesem Grund sehr gut geeignet. Piezoelektrisch angeregte resonante Sensoren können in drei Gruppen eingeteilt werden: die BAW (Bulk Acoustic Wave)-Sensoren, die SAW (Surface Acoustic Wave)-Sensoren und die LW (Lamb Wave)- Sensoren. Als Beispiel für BAW-Resonatoren geht der Autor näher auf QMB (Quarz Microbalance)-Sensoren im AT-Schnitt ein, deren Frequenzerniedrigung durch Massenbelegung mit Hilfe der Sauerbrey-Beziehung beschrieben werden kann. Der AT-Quarz wird als Dickenschwinger verwendet. Bei SAW-Sensoren werden die Rayleigh-Oberflächenwellen ausgenutzt, die mittels IDT's (Interdigital Transducers), d.h. kammähnlichen Elektroden, angeregt werden. Lamb-Wellen werden durch gleichartige Elektrodenformen in Membranen erzeugt, deren Dicke klein ist im Vergleich zur Ultraschall-Wellenlänge.

**Bewertung:**

Von den zuletzt erwähnten Lamb-Wellen-Resonatoren verspricht sich der Autor ein erhebliches Anwendungspotential. Allerdings beherrschen nur wenige Arbeitsgruppen (z.B. Berkeley Sensor and Actuator Center) diese Herstellungstechnologie.

**Autor(en):** Kourepenis, A.; Petrovich, A. und Weinberg, M.

**Titel:** Low cost quartz resonant accelerometer for aircraft inertial navigation

**Quelle:** Techn. Digest, Proc. 6 th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducer 91), San Francisco, USA, (June 23 - 27, 1991) S.551

**Inhalt:**

Beschleunigungsmesser für die Trägheits-Navigation (zum Beispiel in Flugzeugen) mit hoher Navigationsgenauigkeit benötigen eine Grundstabilität in der Größenordnung von 50  $\mu\text{g}$ 's, eine relative Genauigkeit von 0,01 % bezogen auf den Skalenendwert und eine Querachsenkopplung von kleiner als 0,01 %.

Beschleunigungsmesser, die diese Anforderungen erfüllen, sind aufgrund ihres komplexen Aufbaus und ihren Anforderungen bezüglich einer präzisen Konstruktion üblicherweise sehr teuer. In dieser Arbeit wird ein kostengünstiger (200 US\$ / Einheit) Quarz-Beschleunigungsmesser entwickelt. Das aktive Element dieses Beschleunigungsmessers wurde mittels Photolithographie monolithisch hergestellt. Es besteht aus einem Rahmen, einer Prüfmasse, zwei parallel angeordneten Doppelstimmgabeln (Double Ended Tuning Forks - DETF's) und vier Bändern zur Aufhängung. Die Quarz-Balken der DETF's haben eine Breite von 100  $\mu\text{m}$ , eine Dicke von 125  $\mu\text{m}$  und eine Länge von 2200  $\mu\text{m}$ . Sie werden über Elektroden piezoelektrisch zu Resonanzschwingungen angeregt. Eine Zugbeanspruchung vergrößert die laterale Steifigkeit und erhöht somit die Resonanzfrequenz. Eine laterale Druckbeanspruchung wirkt entgegengesetzt. Die Differenz der Resonanzfrequenzen liefert das Ausgangssignal des Beschleunigungssensors. Das Oszillator-Ausgangssignal wird an eine Phase-locked-loop-Schaltung gekoppelt, um eine Auflösung besser als 1 Hz zu erhalten. Die Devices wurden auf Ihren Fehleranteil quer zur Meßrichtung im Bereich 40 - 100  $\mu\text{g}$  getestet.

**Bewertung:**

Die projektierten Produktionskosten sind mit 200 US\$ / Einheit angegeben. Dieses Limit kann wahrscheinlich nur mit einer sehr ausgefeilten Aufbau- und Verbindungstechnik erreicht werden, die in dieser Arbeit nicht im entsprechenden Umfang erläutert wird.



**Autor(en):** Hauden, D.; Hoummady, M.; Choujaa, A. und Bastien, F.

**Titel:** Elastic wave sensors - quartz technological channel and silicon technology

**Quelle:** Sensors and Actuators A, 33 (1992) S.99-102

**Inhalt:**

Bulk- und Oberflächenwellen-Bauteile wie Resonatoren oder Laufzeit-Anordnungen reagieren empfindlich auf Temperatur-, Druck-, Massen-, Kraftänderungen und Änderungen des elektrischen Felds. Diese Bauteile, von den Autoren Elastic wave-Sensoren genannt, nutzen die mechanischen Schwingungseigenschaften von im allgemeinen einkristallinen und piezoelektrischen Materialien wie zum Beispiel Quarz und Lithiumniobat. Mit diesen Materialien lassen sich elastische Wellen relativ einfach generieren und nach Ausbreitung der Wellen auch einfach detektieren. Bei Bulk-Wellen geschieht dies durch plattenförmige Elektroden und bei Oberflächenwellen und Lambwellen durch IDT (Interdigital Transducer)-Elektroden. Das Sensorsignal dieser Bauteile kann in Form der Intensität (Abschwächung des Signals) oder in Form der Frequenz mit einem Oszillator-Schaltkreis gemessen werden. In dieser Arbeit wird im Bereich der Quarzsensoren eine interessante neue Gruppe von Sensoren untersucht, die Gruppe der Transversal-Horizontal-Wellen (TH)-Sensoren. Viscoelastizitäts- und Phasenübergangs-Messungen werden vorgestellt. Untersuchungen an Quarzmembran- und Siliziummembransensoren wurden durchgeführt. Die piezoelektrischen dünnen Schichten auf den Siliziummembranen bestehen aus ZnO oder AlN, die üblicherweise aufgesputtert werden. Lambwellenresonatoren wurden damit hergestellt und gemessen.

**Bewertung:**

Wie in der Arbeit auch erwähnt wird, besteht die Schwierigkeit bei den mittels piezoelektrischen Schichten angeregten Siliziummembransensoren in der Kompatibilität von ZnO mit den gebräuchlichen Siliziumprozessen für die Mikroelektronik und ebenso mit den typischen anisotropen Ätzprozessen in der Mikromechanik.

**Autor(en):** Spassov, L:  
**Titel:** Piezoelectric quartz resonators as highly sensitive temperature sensors  
**Quelle:** Sensors and Actuators A, 30 (1992) S.67-72

**Inhalt:**

In dem Artikel werden die physikalischen Prinzipien piezoresonanter Quarzsensoren vorgestellt und dabei eine besonders hohe Aufmerksamkeit auf Möglichkeiten und Grenzen thermosensitiver, als Temperatursensoren arbeitender Elemente gelegt. In einem kurzen Überblick werden die für eine Applikation wesentlichen theoretischen Grundlagen vorgestellt und Hinweise zum Design gegeben. Experimentell ermittelte Werte einer Empfindlichkeit von 1022 Hz/°C, einem absoluten Fehler von maximal 0,2°C in einem Intervall von -40°C bis 120°C und Auflösung bis zu  $10^{-6}$  °C hinterlegen einen neuen Typ eines ultraminiaturisierten, thermosensitiven Resonators, wobei besonders die extrem hohe Temperaturempfindlichkeit Beachtung verdient. Für Sensoren dieser Bauart spricht auch die hohe Langzeitstabilität. Erreichbar scheinen Temperaturdrifts, die unter 0,003°C pro Monat liegen. Die genutzten Arbeits- und somit Resonanzfrequenzen lagen alle im Megahertzbereich. Ebenfalls denkbare Einsatzgebiete thermosensitiver Quarzresonatoren liegen in der Messung von Unterdruck, Fließgeschwindigkeit, Wärmestrom sowie als hochempfindliches Radiometer für Laseremissionsleistungen im infraroten Bereich, wobei zu letzterem erste Ergebnisse bereits existierender Testmuster erwähnt werden.

**Bewertung:**

Dieser Artikel gibt einen guten Einblick in Grundlagen, zu Spezifikationen und Anwendungsmöglichkeiten thermosensitiver Quarzresonatoren. Die hiermit in Verbindung stehenden technologischen Probleme bei der Herstellung solcher Elemente werden nicht abgehandelt.

**Autor(en):** Blom, F. R.; Bouwstra, S.; Elwenspoek, M. und Fluitman, J.H.J.

**Titel:** Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry

**Quelle:** J. Vac. Sci. Technol., B 10 1 (1992) S.19

**Inhalt:**

Beim Entwurf und der Anwendung in Atmosphäre betriebener resonanter Siliziummikrostrukturen muß aus Gründen der Energieübertragung ein besonderes Augenmerk auf Dämpfungseffekte gelegt werden. Das Design von resonanten Mikrostrukturen muß dabei auf eine möglichst hohe Schwingungsgüte  $Q$  abzielen. Die vorliegende Arbeit befaßt sich in einem ersten Teil mit den theoretischen Grundlagen der Dämpfung von Mikrostrukturen. Es zeigt sich, daß abhängig vom Umgebungsdruck insgesamt drei Dämpfungsbereiche zu unterscheiden sind: den Bereich der intrinsischen, durch die Siliziummaterialeigenschaften bedingten Dämpfung, der unterhalb ca. 1 Pa liegt und druckunabhängig ist mit realisierten Schwingungsgüten von  $Q > 10^5$ . Dem molekularen Dämpfungsbereich zwischen  $1 \text{ Pa} < p < 100 \text{ Pa}$ , in dem  $Q$  proportional zu  $1/p$  abnimmt und schließlich den viskosen Dämpfungsbereich in dem  $Q$  zunächst druckunabhängig ist, oberhalb eines kritischen Druckes  $p_c$  jedoch proportional mit der Wurzel des Druckes abnimmt. Die theoretisch ermittelten Druckabhängigkeiten der Schwingungsgüte konnten experimentell weitgehend verifiziert werden. Anhand der theoretischen Überlegungen und experimentellen Ergebnisse werden Designregeln vorgeschlagen die darauf abzielen, den geometrieabhängigen kritischen Druck  $p_c$  möglichst über Atmosphärendruck zu halten.

**Bewertung:**

Bei der Herstellung frequenzanaloger Sensoren die an Atmosphäre betrieben werden, spielen Dämpfungseffekte eine entscheidende Rolle. Die Arbeit enthält neben einem Überblick zur Theorie und einer experimentellen Überprüfung Hinweise zum Design von resonanten Mikrostrukturen und liefert damit einen wichtigen Beitrag.

**Autor(en):** Legtenberg, R.; Bouwstra, S. und Fluitman, J. H.J.

**Titel:** Resonating microbridge mass flow sensor with low-temperature glass-bonded cap wafer

**Quelle:** Sensors and Actuators A, 25-27 (1991) S.723-727

**Inhalt:**

Die Autoren beschreiben einen Massenstromsensor auf Silizium, der mit Hilfe von Dünnschichttechnik und Mikromechanik hergestellt wurde. Der eigentliche Sensorchip besteht aus einer einen V-Graben überspannenden Siliziumnitrid-Mikrobrücke mit Polysilizium-Widerständen zur thermischen Schwingunganregung und piezoresistiven Schwingungsdetektion. Ein Gasstrom bedingt eine Kühlung und damit eine Verschiebung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Massenstrom (Thermo-Anemometer-Prinzip). Der Sensorchip ist ausführlich in einer früheren Veröffentlichung der Autoren beschrieben (Bouwstra et al., Sensors and Actuators, A21-A23 (1990), S.332-335). Zur Formung eines Fließkanals wird der Sensorchip mit einem zweiten Si-Chip verbunden, in den ein V-Graben geätzt ist. Die Verbindung der beiden Si-Chips erfolgt durch einen Bondprozeß bei niedriger Temperatur (1,5 µm Borglasschicht auf dem Fließkanalchip, 10 min bei 465 °C und einem Druck von 5000 Pa). Während des Aufschmelzprozesses beim Bonden wird die Glasschicht deformiert, so daß alle Unebenheiten, wie z.B. die Kontaktbahnen auf dem Sensorchip, hermetisch dicht geschlossen werden. Experimentelle Tests mit Stickstoff belegen eine Resonanzfrequenzverschiebung in der Größe von einigen kHz/sccm N<sub>2</sub> bei einer Temperaturerhöhung des Sensors gegenüber der Gastemperatur von 20 bis 100 °C.

**Bewertung:**

Bei dem vorgestellten Massenstromsensor sind sowohl das Sensorelement als auch die Medienführung mikrotechnisch in Silizium ausgeführt. Aufgrund des frequenzanalogen Ausgangssignals, der hohen Empfindlichkeit und der Möglichkeit zur Fertigung in einem Batch-Prozeß könnte dieser Sensor vielfältige Anwendung finden.

**Autor(en):** Zook, J.D.; Burns, D.W.; Guckel, H.; Sniegowski, J.J.; Engelstad, R.L. und Feng, Z.

**Titel:** Resonant microbeam strain transducers

**Quelle:** Techn. Digest, Proc. 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'91), San Francisco, USA, (June 23 - 27, 1991) S.529

**Inhalt:**

Resonante Mikrobalkenstrukturen aus Polysilizium können als spannungsempfindliche Elemente eingesetzt werden, um konventionelle Silizium-Piezowiderstände im Bereich der Präzisionsmeßtechnik zu ersetzen. Diese Elemente werden zum Beispiel mit Siliziummembranen oder mit flexibel aufgehängten seismischen Massen kombiniert, um Druck oder Beschleunigung direkt frequenzanalog auszuwerten. Vakuumgekapselte Mikrobalkenstrukturen mit einer Länge von 200 und 400  $\mu\text{m}$ , einer Breite von 45  $\mu\text{m}$  und einer Dicke von 1,8  $\mu\text{m}$  wurden mit LPCVD-Polysilizium hergestellt. Sie zeigen Gütewerte von größer als 25000. Ein Closed-loop Regelbetrieb wurde mit einer AGC (Automatic Gain Control)-Schaltung realisiert, um eine Überbelastung auszuschließen. Dabei wurde elektrostatisch angeregt und piezoresistiv ausgelesen. Die charakteristischen Resonanzfrequenzen der Balken wurden gemessen. Um das Verhalten dieser Strukturen zu beschreiben, ist es notwendig, analytische und numerische Berechnungen durchzuführen. Mit Hilfe der Simulations-Eckdaten, unterstützt von experimentellen Messungen können neue Simulations-Eckdaten ausgelegt werden. Die eindimensionalen Bewegungs-Differentialgleichungen eines beidseitig eingespannten Balkens mit einer axialen Belastung kann für laterale Schwingungsformen analytisch gelöst werden. Diese Lösungen könnten durch FEM-Berechnungen verifiziert werden. Zusätzlich wurden laterale und Torsionsschwingungsformen identifiziert. Analytische, numerische und experimentelle Ergebnisse wurden miteinander verglichen und stimmen gut überein.

**Bewertung:**

Auf die Technologie zur Herstellung dieser interessanten Resonatorstrukturen wird in der Arbeit leider zu wenig eingegangen. Das Problem der Vakuumkapselung ist zum Erreichen hoher Schwingungsgüten hier von besonderem Interesse.

**Autor(en):** Philp, W. R.; Booth, D. J.; Shelamoff, A. und Linthwaite, M. J.

**Titel:** A simple fibre optic sensor for measurement of vibrational frequencies

**Quelle:** Measurement Science and Technology, 3 (1992) S.603

**Inhalt:**

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine einfache Meßapparatur die aus wenigen Standardbauelementen der optischen Nachrichtentechnik und Elektronik aufgebaut ist. Eine LED-Lichtquelle (HP HFBR-1404) wird mit einem Rechtecksignal bei einer Frequenz von 1 MHz moduliert, ihr abgestrahltes Lichtsignal wird in eine optische Multimodefaser eingekoppelt und über einen optischen 50:50 Koppler auf die zu charakterisierende Struktur gestrahlt. Ein Teil des abgestrahlten Lichtsignals wird von der zu untersuchenden Struktur in die Faser reflektiert und von einer PIN-Photodiode detektiert. Änderungen des Abstandes zwischen Faserende und schwingender Struktur führen zu einer Intensitätsänderung des rückgestrahlten Signals in Form einer Amplitudenmodulation mit der Schwingungsfrequenz der Struktur. Diese Signalmodulation wird mit einem Synchrodetektor (Schaltung angegeben) detektiert. Das System kann bei einer bestrahlten Fläche von  $7 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ , einem Abstand von  $50 \text{ } \mu\text{m}$  bei einer spiegelnden Fläche eine Amplitude von  $1 \text{ } \mu\text{m}$  auflösen. Der Arbeitsabstand kann bei entsprechend geringerer Auflösung auf einige  $100 \text{ } \mu\text{m}$  erhöht werden.

**Bewertung:**

Die Vermessung der Schwingungsfrequenzen resonanter mikromechanischer Bauelemente stellt eine häufig gestellte Aufgabe bei der Charakterisierung mikrotechnischer Bauelemente dar. In der Entwicklungsphase der Bauelemente werden hierfür teure und komplexe Meßgeräte eingesetzt, die zur routinemäßigen "Inline-Prüfung" ungeeignet sind. Die vorliegende Arbeit beschreibt eine mögliche, preiswerte Alternative mit der resonante mikrotechnische Strukturen im Sinne eines einfachen "go no-go"-Tests vor der Vereinzelung geprüft werden können.

**An der Erstellung der Artikel wirken regelmäßig mit:**

Dipl.-Ing. Matthias Ashauer  
Dipl.-Phys. Wolfgang Bach  
Dipl.-Phys. Thomas Fabula  
Dipl.-Ing. Henning Haffner  
Dipl.-Phys. Nicolaus Hey  
Dipl.-Ing. Kai Hiltmann  
Dipl.-Phys. Axel Schumacher  
Dipl.-Phys. Hans-Joachim Wagner

**Redaktionelle Überarbeitung:**

Dipl.-Ing. Heidi Ashauer  
Dr. rer. nat. Bertram Schmidt