

KfK 4859
April 1991

Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik

**C. Burbaum, J. Mohr
Institut für Mikrostrukturtechnik**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Mikrostrukturtechnik

KfK 4859

Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik

C. Burbaum*), J. Mohr

*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität
Karlsruhe genehmigte Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Herstellung von kapazitiven Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik

Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung von Prototypen mit dem LIGA-Verfahren wurden kapazitive Beschleunigungssensoren hergestellt und deren Funktionstüchtigkeit nachgewiesen. Im theoretischen Teil der Arbeit wurden die Leistungsdaten der Sensoren als Funktion der Geometrieparameter berechnet und die sich daraus ergebenden Anforderungen an den Herstellungsprozeß untersucht. Als kritische Größe des Sensordesigns hat sich dabei die Spaltweite des Kondensators herausgestellt, die für die Beschleunigungssensoren - mit der geforderten Empfindlichkeit in der Größenordnung von 20 %/g und gleichzeitig mit einer Resonanzfrequenz größer als 500 Hz - kleiner als 4 µm sein muß. Für das aus den Berechnungen erarbeitete Design wurde ein Herstellungsverfahren entwickelt, mit dem erstmalig mit dem LIGA-Verfahren bewegliche Mikrostrukturen hergestellt wurden. Bei diesem Herstellungsverfahren werden die Mikrostrukturen auf einer strukturierten Opferschicht erzeugt, so daß sie teilweise in direktem Kontakt mit dem Substrat stehen und teilweise auf der Opferschicht zu liegen kommen. Die Opferschicht wird im letzten Schritt des Herstellungsprozesses selektiv gegen die Mikrostruktur und das Substrat geätzt. Die Bereiche der Mikrostruktur, die auf der Opferschicht lagen, werden dadurch frei beweglich. Eine ausreichend gute Haftung der feinen, wenige Mikrometer starken Resiststrukturen des LIGA-Verfahrens wird durch die Verwendung von Titan als Material der Opferschicht erreicht. Titan wird mit Flußsäure geätzt, ausreichende Beständigkeit gegen den Angriff von Flußsäure zeigten Substrate aus Silizium mit einer Passivierung aus Siliziumnitrid und Aluminiumoxidkeramik. Um eine haftfeste Verbindung zwischen Substrat und Mikrostruktur zu gewährleisten, wird eine Metallisierung aus Chrom und Silber verwendet. Diese Schichtkombination kann mit optischer Lithographie und Ätzprozessen mit guter Genauigkeit strukturiert werden. Die Ätzrate der Titan Opferschicht ist im untersuchten Bereich unabhängig sowohl von der Länge der bereits freigeätzten Strecke als auch von der Dicke der Opferschicht. Die Konzentration der Flußsäurelösung hat in einem Bereich von 1% -10 % keinen Einfluß auf die Qualität der Mikrostrukturen. Die Funktionstüchtigkeit der mit diesem Verfahren hergestellten Sensoren wurde durch Messung der statischen und dynamischen Eigenschaften der Sensoren nachgewiesen. Die Ergebnisse dieser Messungen stimmen gut mit den theoretisch berechneten Werten überein.

Fabrication of Capacitive Acceleration Sensors by the LIGA Technique

Abstract

Within the framework of prototype development based on the LIGA technique capacitive acceleration sensors were fabricated and their performance was demonstrated. In the theoretical part of the work the performance data of the sensors were calculated as a function of the geometric parameters and the resulting requirements on the process of fabrication were studied. The critical dimension in sensor design appeared to be the gap width of the capacitor which for the acceleration sensors - considering the required sensitivity on the order of 20%/g and, at the same time, the resonance frequency greater than 500 Hz - must be smaller than 4 μm . For the design elaborated from the calculations a fabrication technique was developed by which movable microstructures were fabricated for the first time using the LIGA technique. According to this technique of fabrication the microstructures are produced on a patterned sacrificial layer so that parts of them directly contact the substrate whereas other parts lie on the sacrificial layer. In the last step of the fabrication process the sacrificial layer is etched selectively onto the microstructure and the substrate. Those parts of the microstructure which lie on the sacrificial layer become freely movable in this way. Sufficiently good adhesion of the fine, a few micrometers thick resist structures produced by the LIGA technique is achieved by use of titanium as material for the sacrificial layer. Titanium is etched with hydrofluoric acid. An adequate resistance to the attack by hydrofluoric acid was exhibited by substrates made from silicon with a passivation provided of silicon nitride and aluminium oxide ceramic. To ensure permanent adhesion between the substrate and the microstructure, metallization by chromium and silver is applied. These layers can be patterned with good accuracy by optical lithography and etching processes. The rate of etching of the titanium sacrificial layer is within the analysed range independent both of the length of the section already etched and of the thickness of the sacrificial layer. The concentration of the hydrofluoric acid solution between 1% -10% has no influence on the quality of the microstructures. The performance of the sensors produced by this technique was proved by measurements of the static and dynamic properties of the sensors. The results of these measurements agree well with the values calculated in the theoretical part.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Berechnung der Sensoren	6
2.1. Vorgaben für die Berechnung der Sensoren	6
2.2. Berechnung der Empfindlichkeit	7
2.2.1. Zunge	7
2.2.2. Zunge mit seismischer Masse	10
2.3. Resonanzfrequenz	14
2.3.1. Zunge	14
2.3.2. Zunge mit seismischer Masse	14
2.4. Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz und Empfindlichkeit	17
2.5. Querempfindlichkeit	21
2.6. Biegespannung	24
2.7. Umsetzung des Designs mit dem LIGA-Verfahren.	28
3. Untersuchung zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen	30
3.1. Grundprinzip des Herstellungsverfahrens	30
3.2. Substratmaterialien	33
3.2.1. Auswahl der Substrate	33
3.2.2. Untersuchung des Ätzverhaltens der Substrate in Flußsäure	33
3.3. Metallisierung der Substrate	35
3.3.1. Auswahl der Metallisierungsschichten	35
3.3.2. Ätzlösungen für die Metallisierung	37
3.3.3. Untersuchung zur Ätzung der Silberschicht	38
3.3.4. Untersuchung zur Ätzung der Chromschicht	39
3.3.5. Haftung der Metallisierungsschichten	40

3.4. Strukturierung der Titanopferschicht	41
3.5. Freiätzen der Mikrostrukturen	42
3.6. Untersuchungen zur Beseitigung der Unterplattierung	43
3.6.1. Beseitigung der Unterplattierung durch Sputtern	44
3.6.2. Beseitigung der Unterplattierung durch eine galvanische Zwischenschicht	45
4. Untersuchung der Sensoren	47
4.1. Untersuchung der Empfindlichkeit	50
4.1.1. Meßaufbau	50
4.1.2. Meßergebnisse	50
4.2. Untersuchung der Resonanzfrequenz	51
4.2.1. Meßaufbau	51
4.2.2. Meßergebnisse	52
4.3. Untersuchung der Querempfindlichkeit	52
4.4. Vergleich der experimentellen Daten mit der Theorie	53
5. Zusammenfassung und Diskussion	57
Literaturverzeichnis	62

1. Einleitung

Die Mikroelektronik ist heute zu einer Basistechnologie geworden. Es gibt so gut wie keinen technischen Bereich, in dem auf die Anwendung von Mikroprozessoren zum Steuern und Rechnen verzichtet werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Leistungsfähigkeit von elektronischen Bauelementen in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegen ist und die Kosten für die Fertigung gesunken sind. Erreicht wurde dieser Fortschritt durch die konsequente Anwendung paralleler Fertigungsmethoden und die zunehmende Miniaturisierung.

Im Gegensatz zu der hohen Leistungsfähigkeit und der großen Komplexität der elektronischen Datenverarbeitung haben Elemente zur Erfassung von physikalischen und chemischen Parametern sowie zur Umsetzung von Steuerimpulsen mit der stürmischen Entwicklung der Mikroelektronik nicht Schritt halten können. Sowohl die heutzutage feinmechanisch hergestellten Sensoren und Aktoren als auch die störanfälligen Verbindungen zwischen diesen Elementen und den elektronischen Bauteilen stellen in vielen Fällen die teuersten und leistungsbegrenzenden Bauelemente der Gesamtsysteme dar /1/. Diesen Mangel zu beheben hat sich die Mikromechanik mit der Herstellung von preiswerten und leistungsfähigen Sensoren und Aktoren zum Ziel gesetzt /2/. Dabei werden die aus der Mikroelektronik bekannten Herstellungsprozesse auf die Fertigung von mechanischen Bauelementen übertragen, um zu ähnlichen Leistungssteigerungen und Kostensenkungen zu gelangen. Es besteht jedoch die Notwendigkeit, die vorwiegend zweidimensionalen Herstellungsprozesse der Mikroelektronik so zu erweitern, daß zumindest ansatzweise dreidimensionale Strukturen hergestellt werden können. Um die hohen Kosten für das Zusammenfügen der verschiedenen Bauelemente zu minimieren, wird langfristig die Integration von mechanischen und elektrischen Komponenten zu komplexen Gesamtsystemen angestrebt.

Zur Herstellung von mikromechanischen Bauelementen werden heute vorwiegend drei Herstellungstechniken angewendet: anisotropes Siliziumätzen /3/, Ionenätzprozesse wie z. B. Reaktives Ionen Ätzen (RIE) /4, 5/ und das LIGA-Verfahren /6/.

Das anisotrope Siliziumätzen nutzt die unterschiedlichen Ätzraten von einkristallinem Silizium in Abhängigkeit von der Kristallmorphologie. In Verbindung mit Ätzstoppschichten lassen sich so als primäre Strukturen Gräben, dünne Membranen und Biegefedern mit daran befestigten Massen herstellen. Aus diesen mechanisch relativ einfachen Strukturen werden durch Kombination

mit anderen Techniken, wie Abscheiden von dünnen Filmen, lokales Dotieren oder Zusammenfügen von mehreren mikromechanisch hergestellten Strukturen durch anodisches Bonden, insbesondere Sensoren für Druck oder Beschleunigung hergestellt /7/. Der wesentliche Nachteil des anisotropen Siliziumätzens ist die Bindung an die Kristallstruktur des Siliziums, wodurch die Geometrie der herstellbaren Strukturen stark eingeschränkt wird.

Durch RIE können beliebige Materialien zweidimensional frei strukturiert werden. Wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist, daß mit vertretbarem Aufwand nur einige Mikrometer Strukturhöhe möglich sind. Die mit RIE hergestellten Strukturen sind normalerweise fest auf einem Substrat verankert. Durch Kombination mit einer Opferschicht aus Phosphor dotiertem Glas können auch bewegliche Strukturen hergestellt werden /7/. Mit diesem Verfahren wurden zahlreiche elektrostatische Aktoren, wie beispielsweise Resonatorstrukturen oder Mikromotoren, realisiert. Aufgrund der geringen Höhe haben die Strukturen jedoch zum Teil nur eine kurze Lebensdauer, und die übertragbaren Kräfte sind gering.

Das im Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelte LIGA-Verfahren nutzt die große Strukturierungstiefe und Präzision der Röntgentiefenlithographie /9 - 11/. Es lassen sich damit Mikrostrukturen mit beliebiger zweidimensionaler Geometrie erzeugen. Die kleinsten lateralen Dimensionen liegen in der Größenordnung von wenigen Mikrometern mit Toleranzen im Submikrometerbereich. Die Strukturhöhen können mehrere hundert Mikrometer betragen. Als Materialien können verschiedene Kunststoffe, Metalle oder Keramik eingesetzt werden. Die bisher mit dem LIGA-Verfahren erzeugten Strukturen waren allerdings entweder fest mit einem Substrat verbunden oder wurden vollständig vom Substrat abgelöst. Damit konnten viele Bereiche in der Sensorik und Aktorik, die bewegliche Strukturen erfordern, bisher nicht erschlossen werden.

Gerade mikromechanische Sensoren zur Messung von Druck und insbesondere Beschleunigung haben jedoch ein breites Anwendungsgebiet im Kraftfahrzeugbau und sind so attraktive Bereiche der Mikromechanik. Bei den bisher nach der Siliziumtechnik hergestellten Beschleunigungssensoren wird überwiegend der piezoresistive Effekt zum Nachweis der Beschleunigung eingesetzt. Dabei wird die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Biegespannung in piezoresistiven Materialien ausgenutzt. Der Piezokoeffizient hängt jedoch stark von der Temperatur ab, weshalb diese Sensoren aufwendig kompensiert und kalibriert werden müssen /12/. Um diesen Nachteil zu umgehen, wird in neueren Entwicklungen versucht, Sensoren herzustellen, die kapazitiv arbeiten.

Dabei werden durch Verbindungstechniken, z.B. durch anodisches Bonden, mehrere mikromechanisch bearbeitete Bauteile zu einer Kondensatoranordnung zusammengefügt [3]. Da eine Platte des Kondensators beweglich aufgehängt ist, ändert sich die Kapazität bei Beschleunigung. Der Nachteil dieses Verfahrens ist der große Aufwand für die Verbindung der verschiedenen Teile des Kondensators.

Dieser Nachteil kann bei der Herstellung von Kondensatorstrukturen mit dem LIGA-Verfahren vermieden werden, da in diesem Fall die Kondensatorplatten in einem Schritt mit genau definiertem Abstand hergestellt werden können. Ziel dieser Arbeit war es daher, mit dem LIGA-Verfahren einen kapazitiven Beschleunigungssensor zu realisieren.

In einem theoretischen Teil der Arbeit wird zunächst die Abhängigkeit der Leistungsdaten kapazitiver Beschleunigungssensoren von den Geometrieparametern untersucht. Dabei zeigt sich, daß die Anforderungen an den Sensor, die sich durch die geplante Anwendung in Kraftfahrzeugen ergeben, mit LIGA-Strukturen, die vollständig mit einem Substrat verbunden sind, nicht erfüllt werden können. Die Anforderungen an die Abmessungen solcher Strukturen übersteigen die derzeitigen Möglichkeiten des LIGA-Verfahrens. Bei Verwendung von parallel zur Substratoberfläche beweglichen Bauteilen lassen sich Sensoren realisieren, die den Anforderungen genügen. Zur Herstellung solcher Strukturen war es jedoch notwendig, eine Opferschichttechnik zu entwickeln, so daß gleichzeitig bewegliche und fest verankerte Strukturen auf einem Substrat erzeugt werden können. Hierzu mußten die einzelnen Verfahrensschritte entwickelt werden, insbesondere mußte eine geeignete Opferschicht ausgesucht sowie die notwendigen Ätzprozesse erarbeitet werden.

Das Opferschichtverfahren ist in Abb. 1.1 schematisch dargestellt.

Das Grundprinzip besteht darin, den röntgentiefenlithographischen Strukturierungsprozeß auf einem vorstrukturierten Substrat durchzuführen. Dabei sind Teile des Substrats mit der Opferschicht bedeckt, die selektiv gegen das Material der zu erzeugenden LIGA-Struktur geätzt werden kann (A). Bei einer zu dieser strukturierten Opferschicht justierten röntgentiefenlithographischen Belichtung (B) kommen nach Entfernen des bestrahlten Resists und galvanischer Abscheidung eines Metalls Teile der Strukturen auf der Opferschicht zu liegen (C). Diese Bereiche sind nach dem Ätzen der Opferschicht (D) nicht mit dem Substrat verbunden und somit frei beweglich. Die Strukturen, die nicht auf der Opferschicht stehen, sind dagegen fest auf dem Substrat verankert. Handelt es sich bei der beweglichen Struktur um eine seismische Masse, die an einem

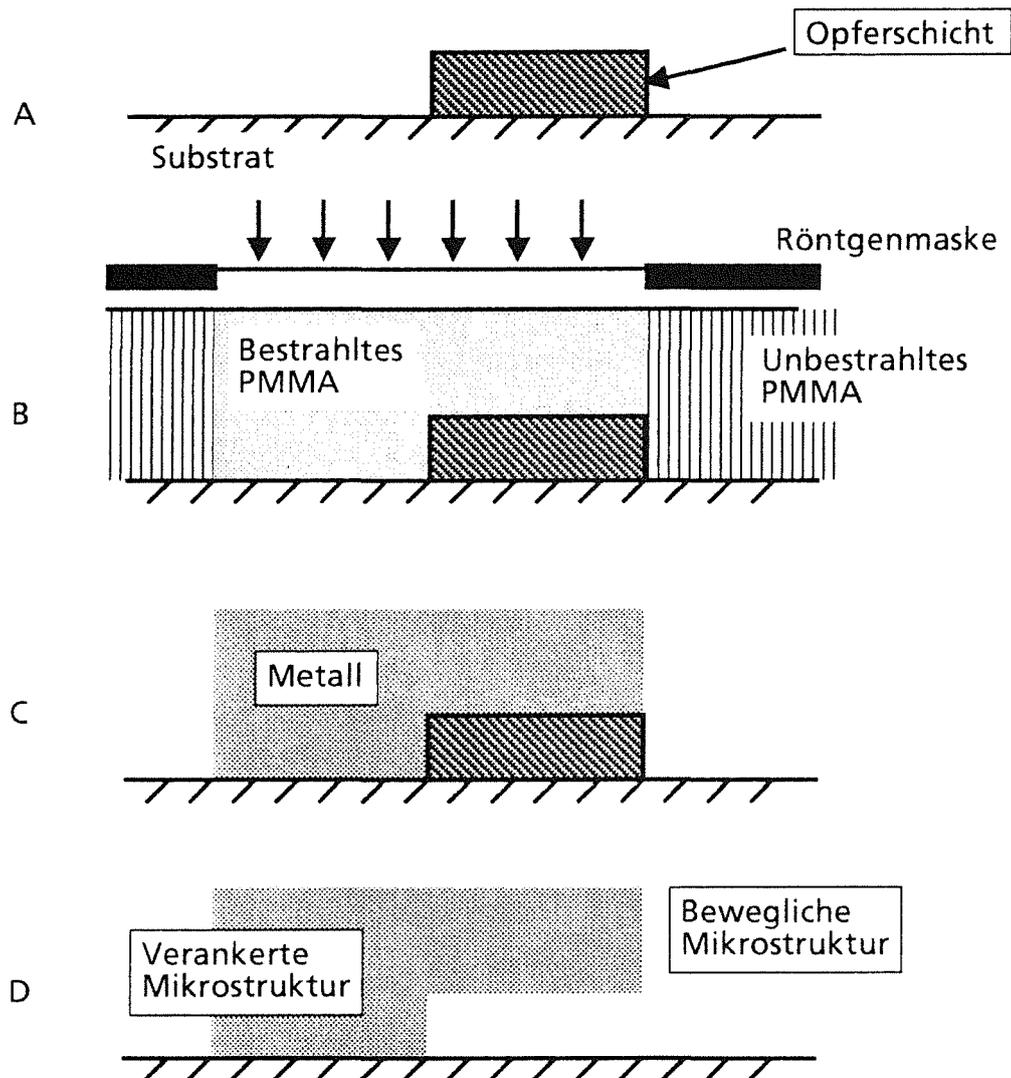


Abb 1.1 Prinzip des Opferschichtverfahrens

entsprechend dünn ausgelegten Biegebalken aufgehängt ist, so entsteht eine Struktur, die durch eine Beschleunigung ausgelenkt wird. Diese Auslenkung kann nachgewiesen werden, indem die Kapazität gegen eine fest verankerte Gegenelektrode gemessen wird. Beim LIGA-Verfahren werden die Gegenelektroden, die Biegefeder und die bewegliche Struktur in einem Lithographieschritt erzeugt.

Mit diesem Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit Beschleunigungssensoren hergestellt. Die Leistungsdaten der Sensoren, wie Empfindlichkeit und

Resonanzfrequenz, wurden experimentell überprüft und entsprechen den von der Theorie erwarteten Daten. Somit konnte die Tauglichkeit des Herstellungsverfahrens nachgewiesen werden.

Da bei dem vorgestellten Verfahren die für das LIGA-Verfahren typischen Vorteile, insbesondere die freie Geometriewahl und die große Strukturhöhe, erhalten bleiben, können über den Beschleunigungssensor hinaus auch andere Strukturen wie Zahnräder, Schieber, Resonatoren oder ähnliche Strukturen hergestellt werden. Somit eröffnet dieses Verfahren weitere Anwendungsgebiete für das LIGA-Verfahren.

2. Berechnung der Sensoren

2.1. Vorgaben für die Berechnung der Sensoren

Die wichtigste Kenngröße eines Beschleunigungssensors ist die Empfindlichkeit, die für einen kapazitiven Beschleunigungssensor als Verhältnis von Kapazitätsänderung ΔC zu Ruhekapazität C_0 definiert wird. In Verbindung mit dem Auflösungsvermögen der Elektronik ist die Empfindlichkeit ein Maß für die minimal nachweisbare Beschleunigung. Aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens der Elektronik ist die minimal nachweisbare Beschleunigung bei gleicher Empfindlichkeit umso kleiner, je größer die Ruhekapazität der Kondensatoranordnung ist. Für den nach dem LIGA-Verfahren herzustellenden Beschleunigungssensor wird eine Ruhekapazität von minimal einem Picofarad angestrebt, und die geforderte Empfindlichkeit des Sensors wurde mit 20% Signaländerung pro g (Erdbeschleunigung) angesetzt. Damit ist die Empfindlichkeit so ausgelegt, daß die Funktion des Sensors mit einem externen Meßaufbau durch Drehen im Beschleunigungsfeld der Erde nachgewiesen werden kann. Mit dem von den mikromechanischen Beschleunigungssensoren aus Silizium bekannten Auflösungsvermögen einer direkt neben dem Sensor angeordneten Hybrid-Elektronik könnten damit allerdings noch statische Beschleunigungen von einigen Hundertstel der Erdbeschleunigung gemessen werden /13/.

Da der Beschleunigungssensor ein schwingfähiges System darstellt, besitzt er eine von den Geometrieparametern abhängige Resonanzfrequenz, bei der die Auslenkung des Sensors bei geringer Dämpfung sehr stark ansteigt. Daher ist bei Anregung des Sensors mit Frequenzen in der Nähe der Resonanzfrequenz die Auslenkung des Sensors nicht mehr proportional zur Beschleunigung. Da sich das besondere Interesse an Beschleunigungssensoren aus den potentiellen Anwendungen in Kraftfahrzeugen ergibt, sollte die Resonanzfrequenz deutlich höher sein als die im Kraftfahrzeug auftretenden Schwingungen. Dabei müssen vor allen Dingen die Motorvibrationen berücksichtigt werden. Bei einer Motordrehzahl von bis zu 6000 U/min betragen diese bis zu 100 Hz. Um deutlich oberhalb dieser Frequenz zu liegen, wurde der herzustellende Sensor so ausgelegt, daß seine Resonanzfrequenz mindestens 500 Hz beträgt.

Neben den Anforderungen an Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz darf der Beschleunigungssensor nur eine geringe Querempfindlichkeit aufweisen. Das heißt, daß die Signaländerung des Sensors bei Beschleunigungen senkrecht zur Meßrichtung möglichst gering sein muß. Somit muß die Auslenkung des Sensors senkrecht zur Meßrichtung gering sein, und er muß unempfindlich gegen Knicken

und Kippen sein. Ebenso sollte die Anregung von anderen Schwingungsmoden, wie zum Beispiel Torsionsschwingungen des Sensors, unterdrückt werden.

Da die mit dem LIGA-Verfahren hergestellten Sensoren aus Metall bestehen und Metalle biegespannungsabhängigen Alterungsprozessen unterliegen, müssen die in der Biegezunge auftretenden mechanischen Spannungen so gering sein, daß während der Lebensdauer der Sensoren ($> 10^9$ Schwingungen) die altersbedingte Drift kleiner als 1 % ist.

2.2. Berechnung der Empfindlichkeit

Ein kapazitiver Beschleunigungssensor läßt sich im Prinzip mit zwei verschiedenen Designtypen realisieren. Das erste Design geht von einer dünnen Zunge aus, die sich gegenüber einer festen Gegenelektrode bewegt. Die dünne Zunge stellt sowohl die Biegefeder als auch die seismische Masse dar, an der die Beschleunigung angreift (Abb.2.1). Im zweiten Fall sind die Funktionen Biegefeder und seismische Masse getrennt. Der Beschleunigungssensor besteht aus einer dünnen Biegezunge, an der eine deutlich schwerere seismische Masse aufgehängt ist. Die Kapazität wird zwischen dieser seismischen Masse und einer ebenfalls feststehenden Gegenelektrode gemessen (Abb. 2.4).

Für beide Designtypen werden in den folgenden Kapiteln die Abhängigkeiten der Empfindlichkeit, der Resonanzfrequenz, der Querempfindlichkeit und der Biegespannungen von den Geometrieparametern diskutiert.

2.2.1. Zunge

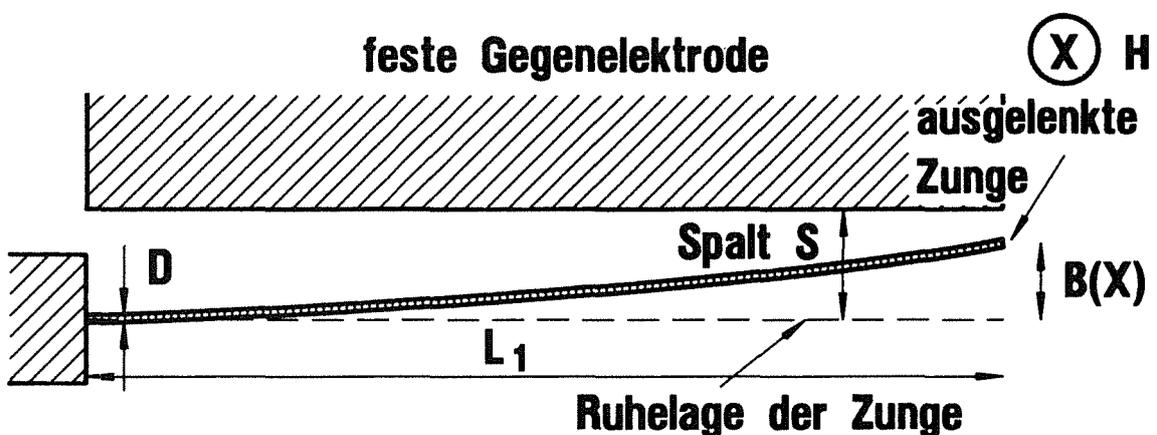


Abb.2.1 Prinzipielles Design eines nur aus einer Biegezunge bestehenden Beschleunigungssensors

Die verwendeten Formelzeichen haben folgende Bedeutung:

ϵ_0 = Elektrische Feldkonstante
 H = Höhe der Struktur (senkrecht zur Zeichenebene)
 S = Kondensatorspalt
 L_1 = Länge der Zunge
 L_1 = Länge der Zunge
 M_1 = Masse der Zunge
 E = Elastizitätsmodul
 D = Dicke der Zunge (in Zeichenebene)
 H = Höhe der Struktur (Senkrecht zur Zeichenebene)
 I = Trägheitsmoment = $D^3H/12$
 a = Beschleunigung.

Für das Design einer dünnen Biegezungge berechnet sich die Kapazität C_0 in der Ruhelage mit den in Abb. 2.1 angegebenen Geometrieparametern nach Gleichung 1.

$$(1) \quad C_0 = \epsilon_0 \frac{\text{Fläche}}{\text{Plattenabstand}} = \epsilon_0 \frac{L_1 H}{S}$$

Bei einem Plattenabstand von $3 \mu\text{m}$ benötigt man beispielsweise eine Fläche von $3,6 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$, um eine Kapazität von einem Picofarad zu erreichen; bei einem Plattenabstand von $6 \mu\text{m}$ verdoppelt sich entsprechend die benötigte Fläche.

Zur Bestimmung der Empfindlichkeit:

$$E^\circ = \frac{\Delta C}{C_0}$$

muß die Kapazitätsänderung als Differenz von Grundkapazität C_0 und Kapazität C_a unter Beschleunigung berechnet werden. Dazu wird die Auslenkung $B(X)$ der Zunge aus der Biegelinie nach Gleichung 2 an N (z. B. 1000) Punkten berechnet /14/.

$$(2) \quad B(X) = \frac{M_1 a}{24 E I L_1} X^2 (X^2 - 4 L_1 X + 6 L_1^2)$$

Jeder dieser N Punkte wird als Plattenkondensator mit dem N ten Teil der Zungenfläche aufgefaßt. Damit errechnet sich die Kapazität unter Beschleunigung C_a nach Gleichung 3.

$$(3) \quad C_a = \sum_n^N \epsilon_0 \frac{L_1 H}{N(S - B(X))} \quad \text{mit} \quad X = n \frac{L_1}{N}$$

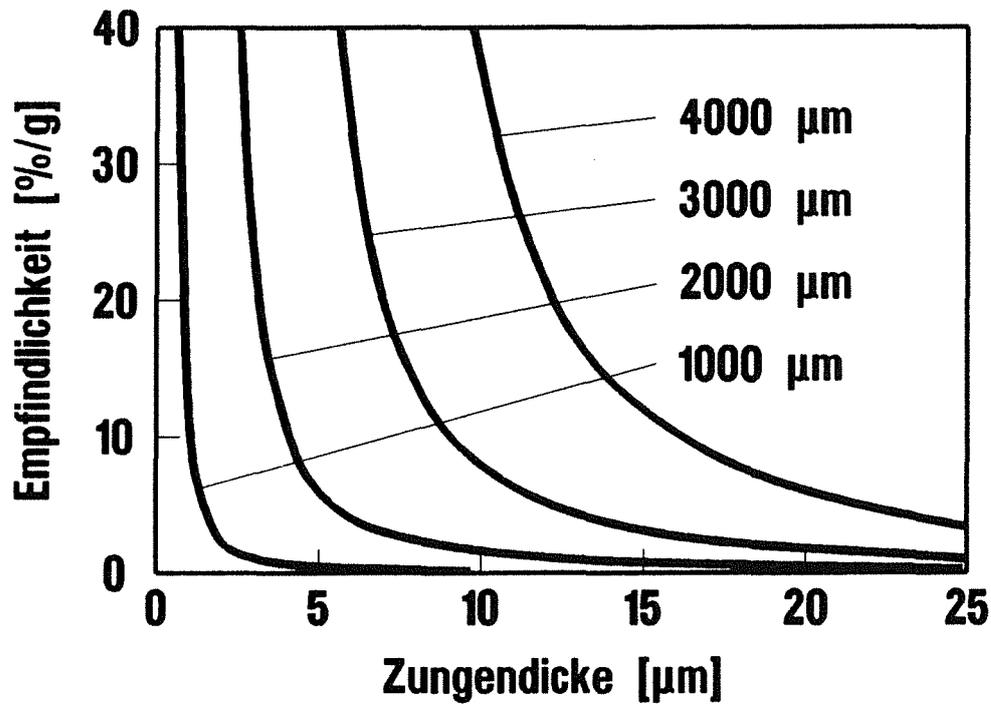


Abb.2.2 Zunge: Empfindlichkeit als Funktion der Zungendicke bei Variation der Zungenlänge.
Die Weite des Kondensatorspaltes beträgt 3 μm.

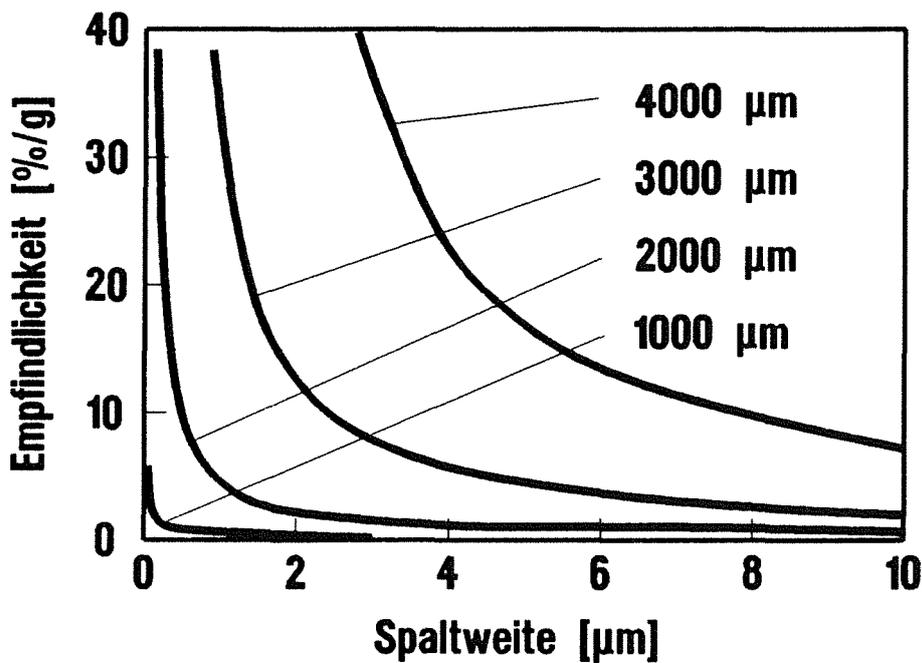


Abb 2.3 Zunge: Empfindlichkeit als Funktion der Weite des Kondensatorspaltes bei Variation der Zungenlänge.
Die Zungendicke beträgt 10 μm.

Die Empfindlichkeit E° errechnet sich mit Gleichung 4.

$$(4) \quad E^\circ = \frac{C_a - C_0}{C_0} = \left| \sum_n \frac{1}{N} \frac{1}{1 - B(X)/S} - 1 \right| \cdot 100 \%$$

Abb. 2.2 zeigt die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Zungendicke für verschiedene Zungenlängen. Die Spaltweite ist in diesen Kurven mit $3 \mu\text{m}$ konstant gehalten.

Abb. 2.3 zeigt die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Spaltweite bei verschiedenen Zungenlängen. Die Zungendicke ist mit $10 \mu\text{m}$ konstant gehalten.

Die Empfindlichkeit nimmt mit abnehmender Spaltweite, zunehmender Zungenlänge und abnehmender Zungendicke zu. Die Höhe der Sensoren hat keinen Einfluß auf die Empfindlichkeit. Die gewünschte Empfindlichkeit von $20 \%/g$ wird bei kurzen Zungen (kleiner $1000 \mu\text{m}$) nur mit geringen Zungendicken und geringen Spaltweiten erreicht (jeweils kleiner $1 \mu\text{m}$). Längere Zungen (größer $3000 \mu\text{m}$) erlauben Zungendicken und Spaltweiten in der Größenordnung von einigen Mikrometern.

2.2.2. Zunge mit seismischer Masse

Das zweite Design für einen Beschleunigungssensor besteht aus einer Biegefeder und einer seismischen Masse (siehe Abb. 2.4).

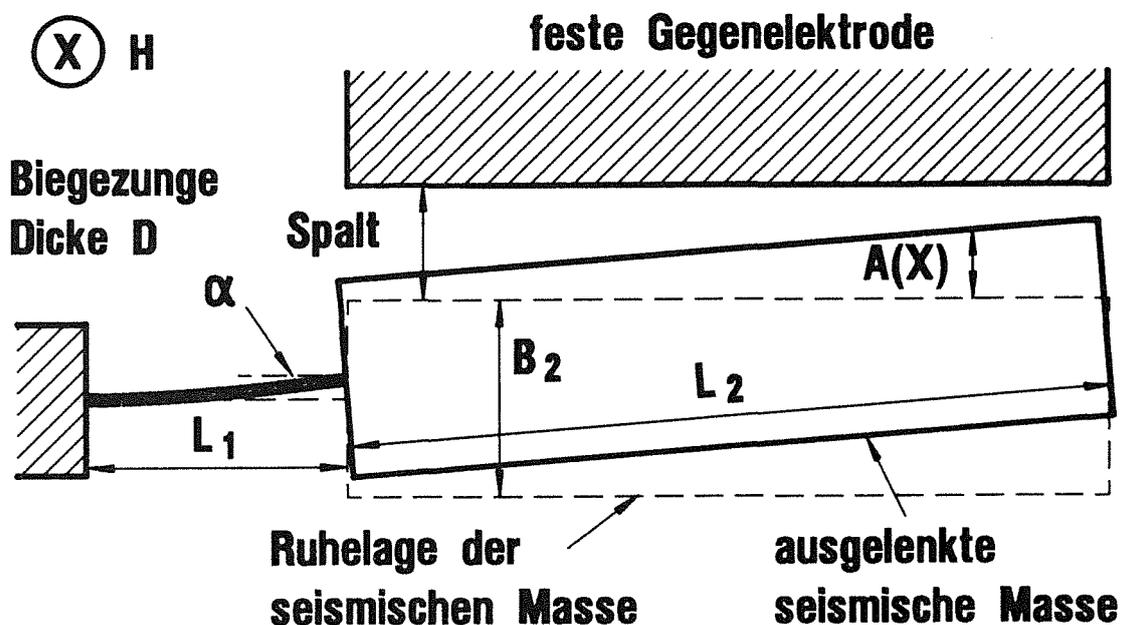


Abb.2.4 Prinzipielles Design eines Beschleunigungssensor der aus einer Biegezunge und einer seismischen Masse besteht

Zusätzlich zu den in 2.2.1. verwendeten Formelzeichen muß noch die seismische Masse berücksichtigt werden:

M_2 = Masse der seismischen Masse

L_2 = Länge der seismischen Masse

$\alpha(L_1)$ = Winkel der Biegezugung am Übergang von Zunge zu seismischer Masse

B_2 = Breite der seismischen Masse (in Zeichenebene)

Die Ruhekapazität eines solchen Sensors ergibt sich aus Gleichung 5.

$$(5) \quad C_0 = \varepsilon_0 \frac{\text{Fläche}}{\text{Plattenabstand}} = \varepsilon_0 \frac{L_2 H}{S}$$

In diesem Fall berechnet sich die Kapazität unter Beschleunigung aus der Auslenkung der Biegezugung an der Stelle L_1 und aus der Winkellage α der seismischen Masse.

$$(6) \quad A(X) = B(L_1) - X \sin(\alpha(L_1)) \quad \text{mit } 0 \leq X \leq L_2$$

Aus der Biegelinie /14/ nach Gleichung 7:

$$(7) \quad B(X) = \frac{M_1 a}{24 E I L_1} X^2 (X^2 - 4 L_1 X (\mu + 1) + 6 L_1^2 (1 + 2\mu + 2f\mu))$$

$$\text{mit } \mu = M_2 / M_1 \quad f = L_2 / 2 L_1 \quad I = H D^3 / 12$$

errechnet sich die Auslenkung am Ende der Zunge nach Gleichung 8:

$$(8) \quad B(L_1) = \frac{\alpha \rho L_1^4}{2 E D^2} \left(3 + 8 \frac{L_2 B_2}{L_1 D} + 12 \frac{L_2^2 B_2}{L_1^2 D} \right)$$

und hat dabei im Vergleich zur Ruhelage einen Winkel α .

$$(9) \quad \alpha(L_1) = \frac{6 \alpha \rho L_1^3}{E D^2} \left(4 + 12 \frac{L_2 B_2}{L_1 D} + 12 \frac{L_2^2 B_2}{L_1^2 D} \right)$$

Mit diesen Werten ergibt sich die Kapazität des Sensors unter Beschleunigung C_a und daraus die Empfindlichkeit analog wie bei der reinen Biegezugung.

$$(10) \quad E^\circ = \frac{C_a - C_0}{C_0} = \left[\sum_n \frac{1}{N (1 - \frac{A(X)}{S})} - 1 \right] \cdot 100 \% \quad \text{mit } X = n \frac{L_2}{N}$$

Abb. 2.5 zeigt die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Zungendicke bei Variation der Zungenlänge. Die Länge und die Breite der seismischen Masse und die Spaltweite wurden konstant gehalten.

Abb. 2.6 zeigt die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Spaltweite bei Variation der Länge der seismischen Masse. Die restlichen Geometrieparameter wurden konstant gehalten.

Wenn die seismische Masse deutlich schwerer ist als die Biegezunge, steigt die Empfindlichkeit linear mit der Breite der seismischen Masse. Bei sonst gleichen Geometriedaten bewirkt eine Verdopplung der Breite der seismischen Masse eine Verdopplung der Empfindlichkeit.

Wie bei der reinen Biegezunge steigt die Empfindlichkeit mit sinkender Zungendicke, mit steigender Zungenlänge und mit Verringerung der Spaltweite. Auch in diesem Fall hat die Höhe der Mikrostruktur keinen Einfluß auf die Empfindlichkeit. Eine Vergrößerung der Länge und Breite der seismischen Masse erhöht die Empfindlichkeit. Durch die seismische Masse wird die Empfindlichkeit der Sensoren im Vergleich zur reinen Zunge erhöht, so daß die gewünschte Empfindlichkeit von 20 %/g auch bei kurzen Zungenlängen (kleiner 1000 μm) und Zungendicken von einigen Mikrometern erreicht wird.

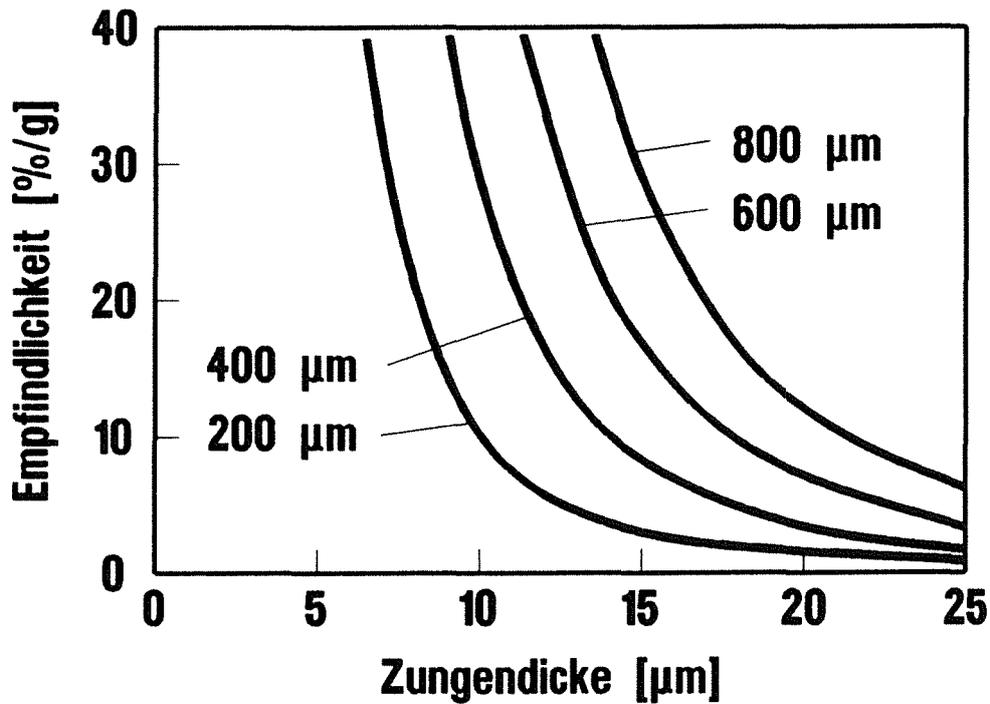


Abb.2.5 Zunge mit seis. Masse: Empfindlichkeit als Funktion der Zungendicke bei Variation der Zungenlänge. Die seismische Masse hat eine Länge von 1000 μm und eine Breite von 800 μm. Die Weite des Kondensatorspaltes beträgt 3 μm.

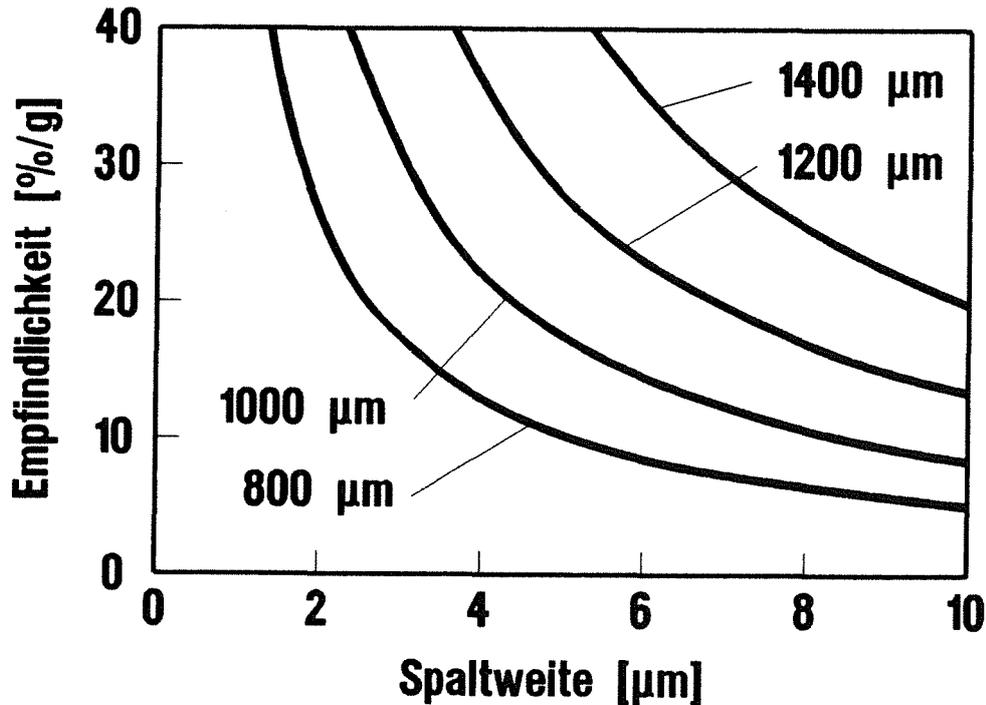


Abb.2.6 Zunge mit seis. Masse: Empfindlichkeit als Funktion der Weite des Kondensatorspaltes bei Variation der Länge der seismischen Masse. Die Zungenlänge beträgt 400 μm und die Zungendicke beträgt 10 μm.

2.3. Resonanzfrequenz

Neben der Empfindlichkeit ist die zweite wichtige Größe eines Beschleunigungssensors seine Resonanzfrequenz. Die Resonanzfrequenz begrenzt das nutzbare Spektrum des Sensors, d.h. den Frequenzbereich, in dem die Auslenkung des Sensors proportional zur Beschleunigung ist. Um in einem großen Frequenzbereich arbeiten zu können, ist daher eine möglichst hohe Resonanzfrequenz des Sensors wünschenswert.

Die hier vorgestellten Berechnungen gehen von ungedämpften Sensoren aus. Es existiert zur Zeit keine Methode, das Dämpfungsverhalten der Sensoren mit vertretbarem Aufwand abzuschätzen. Im Vergleich zu den bei Luftdruck stark gedämpften Siliziumsensoren ist jedoch eine geringere Dämpfung zu erwarten, da die in den Kondensatorspalten enthaltene Luft vergleichsweise einfach entweichen kann /13, 15/.

2.3.1. Zunge

Für den Fall der einfachen Biegezunge errechnet sich die Resonanzfrequenz nach Gleichung 11 /14/.

$$(11) \quad \omega_0 = \left(3,515 \cdot \frac{EI}{m_1 L_1^3} \right)^{1/2} = \left(3,515 \cdot \frac{E D^2}{12 \rho L_1^4} \right)^{1/2} = 0,54 \frac{D}{L_1^2} \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

In Abb. 2.7 ist die Resonanzfrequenz als Funktion der Zungendicke bei Variation der Zungenlänge aufgetragen. Die Resonanzfrequenz steigt mit zunehmender Zungendicke und abnehmender Zungenlänge an. Sie hängt weder von der Strukturhöhe noch von der Spaltweite des Sensors ab.

2.3.2. Zunge mit seismischer Masse

Für den Sensor mit seismischer Masse errechnet sich die Resonanzfrequenz für den Fall, daß die Biegezunge deutlich ($>$ Faktor 10) schwerer ist als die Masse der Biegezunge, nach der Gleichung 12 /14/.

$$(12) \quad \omega_0^2 = \frac{E D^3}{12 \rho B_2 L_2 L_1^3} \frac{2 + 6f + 6f^2}{2/3 + 4f + 21/2 f^2 + 14f^3 + 8f^4} \quad \text{mit } f = \frac{L_2}{2 L_1}$$

In Abb. 2.8 ist die Resonanzfrequenz als Funktion der Zungendicke bei Variation der Zungenlänge aufgetragen.

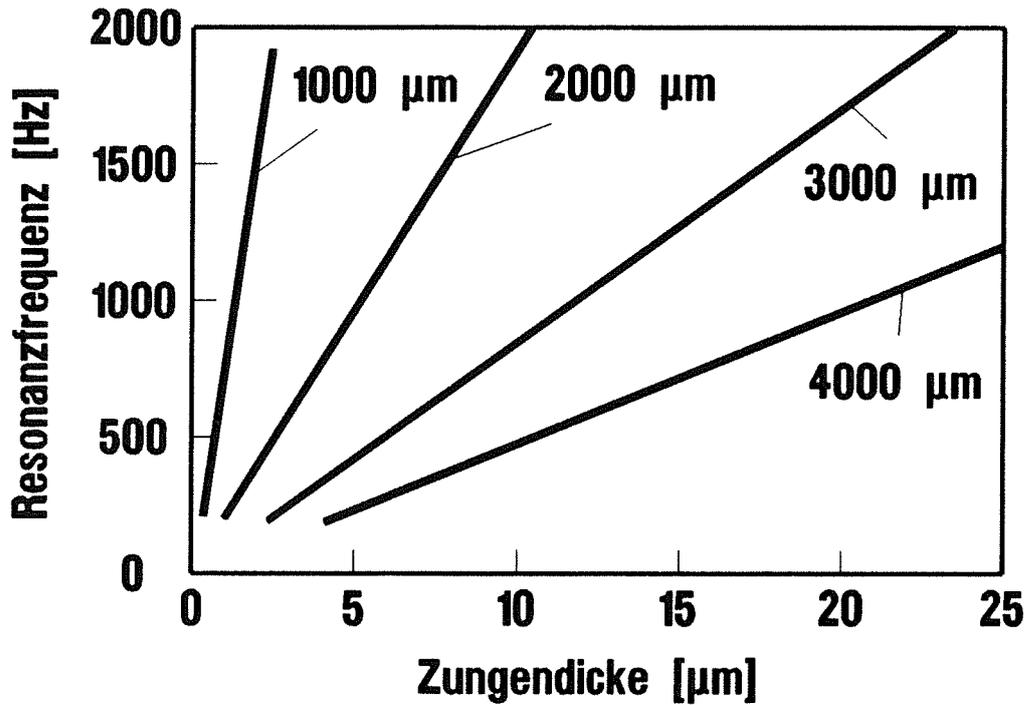


Abb.2.7 Zunge: Resonanzfrequenz als Funktion der Zungendicke bei Variation der Zungenlänge.

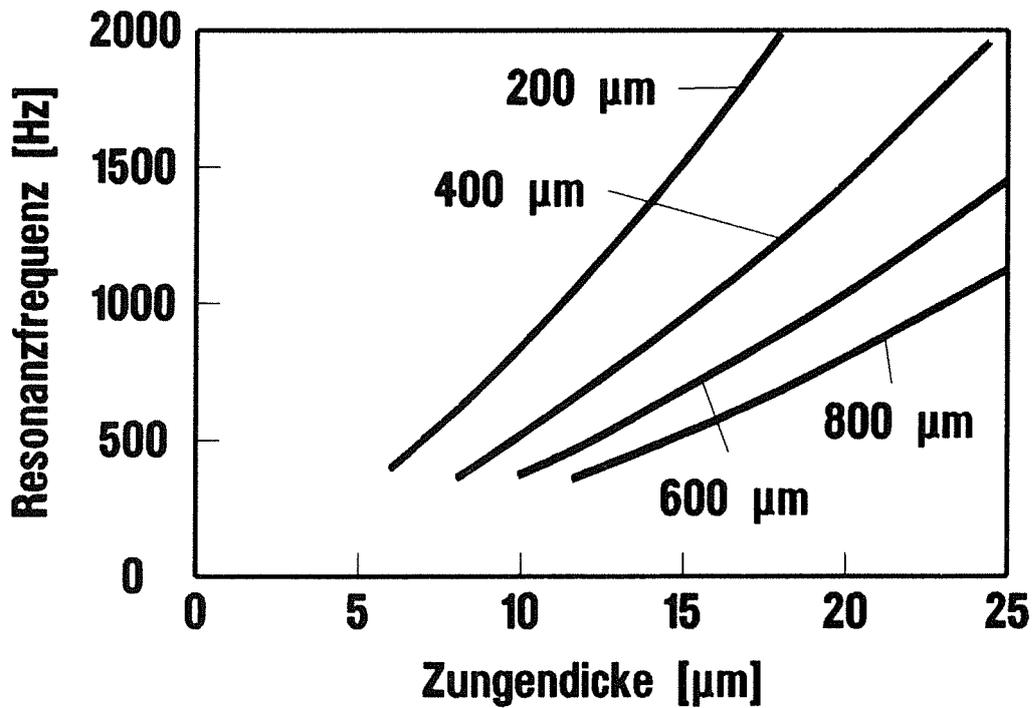


Abb.2.8 Zunge mit seis. Masse: Resonanzfrequenz als Funktion der Zungendicke bei Variation der Zungenlänge.
Die seismische Masse ist 1000 μm lang und 800 μm breit.

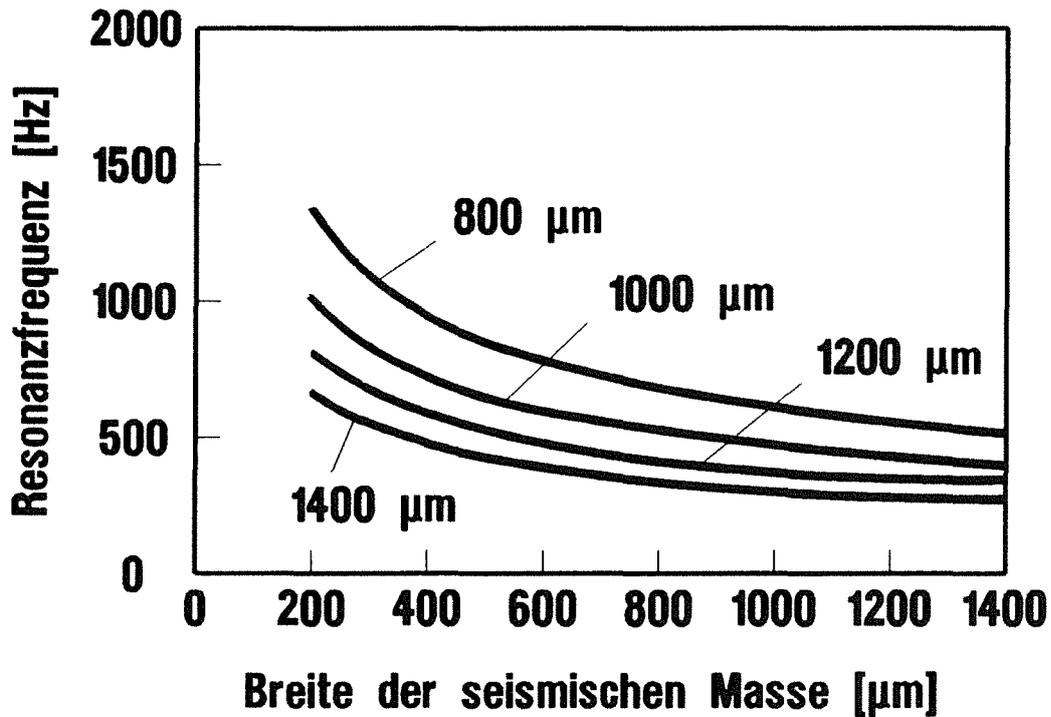


Abb.2.9 Zunge mit seis. Masse: Resonanzfrequenz als Funktion der Breite des seismischen Masse bei Variation der Länge der seismischen Masse.
Die Zunge ist 400 µm lang und 10 µm dick.

In Abb. 2.9 ist der Einfluß der Breite der seismischen Masse auf die Resonanzfrequenz bei Variation der Länge der seismischen Masse dargestellt.

Wie zuvor bei der reinen Zunge steigt die Resonanzfrequenz mit zunehmender Zungendicke und abnehmender Zungenlänge; die Höhe des Sensors und die Spaltweite haben wieder keinen Einfluß auf die Resonanzfrequenz. Eine Verringerung von Breite und Länge der seismischen Masse erhöht die Resonanzfrequenz.

2.4. Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz und Empfindlichkeit

Ein Vergleich der Kurven, die die Geometrieabhängigkeit von Resonanzfrequenz und Empfindlichkeit beschreiben, zeigt, daß alle Geometrieparameter, die die Empfindlichkeit erhöhen, die Resonanzfrequenz verringern. Dem liegt ein fundamentaler physikalischer Zusammenhang zugrunde. Am einfachen Beispiel des idealen Feder-Masse Systems wird zunächst der Zusammenhang zwischen Empfindlichkeit und erster Eigenfrequenz aufgezeigt, danach werden die numerischen Berechnungen zu den beiden Designtypen diskutiert.

Ausgehend von der Schwingungsgleichung des idealen, ungedämpften Feder-Masse Systems:

$$(13) \quad m x'' + k x = F_0 \cos(\omega t)$$

mit einer Masse m und einer Federsteifigkeit k , das von einer äußeren, periodischen Kraft F_0 angeregt wird, folgt für die Auslenkung x , wenn $m\omega^2 \ll k$, d.h. für kleine Frequenzen:

$$(14) \quad k x = m a \cos(\omega t) \text{ d.h. } x = \frac{m a}{k} \cos(\omega t)$$

Dabei wurde F_0 proportional zur Masse m und Beschleunigung a gesetzt. Da die Empfindlichkeit E° proportional zur Amplitude der Auslenkung pro Beschleunigung ist, folgt daraus:

$$(15) \quad E^\circ = \frac{m}{k}$$

Die Resonanzfrequenz ω_0 ergibt sich aus der Schwingungsgleichung mit dem Ansatz $x = \cos(\omega t + \alpha)$ zu:

$$(16) \quad \omega_0 = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Somit folgt:

$$(17) \quad \omega_0 = \left(\frac{1}{E^\circ}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Es besteht also eine eindeutige Beziehung zwischen der Empfindlichkeit und der ersten Eigenschwingung des Sensors. Eine gleichzeitige, freie Wahl von Resonanzfrequenz und Empfindlichkeit ist somit nicht möglich. Eine Erhöhung der Resonanzfrequenz ist immer mit einer Verringerung der Empfindlichkeit verbunden und umgekehrt.

Eine derart einfache analytische Lösung der Beziehung zwischen Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz läßt sich für die vorgestellten Designtypen der Beschleunigungssensoren nicht mehr angeben. Es wurde daher die gegenseitige Abhängigkeit durch eine Parametervariation der für das Sensordesign möglichen Parameter errechnet.

Für den Fall der einfachen Biegezunge wurde die Länge der Biegezunge zwischen 500 μm und 5000 μm , die Dicke der Biegezunge zwischen 2 μm und 15 μm und die Weite des Kondensatorspaltes zwischen 2 μm und 10 μm variiert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigt Abb. 2.10 .

In diesem Fall ergibt sich für eine feste Spaltweite ebenfalls eine eindeutige Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Empfindlichkeit, näherungsweise von der Form $1/\sqrt{E^\circ}$, d.h. bei vorgegebenem Kondensatorspalt nimmt die Resonanzfrequenz mit größer werdender Empfindlichkeit ab. Bei vorgegebener Empfindlichkeit sind bei geringerem Kondensatorspalt größere Resonanzfrequenzen möglich. Die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Empfindlichkeit wird von den anderen Geometrieparametern des Sensors nicht beeinflusst, so daß ein bestimmtes Wertepaar von Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz durch verschiedene Geometrieparameter erreicht werden kann. Beispielsweise kann eine etwas längere, aber dickere Zunge die gleiche Empfindlichkeit wie eine etwas kürzere, aber dünnere Zunge haben. Beide haben jedoch immer die gleiche Resonanzfrequenz, wenn sie die gleiche Spaltweite haben.

Für die Biegezunge mit einer seismischen Masse wurde für die Bestimmung der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Empfindlichkeit die Dicke der Biegezunge zwischen 2 μm und 15 μm , die Länge der Biegezunge zwischen 100 μm und 5000 μm variiert. Die Länge der seismischen Masse lag zwischen 500 μm und 10000 μm , die Breite der seismischen Masse zwischen 500 μm und 5000 μm . Das Ergebnis dieser Berechnung für verschiedene Spaltweiten des Kondensators zwischen 2 μm und 10 μm zeigt Abb. 2.11.

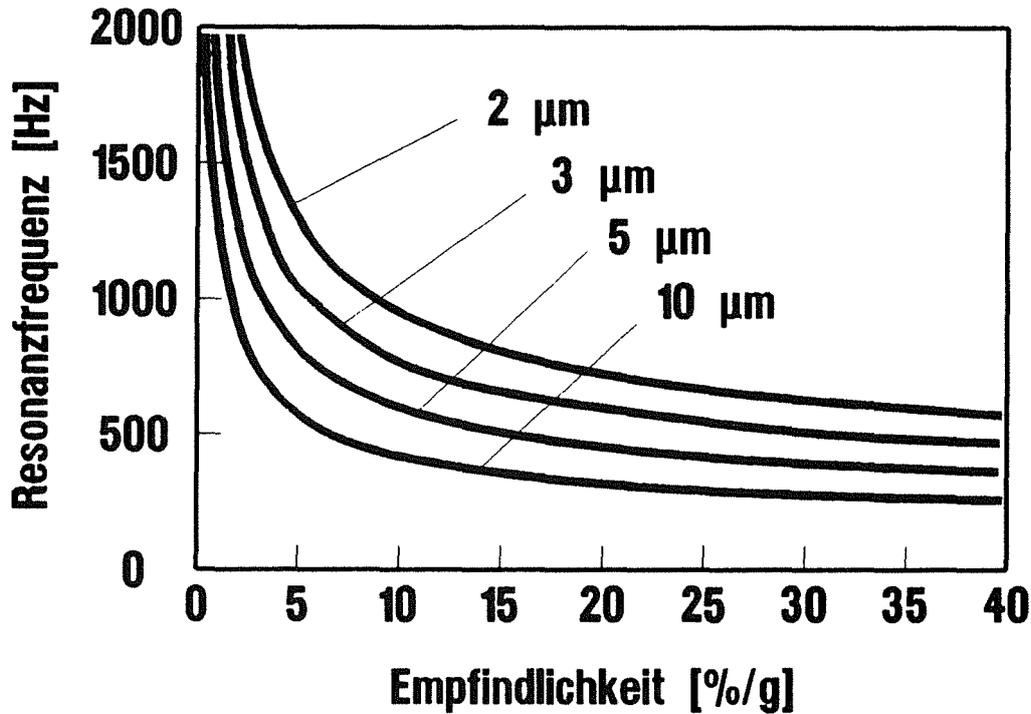


Abb.2.10 Zunge: Resonanzfrequenz als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Weite des Kondensatorpaltes.
Um die verschiedenen Datenpunkte zu erhalten wurde die Zungenlänge zwischen 500 μm und 5000 μm und die Zungendicke zwischen 2 μm und 15 μm variiert.

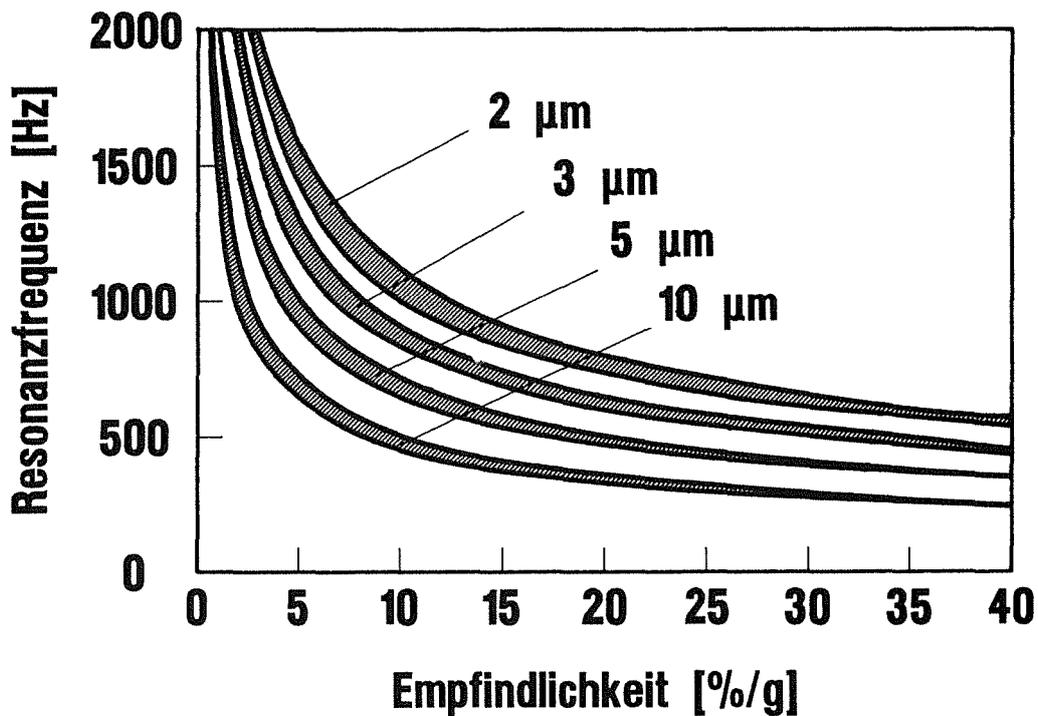


Abb.2.11 Zunge mit seis. Masse: Resonanzfrequenz als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Weite des Kondensatorpaltes.
Um die verschiedenen Datenpunkte zu erhalten wurde die Zungenlänge zwischen 100 μm und 5000 μm , die Zungendicke zwischen 2 μm und 15 μm , die Länge der seismischen Masse zwischen 500 μm und 10000 μm , die Breite der seismischen Masse zwischen 500 μm und 5000 μm variiert.

Wie aus Abb. 2.11 zu erkennen, streuen die Werte für die Resonanzfrequenz als Funktion der Empfindlichkeit für eine vorgegebene Spaltweite des Kondensators mit einer gewissen Breite um die quasi $1/\sqrt{E^0}$ förmige Abhängigkeit, wie sie für die einfache Biegezungung ermittelt wurde.

Obwohl sich in der Streuung der Werte ein geringer Einfluß der Geometrieparameter auf die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Empfindlichkeit widerspiegelt, ist auch bei diesem Design der Kondensatorspalt der bestimmende Geometrieparameter. Wie bei der einfachen Biegezungung läßt sich ein vorgegebenes Wertepaar von Resonanzfrequenz und Empfindlichkeit praktisch nur erreichen, wenn die Spaltweite des Kondensators entsprechend gewählt wird.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, daß eine gleichzeitige Optimierung von Resonanzfrequenz und Empfindlichkeit nur durch die Spaltweite des Kondensators möglich ist. Um bei hoher Empfindlichkeit eine hohe Resonanzfrequenz zu erzielen, muß eine möglichst geringe Spaltweite des Kondensators gewählt werden. Alle anderen Parameter sind für das Verhältnis von Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz praktisch ohne Bedeutung. Dies bedeutet auch, daß es hinsichtlich des Verhältnisses von Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz kein schlechteres oder besseres Design für die Beschleunigungssensoren gibt. Jedes Design mit dem gleichen Kondensatorspalt erreicht bei gleicher Empfindlichkeit die gleiche Resonanzfrequenz. Unterschiede in den Geometrieparametern spielen nur eine Rolle bei der Frage der Grundkapazität, der Querempfindlichkeit, der Biegespannungen und des Platzbedarfs des Sensors.

2.5. Querempfindlichkeit

Unter Querempfindlichkeit versteht man eine Signaländerung des Sensors, wenn er in eine Richtung beschleunigt wird, die nicht in der Meßrichtung liegt. Eine Beschleunigung des Sensors parallel zur Höhe der Biegezungge führt zu einer Auslenkung des Sensors parallel zur Kondensatorfläche. Wenn die dabei auftretenden Kräfte groß genug werden, kommt es zum Kippen des Sensors, was eine Veränderung des Kondensatorspaltes zur Folge hat. Eine große Beschleunigung in Längsrichtung der Biegezungge kann zum Knicken und somit ebenfalls zu einer Veränderung des Kondensatorspaltes führen.

Die Bewegung des Sensors parallel zur Kondensatorfläche wird analog zu Formel 2 und 6 berechnet. In diesen Formeln müssen die Werte für die Höhe des Sensors gegen die Werte für die Breite der Biegezungge im Trägheitsmoment ausgetauscht werden. Es ergeben sich daraus um den Faktor $(H/D)^2$ geringere Auslenkungen, beispielsweise für eine Biegezungge von 10 μm Breite und 100 μm Höhe eine um den Faktor 100 geringere Auslenkung als in Meßrichtung. Sie betragen somit für den hier betrachteten Sensor ca. 5 nm pro g. Diese Auslenkung führt zu einer linearen Verringerung der Kondensatorfläche und so für den hier genannten Sensor mit 100 μm Höhe zu Signaländerungen von weniger als $5 \cdot 10^{-5} \%$ für eine Beschleunigung von einem g.

Eine analytische Behandlung des Kippens und Knickens ist nur für die reine Zunge möglich, da die nichtlinearen Differentialgleichungen, die solche Phänomene beschreiben, nur in sehr einfachen Fällen geschlossen gelöst werden können /16/. Für die Biegezungge mit seismischer Masse wurde daher vereinfachend angenommen, daß die gesamte auf den Sensor wirkende Kraft punktförmig am Ende der Biegezungge angreift, um so zumindest zu einer qualitativen Abschätzung zu gelangen. Die Richtungen und die Angriffspunkte der Kräfte für diesen Fall werden in Abb. 2.12 dargestellt. Für die Knickung und Kippung erfolgt die Auslenkung der Sensoren nicht linear mit der angreifenden Kraft. Bis zu einem bestimmten Schwellwert, der sogenannten kritischen Kraft, erfolgt nur eine vernachlässigbare Auslenkung, wird die kritische Kraft jedoch nur minimal überschritten, so erfolgt sogleich eine sehr große Auslenkung.

Die Beschleunigungen, bei der die kritischen Kräfte für den Fall des Knickens erreicht werden, errechnen sich aus Gleichung 18 /16/.

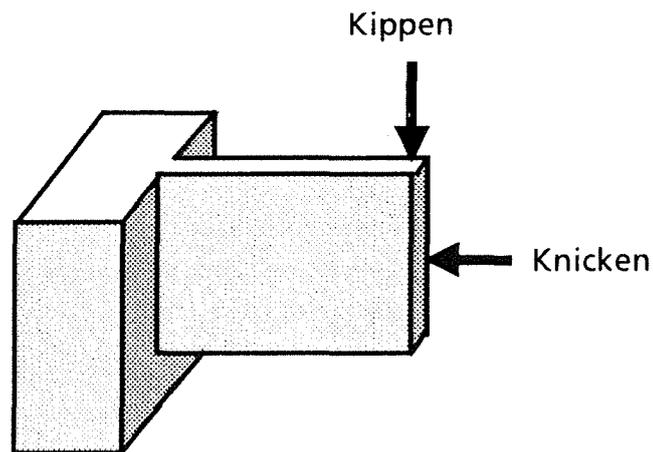


Abb. 2.12 Angriffsrichtung der Kräfte beim Kippen und Knicken

$$(18) \quad a_{krit.} = \frac{\pi^2 E D^3 H}{48 L_1^2 \text{ Faktor}}$$

für den Sensor mit seism. Masse gilt: Faktor = M_2 , für die reine Zunge gilt: Faktor = $0,3 M_1$

Die Beschleunigungen, bei der die kritischen Kräfte im Fall des Kippens erreicht werden, errechnen sich aus Gleichung 19 / 16/.

$$(19) \quad a_{krit.} = \text{Faktor} \frac{K}{L_1^2}$$

$$\text{mit seism. Masse: Faktor} = \frac{4,02}{M_2} \left(1 - \frac{cH}{2 L_1}\right), \text{ reine Zunge: Faktor} = \frac{13,52}{M_1}$$

$$K = (E I_z G I_T)^{1/2} \quad c = \left(\frac{E I_z}{G I_T}\right)^{1/2}$$

$$G = \text{Schubmodul}, E = \text{Elastizitätsmodul}, I_z = \text{Biegemoment} = \frac{D H^3}{12}, I_T = \text{Torsionsmoment} = \frac{H D^3}{3}$$

In Abb. 2.13 und Abb. 2.14 sind die zum Erreichen der kritischen Kraft notwendigen Beschleunigungen für den Fall der Knickung und der Kippung gegen die Empfindlichkeit aufgetragen. Für die hier vorgestellten Beispiele wurden jeweils die knick- und kippempfindlichsten Sensoren der Abbildungen 2.2

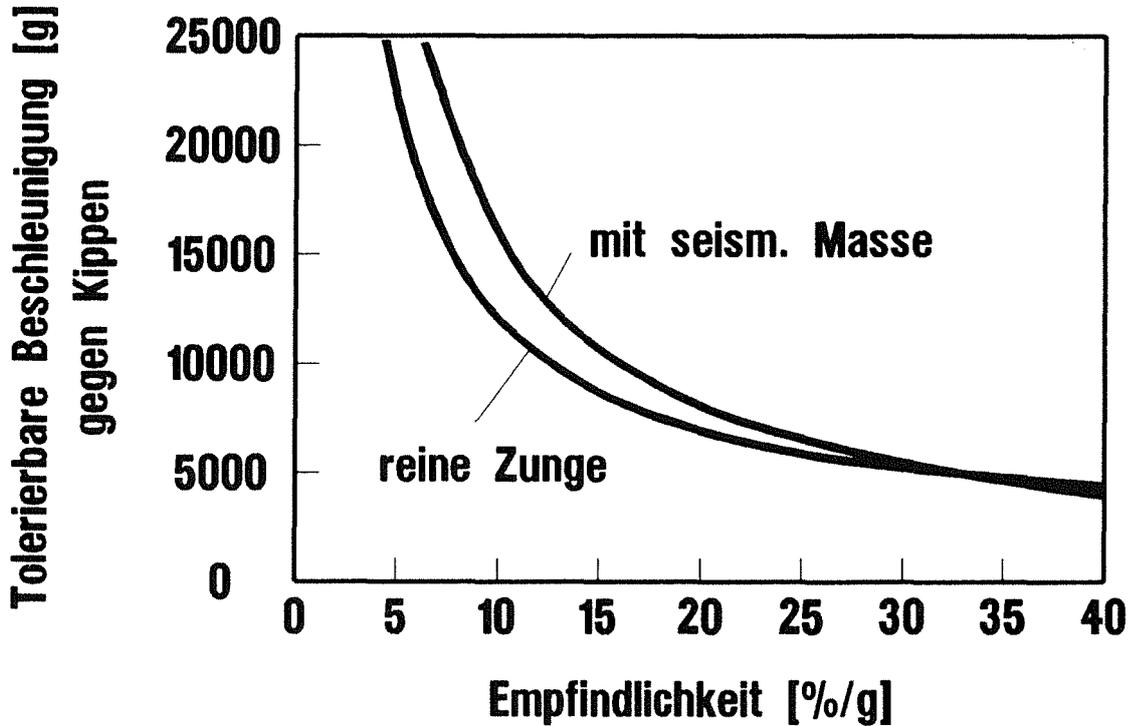


Abb.2.13 Tolerierbare Beschleunigung gegen Kippen als Funktion der Empfindlichkeit.

Zunge: Die Zungenlänge beträgt 400 μm , die Zungendicke wird zwischen 2 μm und 10 μm variiert, um verschiedenen Empfindlichkeiten zu erreichen.

Zunge mit seism. Masse: Die Zungenlänge beträgt 1000 μm , die Zungendicke wird zwischen 5 μm und 40 μm variiert, um verschiedene Empfindlichkeiten zu erhalten.

Die seismische Masse ist 1000 μm lang und 800 μm breit.

Alle Sensoren sind 100 μm hoch.

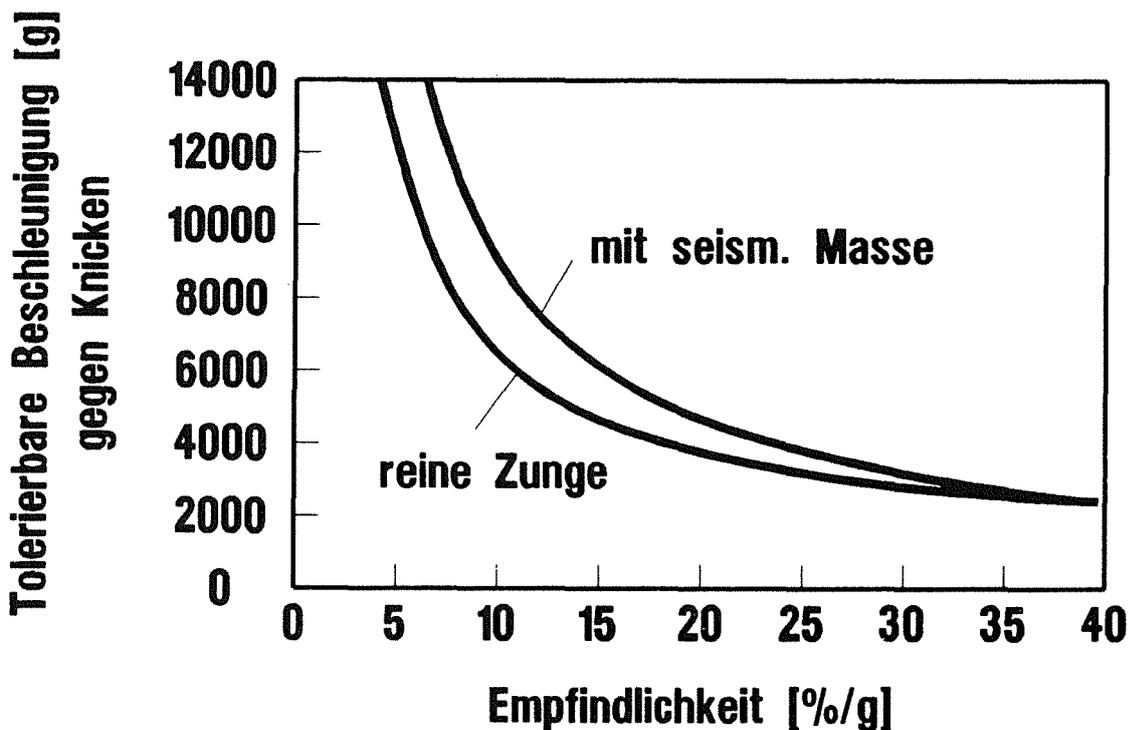


Abb.2.14 Tolerierbare Beschleunigung gegen Knicken als Funktion der Empfindlichkeit.

Zunge: Die Zungenlänge beträgt 400 μm , die Zungendicke wird zwischen 2 μm und 10 μm variiert, um verschiedenen Empfindlichkeiten zu erreichen.

Zunge mit seism. Masse: Die Zungenlänge beträgt 1000 μm , die Zungendicke wird zwischen 5 μm und 40 μm variiert um verschiedene Empfindlichkeiten zu erhalten. Die seismische Masse ist 1000 μm lang und 800 μm breit.

Alle Sensoren sind 100 μm hoch.

und 2.5 verwendet. Die angegebenen tolerierbaren Beschleunigungen stellen somit eine untere Grenze dar.

Abb. 2.13 zeigt die zum Erreichen der kritischen Knickkraft notwendige Beschleunigung als Funktion der Empfindlichkeit. Mit zunehmender Empfindlichkeit der Sensoren sinkt die tolerierbare Beschleunigung gegen Knicken. In keinem der hier vorgestellten Beispiele wird jedoch für die kritische Beschleunigung ein Wert von 2000 g unterschritten.

In Abb. 2.14 ist die zum Erreichen der kritischen Kippkraft notwendige Beschleunigung als Funktion der Empfindlichkeit aufgetragen. Auch in diesem Fall sinkt die tolerierbare Beschleunigung gegen Kippen mit zunehmender Empfindlichkeit in Meßrichtung. In keinem Fall ist die kritische Beschleunigung kleiner als 4000 g .

Die Diskussion der kritischen Kipp- und Knickbeschleunigungen zeigen, daß die Sensoren unempfindlich gegen statische Querbeschleunigungen sind. Im dynamischen Belastungsfall kann es jedoch zur Anregung von anderen Schwingungsmoden des Sensors (z.B. Torsion) kommen, wobei die Querempfindlichkeit der Sensoren erhöht wird.

2.6. Biegespannung

Durch die Auslenkung treten in den Biegezugungen mechanische Spannungen auf. Diese verursachen Ermüdungen im Material, die mit der Zeit zum Bruch der Biegezugungen führen können. Der Grad der Materialermüdung hängt von der Zahl der erfolgten Lastwechsel und dem Wert der dabei auftretenden Biegespannungen ab. Die Zahl der möglichen Lastwechsel ohne Bruch des Materials sinkt mit zunehmender Biegespannung. Viele Legierungen zeigen keine Materialermüdung, wenn die Biegespannungen unter einem bestimmten Wert bleiben. Reine Metalle ermüden immer, wenn sie Biegespannungen ausgesetzt sind /17/. Für die beim LIGA Verfahren galvanisch abgeschiedenen Metalle sind keine Kennwerte des Ermüdungsverhaltens unter Biegespannungen bekannt. Um die Probleme so gering wie möglich zu halten, sollten die auftretenden Biegespannungen daher so klein wie möglich sein, d.h. ein Design mit sonst gleichen Daten aber geringeren Biegespannungen ist einem Design mit höheren Biegespannungen vorzuziehen.

Die maximal auftretende Biegespannung errechnet sich aus Gleichung 20 /14/.

$$(20) \quad \sigma = \frac{m_1 D a}{4 I L_1} L_1^2 (1 + 2\mu + 2f\mu) = 3 \rho a \frac{L_1^2}{D} (1 + 2\mu + 2f\mu)$$

Für die reine Biegezungung, d.h. für $\mu = 0$, vereinfacht sich diese Formel.

$$(21) \quad \sigma = 3 \rho a \frac{L_1^2}{D}$$

Die Biegespannung hängt somit vom Quadrat der Zungenlänge und vom Kehrwert der Zungendicke ab. Trägt man die Biegespannung als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Spaltweite auf, so sieht man, daß die Biegespannung bei fixierter Spaltweite eine eindeutige Funktion der Empfindlichkeit ist (Abb. 2.15). Dies bedeutet, daß eine Optimierung der reinen Biegezungung hinsichtlich der maximal auftretenden Biegespannung nur durch die Verringerung der Spaltweite des Kondensators möglich ist.

Für den Fall der Biegezungung mit seismischer Masse ($\mu \gg 1$) vereinfacht sich die Berechnung zu:

$$(22) \quad \sigma = \frac{D_1 a L_1 m_2}{2 I} (1 + f) = \frac{3 a \rho L_2 B_2}{D^2} (2 L_1 + L_2)$$

In Abb. 2.16 wird die Biegespannung als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Geometrie der Biegezungung dargestellt. Die Breite der seismischen Masse ist konstant, die Länge der seismischen Masse wird variiert, um verschiedene Empfindlichkeiten einzustellen. Der Vergleich von Kurve 1 und Kurve 2 zeigt, daß mit zunehmender Zungenlänge die Biegespannung bei gleicher Empfindlichkeit abnimmt. Der Vergleich von Kurve 1 und Kurve 3 zeigt, daß mit zunehmender Zungendicke die Biegespannung bei gleicher Empfindlichkeit abnimmt.

In Abb. 2.17 wird die Biegespannung als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Geometrie der seismischen Masse dargestellt. Die Empfindlichkeit wird durch Variation der Zungenlänge eingestellt. Der Vergleich von Kurve 1 und Kurve 2 zeigt, daß mit geringerer Breite der seismischen Masse die Biegespannung bei gleicher Empfindlichkeit zurückgeht. Der Vergleich von Kurve

2 und Kurve 3 zeigt, daß eine kürzere seismische Masse die Biegespannung bei gleicher Empfindlichkeit verringert.

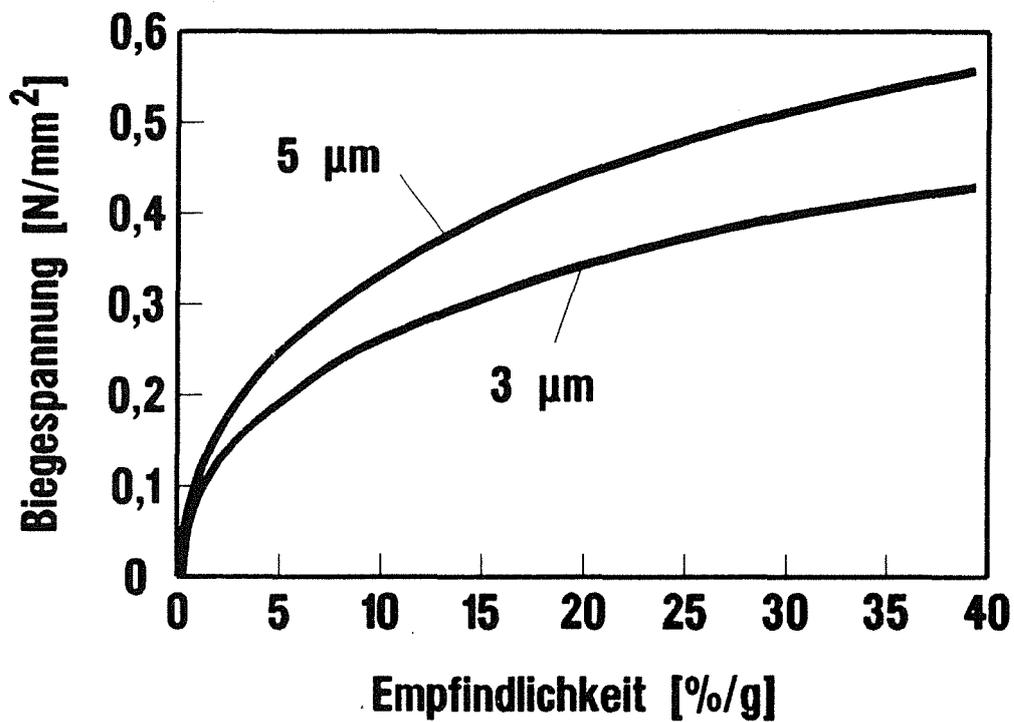


Abb.2.15 Zunge: Biegespannung als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Weite des Kondensatorpaltes.
Die Zungenlänge wird zwischen 500 µm und 5000 µm, die Zungendicke zwischen 2 µm und 15 µm variiert.

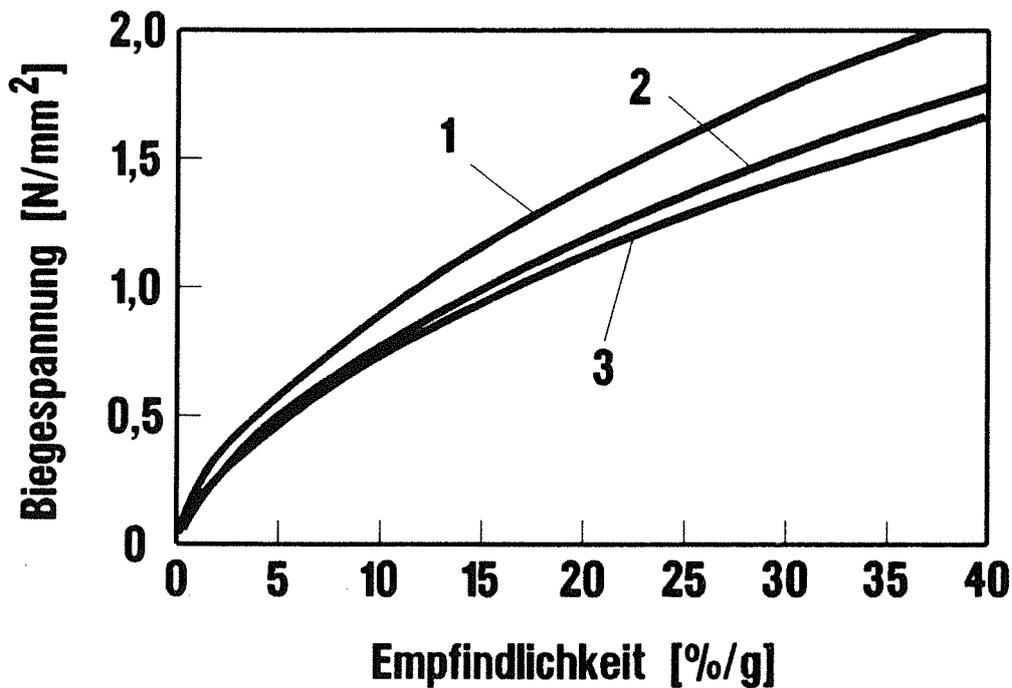


Abb.2.16 Zunge mit seis. Masse: Biegespannung als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Zungenlänge und Zungendicke.
 Kurve 1: Zungenlänge = 300 μm , Zungendicke = 10 μm
 Kurve 2: Zungenlänge = 400 μm , Zungendicke = 10 μm
 Kurve 3: Zungenlänge = 300 μm , Zungendicke = 20 μm
 Die seismische Masse ist 700 μm breit, die Länge der seismischen Masse wird zwischen 200 μm und 5000 μm variiert, um verschiedene Empfindlichkeiten einzustellen.

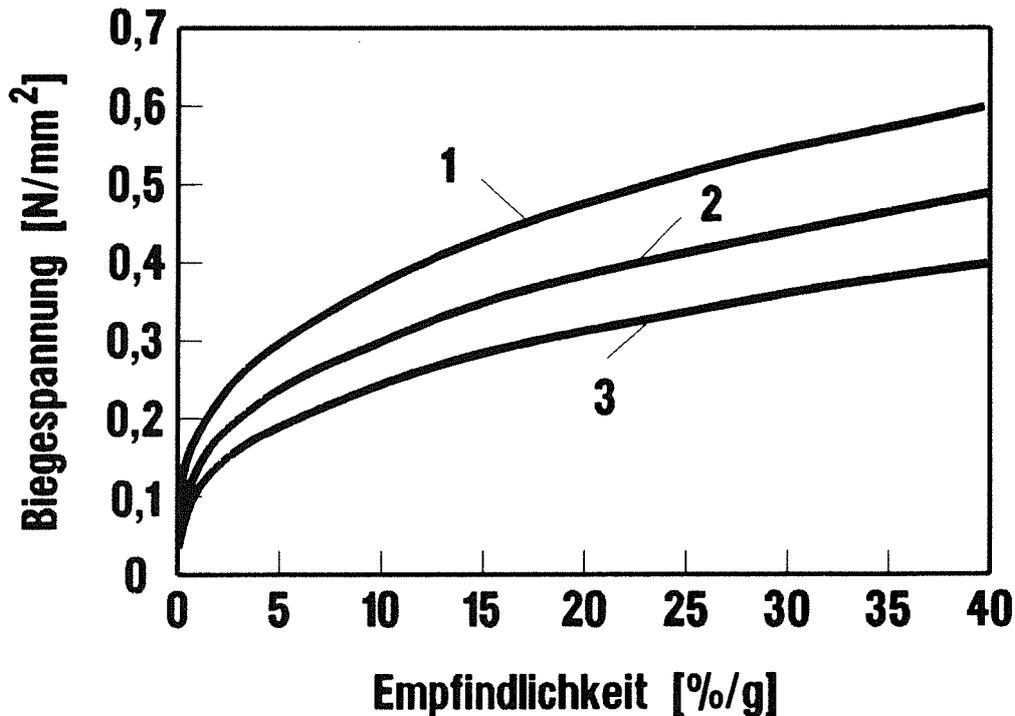


Abb.2.17 Zunge mit seis. Masse: Biegespannung als Funktion der Empfindlichkeit bei Variation der Länge und Breite der seismischen Masse.
 Kurve 1: Länge = 700 μm , Breite = 700 μm
 Kurve 2: Länge = 700 μm , Breite = 500 μm
 Kurve 3: Länge = 500 μm , Breite = 500 μm
 Die Zungendicke beträgt 10 μm , die Zungenlänge wird zwischen 50 μm und 1000 μm variiert, um verschiedene Empfindlichkeiten einzustellen.

2.7. Umsetzung des Designs mit dem LIGA-Verfahren.

Um mit dem LIGA-Verfahren Beschleunigungssensoren herzustellen, sind prinzipiell zwei Anordnungen der Biegezunge zum Substrat möglich (Abb. 2.18).

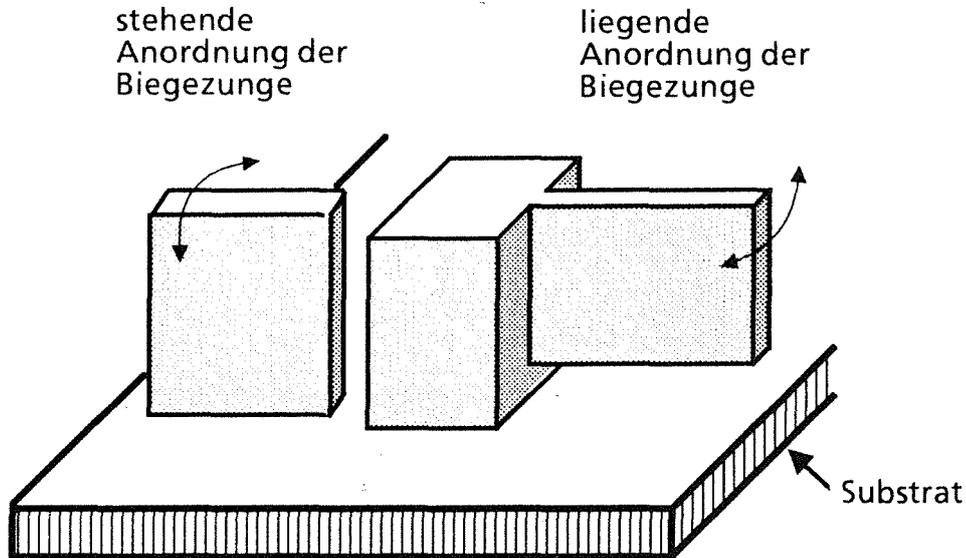


Abb.2.18 Prinzipielle Anordnung der Biegezunge zum Substrat bei der Herstellung eines Beschleunigungssensors mit dem LIGA-Verfahren

Die Zunge kann senkrecht auf dem Substrat stehen oder aber liegend zum Substrat angeordnet werden. Am frei beweglichen Ende der Biegezunge kann jeweils noch eine seismische Masse angebracht werden. Vorteil der stehenden Anordnung ist der geringe Platzbedarf, Vorteil der liegenden Anordnung ist die größere Freiheit bei der Auslegung der Sensoren. Um zu beurteilen, wie die Sensoren mit dem oben genannten Anforderungsprofil ($E^\circ = 20\%/g$, $\omega_0 > 500$ Hz) mit dem LIGA-Verfahren hergestellt werden können, müssen die Prozeßgrenzen des LIGA-Verfahrens in Betracht gezogen werden.

Beim LIGA-Verfahren wird im ersten Schritt eine dicke PMMA-Schicht durch eine Maske mit Synchrotronstrahlung belichtet. Das belichtete PMMA kann mit hoher Selektivität gegen das unbelichtete PMMA gelöst werden. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, daß die Entwickelbarkeit der PMMA auch von der Geometrie der Proben abhängt. Bei engen, tiefen Gräben ist der Abtransport des gelösten Materials und die Zuführung von frischem Entwickler eingeschränkt, so daß bei akzeptablen Entwicklungszeiten Gräben im PMMA nur mit einem Aspektverhältnis von ca. 50 erzeugt werden können. Das Aspektverhältnis von

freistehenden Wänden liegt wegen der Stabilitätsgrenzen des PMMA-Resists im gleichen Bereich.

Aufgrund des zur Zeit beschränkten Aspektverhältnisses von 50 könnte bei einer entsprechend ausgelegten Strahlungsquelle beispielsweise eine stehende Zunge mit einer Breite von $20\ \mu\text{m}$, einer Höhe von $1000\ \mu\text{m}$ und mit einem Kondensatorspalt von $20\ \mu\text{m}$ hergestellt werden. Ein solche Struktur erfährt nach den Berechnungen in Kapitel 2.2. eine Signaländerung von weniger als $0,1\ \text{‰}/\text{g}$ und kommt deshalb als Beschleunigungssensor nicht in Betracht. Eine Verringerung der Strukturhöhe erlaubt zwar auch geringere Zungendicken und Spaltweiten, die damit realisierbaren Empfindlichkeiten sind jedoch noch geringer. Für die Realisierbarkeit eines Beschleunigungssensors mit einer stehenden Zunge, der eine Empfindlichkeit von $20\ \text{‰}/\text{g}$ besitzt, müßte ein Aspektverhältnis von mehr als 500 realisierbar sein. Für einen Beschleunigungssensor mit einer stehenden Biegezunge und seismischer Masse liegen die Geometrieparameter im Rahmen der realisierbaren Aspektverhältnisse. Allerdings existiert derzeit kein Verfahren, das erlauben würde, solche gestuften Strukturen mit der benötigten Präzision zu erzeugen.

Werden die Sensoren jedoch parallel zur Oberfläche angeordnet, so ist die Länge der Biegezunge und die Länge der seismischen Masse frei wählbar. Wie man aus Abb. 2.2 entnimmt, müßte beispielsweise eine $3000\ \mu\text{m}$ lange Biegezunge eine Dicke von ca. $7\ \mu\text{m}$ haben, um eine Empfindlichkeit von $20\ \text{‰}/\text{g}$ zu erreichen. Ein Sensor mit einer seismischen Masse von $1000\ \mu\text{m}$ Länge und $800\ \mu\text{m}$ Breite erreicht bei einer Zungenlänge von $400\ \mu\text{m}$ und einer Zungendicke von ca. $12\ \mu\text{m}$ eine Empfindlichkeit von $20\ \text{‰}/\text{g}$ (Abb.2.5). Die Daten beziehen sich jeweils auf eine Spaltweite von $3\ \mu\text{m}$. Diese Abmessungen liegen im Bereich der realisierbaren Aspektverhältnisse und lassen sich mit dem derzeit nutzbaren Bonner 2 GeV-Synchrotron erreichen.

Um solche Strukturen jedoch als Beschleunigungssensor einsetzen zu können, müssen die Zungen bzw. die Zungen mit seismischer Masse beweglich gegenüber der Gegenelektrode hergestellt werden. Dies bedeutet, daß ein Verfahren erarbeitet werden muß, mit dem es möglich ist, auf einem Substrat gleichzeitig bewegliche und fest verankerte Strukturen justiert gegeneinander zu erzeugen.

3. Untersuchung zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen

3.1. Grundprinzip des Herstellungsverfahrens

In Abb.3.1 sind die notwendigen Prozeßschritte zur Herstellung beweglicher und gleichzeitig fest auf dem Substrat haftender Mikrostrukturen, die elektrische Funktionen haben, prinzipiell dargestellt /18/.

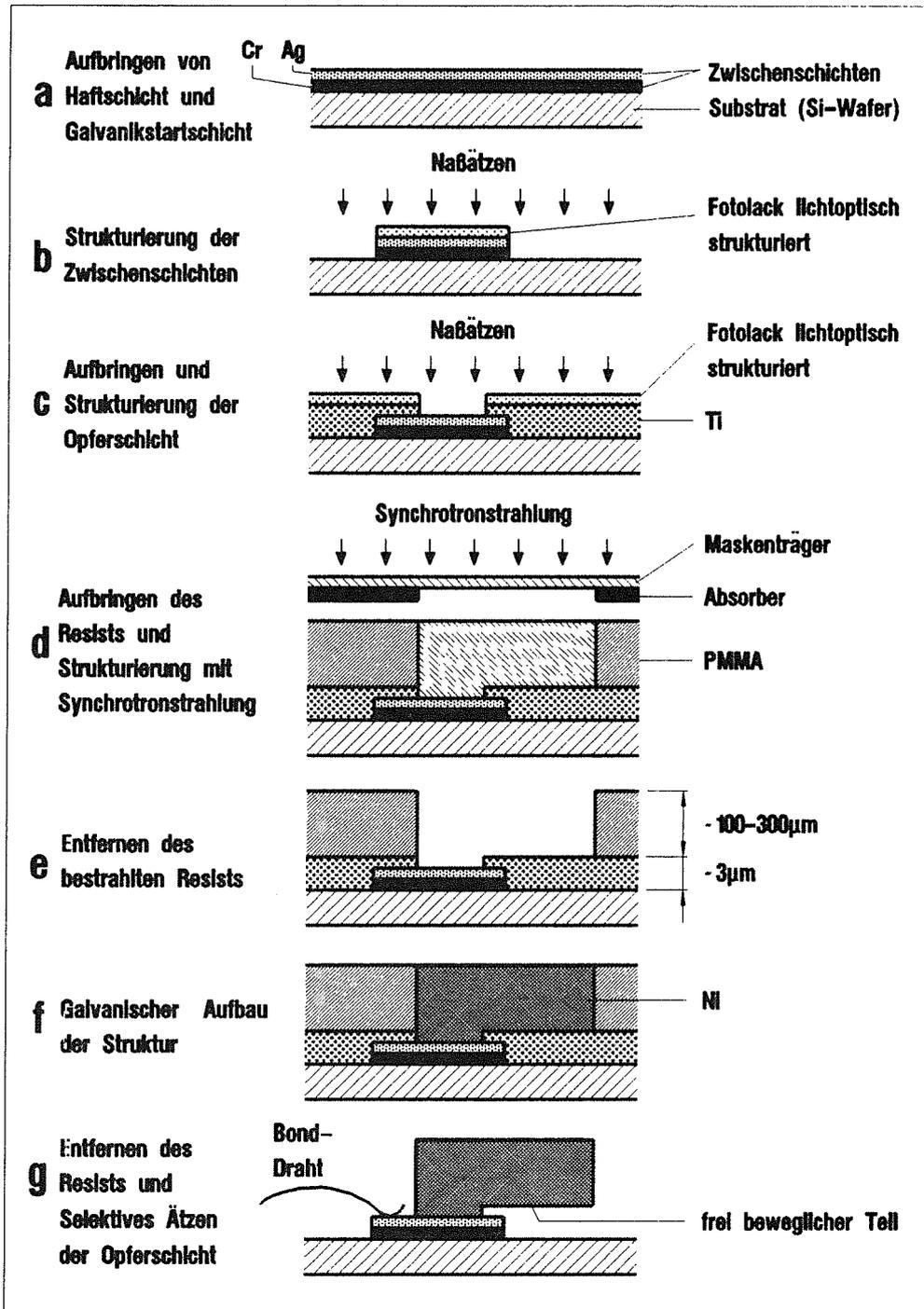


Abb. 3.1 Herstellung beweglicher, isolierter Mikrostrukturen

Im ersten Prozeßschritt werden auf einem isolierenden Substrat dünne Metallschichten aufgesputtert, die einerseits eine haftfeste Verbindung zwischen den galvanisch aufgebauten Mikrostrukturen und dem Substrat gewährleisten sollen, auf denen aber andererseits auch die Galvanik des LIGA-Prozesses gut starten muß (a). Um die einzelnen Mikrostrukturen gegeneinander elektrisch zu isolieren, werden diese Metallschichten mit Hilfe der Photolithographie und naßchemischen Ätzprozessen strukturiert (b). Auf die so vorstrukturierten Substrate wird eine weitere Schicht, die als Opferschicht dient, in einer Dicke von einigen Mikrometern aufgebracht. Diese Opferschicht wird so strukturiert, daß bei dem späteren LIGA-Prozeß die beweglichen Teile der Mikrostruktur darauf zu liegen kommen und die feststehenden Teile auf den freigelegten metallischen Flächen des Substrats verankert werden (c). Auf diesem Substrat werden dann die eigentlichen LIGA-Verfahrensschritte durchgeführt. Eine mehrere hundert Mikrometer dicke PMMA-Resistschicht wird durch eine zur strukturierten Opferschicht justierten Röntgenmaske mit Synchrotronstrahlung belichtet (d). Der bestrahlte Resist wird entfernt (e), die Zwischenräume werden galvanisch mit einem Metall aufgefüllt (f). Nach dem Strippen des Resists wird im letzten Schritt die Opferschicht selektiv gegen die anderen Materialien geätzt. Damit sind Teile der Mikrostruktur vom Substrat getrennt und folglich frei beweglich, während die auf den Metallschichten hergestellten Teile fest mit dem Substrat verbunden sind (g). Der elektrische Kontakt zur Auswerteelektronik wird durch Bonddrähte hergestellt.

Von zentraler Bedeutung für den Herstellungsprozeß ist die Auswahl einer geeigneten Opferschicht. Ein geeigneter Untergrund für das LIGA-Verfahren muß einerseits eine gute Haftung des PMMA-Resists sicherstellen, andererseits muß die Galvanik auf dieser Oberfläche starten. Darüber hinaus muß die Opferschicht selektiv gegen die im Herstellungsprozeß verwendeten Materialien ätzbar sein.

Die schlanken, hohen Resistwände, die die Form für den Kondensatorspalt des Beschleunigungssensors darstellen, lassen sich nur bei guter Haftung zum Untergrund defektfrei herstellen. Die bisherigen Untersuchungen zur Haftung röntgenlithographisch erzeugter Mikrostrukturen auf verschiedenen Oberflächen ergaben, daß solche feinen Strukturen nur auf oxidiertem Titan oder auf sandgestrahlten, aufgerauhten Oberflächen gut haftend hergestellt werden können. Wegen des Materialabtrags beim Sandstrahlen ist dieser Weg der Haftungsverbesserung nur bei massiven Substraten anwendbar. Die Opferschicht muß daher nach dem momentanen Stand des LIGA-Verfahrens aus oxidiertem Titan bestehen /19/. Auf oxidiertem Titan wird im IMT routinemäßig Gold, Kupfer

und Nickel gut haftend und mit guter Qualität galvanisiert. Somit ist auch die Galvanisierbarkeit auf der Titanopferschicht gegeben.

Titan kann in heißer, konzentrierter Schwefel- oder Salzsäure oder in Flußsäure beliebiger Konzentration aufgelöst werden. Der Abtrag von Titan in Schwefel- oder Salzsäure beträgt jedoch nur wenige Mikrometer pro Stunde [20]. Außerdem werden Kupfer und Nickel von diesen Ätzlösungen angegriffen. Sie sind daher als Ätzlösung für die Titanopferschicht nicht geeignet. Titan löst sich bei Raumtemperatur in Flußsäure mit hoher Ätzgeschwindigkeit; die genannten galvanisch abgeschiedenen Metalle werden von Flußsäure nicht angegriffen.

Titan erfüllt somit die Grundanforderungen, die an eine mit dem LIGA-Verfahren kompatible Opferschicht zu stellen sind. Da die Ätzung mit Flußsäure erfolgt, müssen alle anderen im Prozeß verwendeten Materialien gegen Flußsäure beständig sein.

Im Rahmen der Entwicklung des Herstellungsprozesses war es somit notwendig, geeignete isolierende Substrate auszuwählen und ihre Verträglichkeit mit den weiteren Prozeßschritten zu überprüfen. Insbesondere war die Beständigkeit gegen Flußsäure zu untersuchen.

Es mußten geeignete Methoden und Materialien für die Metallisierung dieser Substrate erarbeitet werden, die ebenfalls gegen Flußsäure beständig sein müssen. Verschiedene Ätzverfahren zur Strukturierung dieser Metallschichten waren zu untersuchen und die Haftung der darauf galvanisch abgeschiedenen Strukturen zu überprüfen.

Unter dem Gesichtspunkt einer geringen Unterätzung war es erforderlich, ein geeignetes Verfahren zur Strukturierung der Titanschicht zu entwickeln. Darüber hinaus mußte, um die freie Beweglichkeit der seismischen Masse des Beschleunigungssensors sicherzustellen, ein Verfahren zur nachträglichen Entfernung von Unterplattierungen, die bei der Galvanik unterhalb der Resiststrukturen auftreten, erarbeitet werden.

Im folgenden werden die Untersuchungen zur Auswahl der verschiedenen Materialien und zur Durchführung der Prozeßschritte dargestellt und damit die Prozeßparameter für einen funktionsfähigen Prozeß erarbeitet.

3.2. Substratmaterialien

3.2.1. Auswahl der Substrate

Für die Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen, die elektrische Funktionen haben sollen, müssen als Substrate isolierende Materialien eingesetzt werden. Dies schließt die Verwendung von Metallsubstraten, die üblicherweise beim LIGA-Verfahren eingesetzt werden, aus. Gute Isolationseigenschaften haben bekanntermaßen Kunststoffe und Keramiken. Von besonderem Interesse sind auch Siliziumwafer. Sie erlauben potentiell eine Integration von mechanischen Elementen mit der Elektronik auf einem Chip. Die geforderte Isolation kann bei Siliziumwafern sichergestellt werden, wenn die Oberfläche mit Siliziumoxid oder Siliziumnitrid beschichtet wird.

Auf die Verwendung von Kunststoffen als Substrat wurde im Rahmen der Untersuchung zur Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen verzichtet, da eine haftfeste Metallisierung von Kunststoffoberflächen, wie sie in diesem Prozeß notwendig ist, insbesondere unter dem Gesichtspunkt unterschiedlicher thermischer Belastung während des Herstellungsprozesses, äußerst schwierig ist. Außerdem müssen die Kunststoffe ausreichend strahlenbeständig sein und dürfen vom Entwickler nicht angegriffen werden. Ein weiterer Nachteil ist die geringe thermische Stabilität der Kunststoffe, die zu Verschiebungen und Verzügen des Substrats während der Bestrahlung und damit zu einem nicht tolerierbaren Strukturverlust führen kann.

Keramiken und Siliziumwafer sind gegen die im LIGA-Prozeß verwendete Synchrotronstrahlung beständig, und es sind Metallisierungsmethoden bekannt. Um die Verwendbarkeit von keramischen Substraten aus Aluminiumoxid und mit Siliziumoxid oder Siliziumnitrid beschichteten Siliziumwafern sicherzustellen, wurde das Ätzverhalten dieser Substrate in Flußsäure untersucht.

3.2.2. Untersuchung des Ätzverhaltens der Substrate in Flußsäure

Reines Silizium wird von Flußsäure nicht angegriffen, hingegen werden Isolationsschichten aus Siliziumoxid und Siliziumnitrid von Flußsäure mehr oder weniger stark geätzt [21]. Die Ätzrate dieser Schichten in Flußsäure hängt, außer vom Material, von der Konzentration und der Temperatur der Flußsäure sowie der Art der Herstellung der Schichten ab. Siliziumoxidschichten sind in der Regel weniger beständig gegen Flußsäure als Siliziumnitridschichten. Es ist bekannt, daß von allen Isolationsschichten Siliziumnitridschichten, die bei hohen Temperaturen mit einem geringen Gehalt an Sauerstoffverunreinigung durch Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) abgeschieden werden, die

geringste Ätzrate in Flußsäure aufweisen. Wafer mit einer 140 nm dicken Siliziumnitridschicht wurden für die Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen von der Firma Bosch zur Verfügung gestellt.

Zur Untersuchung der Ätzrate wurden die mit Siliziumnitrid beschichteten Wafer für eine definierte Zeit in Flußsäure verschiedener Konzentrationen eingetaucht und die Restdicke der Si_3N_4 -Schicht mit Hilfe eines interferometrischen Schichtdickenmeßgeräts gemessen. Aus dem so ermittelten Abtrag wurde die Ätzrate errechnet. Abb. 3.2 zeigt die Ätzraten in Abhängigkeit von der Konzentration der Flußsäure. Sie liegt im Bereich von wenigen Nanometern pro Minute und steigt mit zunehmender Konzentration der Flußsäure linear an.

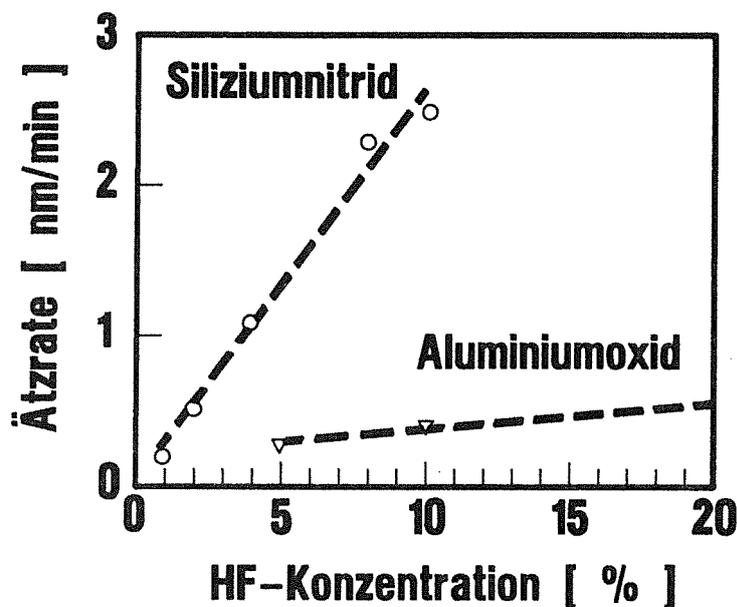


Abb. 3.2 Ätzraten der Substratmaterialien in Flußsäure

Aufgrund dieser Ätzraten wird die nur 140 nm dicke Nitridschicht in den freiliegenden Bereichen bei längeren Ätzzeiten, die zum Freiätzen von beweglichen Mikrostrukturen benötigt werden, vollständig entfernt werden. Da die Isolationsschicht in den freiliegenden Bereichen keine Funktion besitzt und nur unter den Sensorstrukturen erhalten sein muß, kann dieser Abtrag toleriert werden, sofern die fest mit dem Substrat verankerten Strukturen nur wenig unterätzt werden. Da die Breite dieser Strukturen einige hundert Mikrometer beträgt, sollte die aufgrund der Ätzrate zu erwartende Unterätzung im Mikrometerbereich zu keiner Verminderung der Haftung der Mikrostrukturen führen.

Die endgültige Bewertung an hergestellten Sensorstrukturen ergab, wie erwartet, keine Probleme bei der Verwendung von Wafern mit einer Isolationsschicht aus Siliziumnitrid.

Auch für das zweite Substratmaterial, Aluminiumoxidkeramik, wurde die Ätzrate in Flußsäure untersucht. Dabei wurde der Abtrag des Aluminiumoxides bestimmt, indem die Höhe der Stufe zwischen einem geätzten und einem nicht geätzten Bereich mit einem Tastschnittgerät ermittelt wurde. Wie in Abb. 3.2 zu sehen, liegen die Ätzraten in der Größenordnung von einigen Zehnteln Nanometern pro Minute und steigen mit der Konzentration nur geringfügig an. Auch die Aluminiumoxidkeramik wird beim Freiätzen der Sensoren in den freiliegenden Bereichen bis zu wenigen Zehnteln Mikrometer abgetragen. Die Überprüfung an Sensorstrukturen ergab auch hier nur eine vernachlässigbare Unterätzung.

Die Untersuchungen zeigen, daß beide Substratmaterialien für die Herstellung von beweglichen, isolierten LIGA-Strukturen geeignet sind. Da die Beständigkeit in Flußsäure ausreichend gut ist, ergeben sich keine Probleme bei der Verwendung von Titan als Opferschicht.

3.3. Metallisierung der Substrate

Die auf die isolierenden Substrate aufzubringende Metallisierung, die als Startschicht für die Galvanik dient und nach der Fertigstellung der Strukturen elektrische Funktionen übernimmt, muß drei Bedingungen genügen:

- gute Haftung auf dem Substrat,
- gute Haftung der Galvanik,
- Beständigkeit gegen Flußsäure .

3.3.1. Auswahl der Metallisierungsschichten

Metallische Schichten auf Wafern oder Aluminiumoxidkeramik lassen sich unter anderem durch Aufdampfen oder Aufputtern erzeugen. Je höher die Energie ist, mit der die Metallatome auf die Oberfläche des Substrates auftreffen, um so besser ist die Haftung. Daher haften gesputterte Schichten in der Regel besser als aufgedampfte Schichten. Die Haftung von aufgesputterten Metallen auf einer Oberfläche hängt, außer von den Sputterbedingungen, vom aufgetragenen Metall und dem Material des zu beschichtenden Substrats ab. Die Haftungseigenschaften von Metallen auf Siliziumnitrid und Aluminiumoxidkeramik sind aus der Literatur bekannt [21, 22].

Gute Haftung auf Siliziumnitridschichten zeigen Titan, Tantal, Aluminium, Vanadium, Wolfram, Molybdän und Chrom. Gute Haftung auf Aluminiumoxidkeramik zeigen Chrom und Titan. In der Regel liefern solche Schichten bereits beim Aufdampfen befriedigende Hafteigenschaften. Aufspüttern von solchen Schichten sollte daher zu einer sehr guten Haftung führen /23/.

Gut haftende galvanische Metallabscheidungen werden in der Regel auf allen galvanisch edlen Metallen erzielt, wie auf Gold, Platin, Rhodium, Silber und Kupfer.

Die beiden Anforderungen, gute Haftung zum Substrat und Haftung der Galvanik, werden durch die durchgezogenen Kreise der Abb. 3.3 dargestellt.

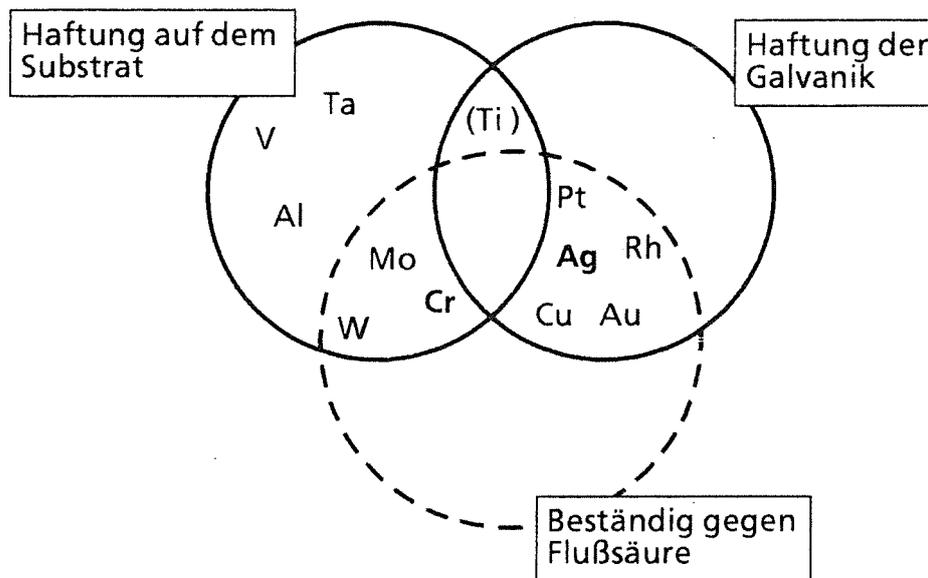


Abb. 3.3 Auswahl der Materialien für die Verbindung von Substrat und Liga-Struktur

Wie aus der Abbildung zu ersehen, gibt es, außer für Titan, keine Überlappung der Menge der gut auf Siliziumnitrid haftenden Metalle mit der Menge der Metalle, auf denen eine gute Haftung der Galvanik erzielt werden kann. Titan scheidet aus, da es bereits als Opferschicht verwendet wird. Somit müssen zwei Schichten übereinander aufgesputtert werden, von der die untere die gute Haftung zum Substrat und die obere die gute Haftung der Galvanik sicherstellt.

Da die zu erzeugende Metallschicht außerdem gegen Flußsäure (gestrichelter Kreis) beständig sein muß, reduziert sich die Anzahl der in Frage kommenden Metalle für die Haftschiicht auf Chrom, Wolfram oder Molybdän. Von den Materialien für die Galvanikstartschicht kann Kupfer nicht verwendet werden, da

Vorversuche zeigten, daß es in dünnen Schichten und nach dem Beschichten mit PMMA nicht beständig gegen den beim LIGA-Verfahren verwendeten Entwickler ist. Rhodium, Platin und Gold wurden wegen der hohen Kosten für die Sputtertargets aus diesen Materialien nicht weiter untersucht. Als Material für die Galvanikstartschicht wurde daher Silber eingesetzt.

3.3.2. Ätzlösungen für die Metallisierung

Um die Strukturen voneinander elektrisch zu isolieren, muß die Metallisierung der Substratoberfläche strukturiert werden. Diese Strukturierung erfolgt durch naßchemisches Ätzen. Bei diesem Ätzprozeß soll die Unterätzung, d.h. die Tiefe der Ätzung des Metalls unter die Ätzmaske nicht wesentlich größer als die Schichtdicke sein. Wenn die verwendete Ätzlösung eines der beiden Metalle mit einer größeren Ätzrate angreift als das andere, kommt es in dem Zeitraum, der für die Strukturierung des schwer ätzbaren Metalls benötigt wird, bereits zu einer starken Unterätzung des leichter ätzbaren Metalls. Da eine Ätzlösung, die beide Metalle in der gleichen Geschwindigkeit ätzt, in der Regel nicht gefunden werden kann, müssen die beiden Metallfilme nacheinander selektiv geätzt werden. Dabei wird zunächst die obere Metallschicht strukturiert; sie dient dann als Maske für die Ätzung der unteren Metallschicht.

Als Ätzlösung für die obere Metallschicht aus Silber wird in der Literatur Eisennitratlösung genannt, die die unteren Haftsichten aus Wolfram, Molybdän oder Chrom nicht angreift /21,24/. Somit kann diese Ätzlösung zur Strukturierung der Silberschicht verwendet werden.

In der Literatur ist für Wolfram nur eine basische Kaliumhexacyanoferratlösung als Ätze angegeben /21, 24/. Molybdän ätzt sich außer in Kaliumhexacyanoferrat auch in Salpetersäure. Diese beiden Ätzlösungen greifen jedoch Silber in weitaus stärkerem Maße an als Wolfram oder Molybdän. Wenn man also Wolfram oder Molybdän ätzt, wird die Silberschicht trotz der Lackabdeckung stark unterätzt werden. Wolfram und Molybdän könnten daher nur dann als haftvermittelnde Schicht verwendet werden, wenn sie vor dem Aufputtern des Silbers strukturiert würden. Dies erfordert einen zusätzlichen Prozeßschritt. Aus diesem Grund wurden Wolfram und Molybdän nicht weiter auf ihre Tauglichkeit als Haftsichten untersucht.

Chrom kann mit Salzsäure geätzt werden /21, 24/. Da Silber in Salzsäure ausreichend beständig ist, kann es als Ätzmaske für die Chromätzung verwendet werden. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Kombination Chrom/Silber als Metallisierungsschicht ausgewählt.

3.3.3. Untersuchung zur Ätzung der Silberschicht

Bei der Strukturierung der Silberschicht mit Eisennitratlösungen wurde die Unterätzung als Funktion der Konzentration der Ätze für zwei verschiedene Ätzverfahren untersucht. Beim Tauchverfahren werden die Proben in ein Becherglas mit der Ätzlösung eingetaucht und darin bewegt. Beim Auftragsverfahren wird die Ätzlösung mit einem Haarpinsel auf die Oberfläche der Proben aufgetragen, nach wenigen Sekunden mit Wasser abgespült und wieder mit frischer Ätzlösung bedeckt.

Die Unterätzfaktoren von Silber in Abhängigkeit von der Konzentrationen der Eisennitratlösung für diese beiden Verfahren zeigt Abb. 3.4.

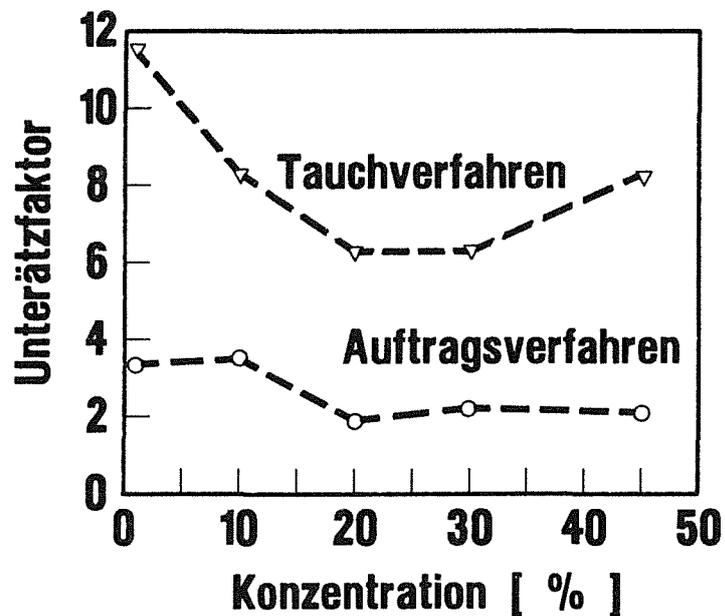


Abb. 3.4 Unterätzung von Silber als Funktion der Eisennitratkonzentration für zwei verschiedene Ätzverfahren

Beim Tauchverfahren ergeben sich Unterätzfaktoren zwischen 6 und 12, die Unterätzfaktoren sind bei Konzentrationen der Ätzlösung von ca. 20% - 30% am geringsten. Beim Auftragsverfahren schwanken die Unterätzfaktoren nur zwischen 2 und 4, die Abhängigkeit der Unterätzung von der Konzentration ist gering. Verglichen mit dem Tauchverfahren sind die Unterätzfaktoren beim Auftragsverfahren bei jeder Konzentration um mindestens einen Faktor drei geringer. Dies erklärt sich dadurch, daß beim Tauchverfahren vor Bereichen mit

einem geringen Bedeckungsgrad die Ätzlösung viel schneller verbraucht wird als vor Bereichen mit einem hohen Bedeckungsgrad (Abb.3.5). Daher ist die Ätzgeschwindigkeit in Bereichen mit hohem Bedeckungsgrad wesentlich höher als in Bereichen mit einem geringen Bedeckungsgrad, und somit erfolgt dort in der Zeit, die zum Ätzen der Bereiche mit geringem Bedeckungsgrad notwendig ist, bereits eine starke Unterätzung.

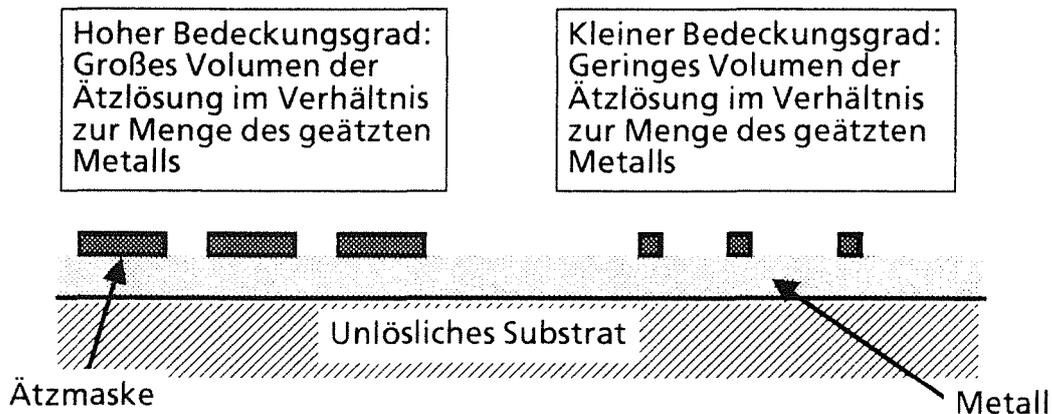


Abb. 3.5 Ursache der Unterätzung beim Tauchverfahren

Beim Auftragsverfahren wird nur ein dünner Film der Ätzlösung auf die Oberfläche der Probe aufgebracht. Dieser dünne Film der Ätzlösung wird sofort verbraucht und nach dem Abspülen der Probe durch einen neuen Film ersetzt. Bei diesem Verfahren zeigte sich die Ätzgeschwindigkeit weitgehend unabhängig vom Bedeckungsgrad der Oberfläche, so daß die Unterätzung an allen Stellen gering ist.

3.3.4. Untersuchung zur Ätzung der Chromschicht

Chrom ist bei Kontakt mit Luft immer mit einer schwer ätzbaren Chromoxidschicht bedeckt [25]. Diese Chromoxidschicht wird nur von Säuren in hoher Konzentration angegriffen. Die Strukturierung des Chroms kann daher nur mit konzentrierter Salzsäure erfolgen. Das Auftragsverfahren konnte nicht verwendet werden, vermutlich da sich durch das Abspülen der Ätzlösung und den Kontakt mit Sauerstoff der Oxidfilm immer neu bildete. Die mit dem Tauchverfahren erzielten Unterätzungen waren jedoch mit ca. 3 so gering, daß dieses Verfahren angewendet werden konnte.

3.3.5. Haftung der Metallisierungsschichten

Die Haftung der verwendeten Metallisierungsschichten auf den Substraten wurde sowohl durch den sogenannten "Tesa-Test" als auch durch die Haftung der darauf hergestellten Mikrostrukturen getestet. Für den "Tesa-Test" wird die Metallisierung mit einem Messer in Quadrate mit ca. einem Millimeter Kantenlänge unterteilt und durch Aufkleben und Abreißen eines Klebstreifens (Tesa) getestet. Wenn sich dabei kein Quadrat von der Oberfläche der Probe löst, wird die Haftung als gut eingestuft.

Der "Tesa-Test" zeigte auf Siliziumwafern und auf Aluminiumoxidkeramik gute Haftung, wenn die Oberflächen der Substrate vor dem Aufsputtern der Metalle durch Sputterätzen mit Argon-Ionen gereinigt wurden. Für die Haftung der Mikrostrukturen auf Siliziumnitrid ist in Abb. 3.6 ein eindrucksvolles Beispiel gezeigt. Die Abbildung zeigt die Oberfläche eines Siliziumwafers, von der eine auf einer Chrom/Silber-Schicht aufgalvanisierte Mikrostruktur durch Abreißen entfernt wurde. Wie zu erkennen, erfolgte der Bruch nicht ausschließlich entlang der Grenzfläche Wafer/Chrom, sondern ein Teil des Wafers wird mit herausgerissen. Dies zeigt nicht nur die gute Haftung des Chroms auf der Siliziumnitridoberfläche, sondern auch die gute Haftung des Silbers auf dem Chrom und die gute Haftung der galvanisch abgeschiedenen Mikrostruktur auf dem Silber.

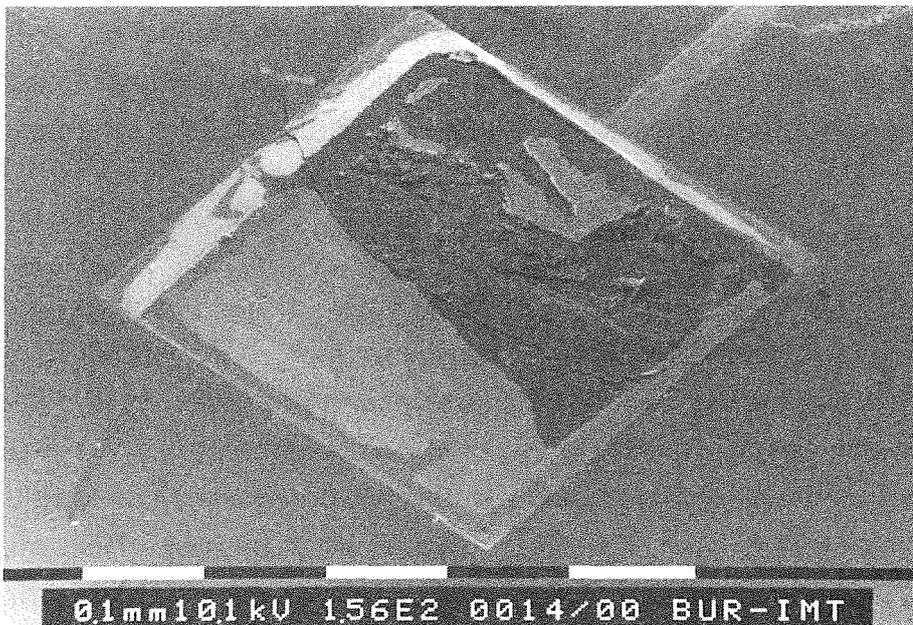


Abb.3.6 Bruch im Si-Wafer nach Abreißen einer Mikrostruktur

Obwohl der "Tesa-Test" auf der Aluminiumoxidkeramik ebenfalls gute Ergebnisse liefert, konnten in diesem Fall die Mikrostrukturen mit mechanischer Gewalt von der Oberfläche entfernt werden, ohne daß es zu einem Bruch in der Keramik kam. Die Trennung erfolgte zwischen Metallisierung und Keramik. Dies deutet darauf hin, daß die Haftung der Chromschicht nicht so gut ist wie auf den Siliziumwafern. Da ohne Gewalteinwirkung jedoch keine Haftungsprobleme beobachtet wurden, erscheint die Haftung für die Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen ausreichend, so daß die Haftung nicht weiter verbessert wurde.

3.4. Strukturierung der Titanopferschicht

Auch bei der Strukturierung der Titanopferschicht, die auf die Metallisierungsschichten aufgebracht wird, muß die Unterätzung möglichst gering sein, um eine große Genauigkeit der Strukturierung zu gewährleisten. Es wurde deshalb die Unterätzung als Funktion der Flußsäurekonzentration für die beiden Ätzverfahren untersucht. Abb. 3.7 zeigt die dabei erzielten Unterätzfaktoren.

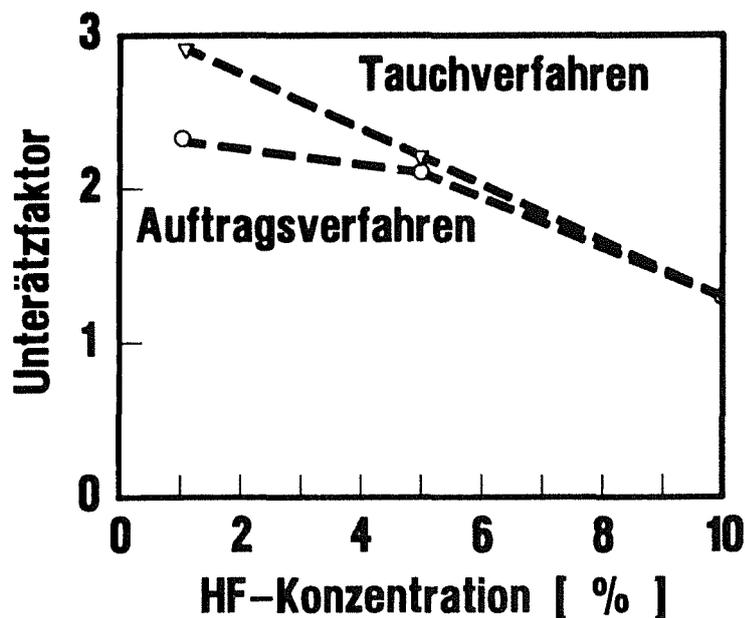


Abb. 3.7 Unterätzung von Titan bei Strukturierung mit Flußsäure

Beim Ätzen von Titan unterscheiden sich die Unterätzfaktoren für die beiden Verfahren nur gering, wesentlich stärker ist der Einfluß der Konzentration der Flußsäure. Beim Ätzen mit Konzentrationen von ca. 10% können Unterätzfaktoren erreicht werden, die nahe der theoretischen Grenze von 1

liegen. Die Ätzung von Titan erfolgt allerdings bei Konzentrationen von 10 % sehr schnell, so daß der Endpunkt der Ätzung sofort erkannt werden muß, um starke Unterätzung zu vermeiden. Für die praktische Anwendung wurde daher Flußsäure mit einer Konzentration von 5 % verwendet.

3.5. Freiätzen der Mikrostrukturen

Um zu frei beweglichen Mikrostrukturen zu gelangen, muß die Opferschicht aus Titan mit Flußsäure selektiv gegen die Mikrostrukturen geätzt werden. Dabei müssen im Fall der Sensoren Flächen mit einer Ausdehnung von bis zu 1000 μm freigeätzt werden. Da die Ätzung des Titans dabei in einem engen Spalt erfolgt, unterscheidet sich das Ätzverhalten gegenüber dem Verlauf der Ätzung von freien Flächen. Um die zum Freiätzen benötigten Zeiten zu ermitteln, wurde die Ätzrate von Titan unter Mikrostrukturen aus Nickel als Funktion der Flußsäurekonzentration und der Dicke der Titanschicht bestimmt (Abb. 3.8).

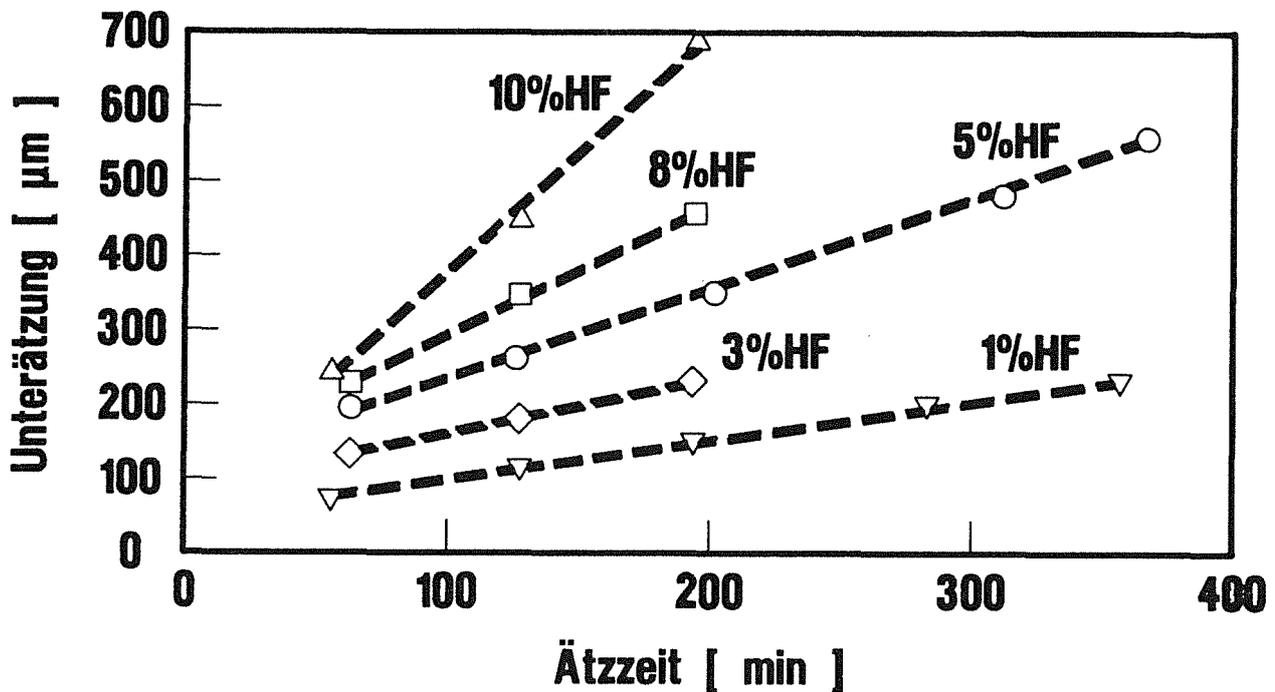


Abb.3.8 Freiätzen der Titanopferschicht als Funktion der Flußsäurekonzentration

Zur Untersuchung des Freiätzens wurden Wafer mit einer Titanschicht besputtert, diese oxidiert und mit 7,5 μm dickem Photolack beschichtet. Als Teststrukturen

wurden Kreise mit einem Durchmesser von 0,5, 1, 1,5 und 2 Millimetern in den Photolack belichtet und galvanisch mit 5 μm Nickel aufgefüllt.

Nach dem Ätzen in Flußsäure wurden die Nickelkreise mit mechanischer Gewalt entfernt und die freigeätzte Strecke unter einem Mikroskop ausgemessen. Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Auf Rühren der Ätzlösung wurde verzichtet, da bei realen LIGA-Mikrostrukturen die Strömungsverhältnisse stark abweichen können. Wie aus Abb. 3.8 zu erkennen, erfolgt die Freiätzung um so schneller, je höher die Konzentration der Flußsäure ist. Die Freiätzung schreitet linear mit der Zeit fort, woraus gefolgert werden kann, daß die Geschwindigkeit der Freiätzung nicht von Diffusion durch den bereits freigeätzten Kanal bestimmt ist. Da die extrapolierten Ätzgeraden nicht den Nullpunkt schneiden, ist zu folgern, daß die Ätzung der ersten 50 bis 100 μm mit einer höheren Ätzrate erfolgt.

Die in den Vorversuchen ermittelten Ätzraten gelten, wenn die Ätzlösung frei von allen Seiten an die Mikrostruktur angreifen kann. Die Experimente zum Freiätzen der Sensorstrukturen zeigten, daß der Ätzverlauf auch von der Geometrie der Mikrostrukturen abhängt. Von den frei zugänglichen Stirnseiten der seismischen Masse her erfolgte die Ätzung mit größerer Geschwindigkeit als vom Kondensatorspalt her oder von einem zusätzlichen Ätzloch in der Mitte der Struktur. Die minimal benötigten Ätzzeiten müssen daher für jede Struktur empirisch ermittelt werden. Die zum Freiätzen der Sensorstrukturen maximal benötigten Ätzzeiten können jedoch aus den Vorversuchen abgeschätzt werden, wenn man annimmt, daß die Ätzung nur aus Richtung der frei zugänglichen Stirnseiten der seismischen Masse erfolgt.

Die Untersuchung des Freiätzens als Funktion der Schichtdicke der Titanopferschicht ergab, daß sich die Ätzraten bei den untersuchten Schichtdicken zwischen 1,3 und 4,5 μm nicht unterscheiden. Es kann also im untersuchten Schichtdickenbereich keine Verringerung der zum Freiätzen benötigten Zeit durch eine Vergrößerung der Schichtdicke erreicht werden.

3.6. Untersuchungen zur Beseitigung der Unterplattierung

Als Unterplattierung bezeichnet man einen Saum am unteren Rand der Mikrostruktur, der dadurch entsteht, daß der Elektrolyt in die Grenzfläche zwischen Resist und Metall eindringt und dort Metall abscheidet (Abb. 3.9). Da bei den durchgeführten Untersuchungen die Unterplattierung nicht immer im

gleichen Umfang auftrat, ist darauf zu schließen, daß die Ursache in einer lokal verringerten Haftung oder einer modifizierten Titanoberfläche begründet ist.

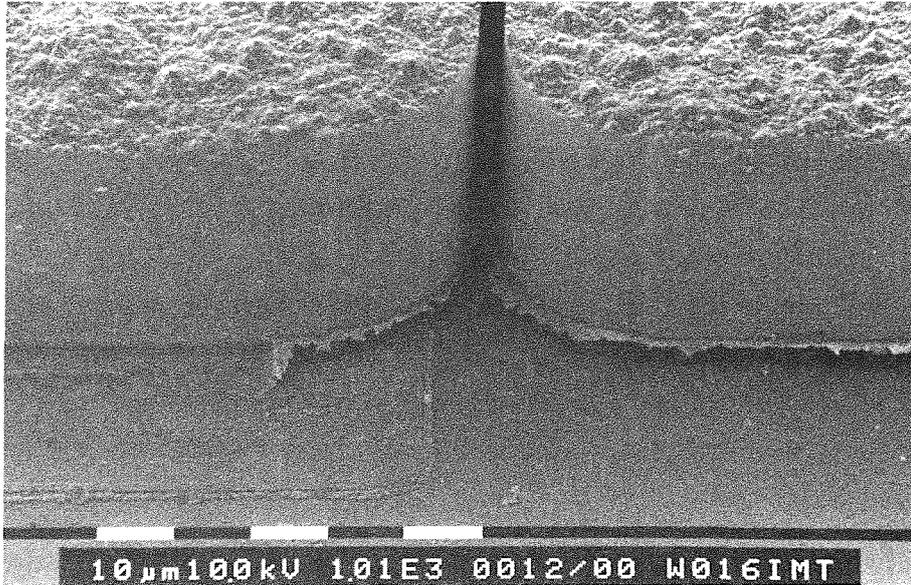


Abb. 3.9 Unterplattierung an den Sensoren

Die Unterplattierung kann einerseits die mechanische Bewegung der Mikrostrukturen behindern, andererseits besteht aufgrund der Unterplattierung die Gefahr von Überschlügen oder Kurzschlüssen. Es wurden daher zwei Methoden untersucht, um die Unterplattierung zu beseitigen.

3.6.1. Beseitigung der Unterplattierung durch Sputtern

Durch Sputtern mit Argon Ionen (Ion Milling) können dünne Metallfilme von der Oberfläche einer Probe abgetragen werden. Da die Leiterbahnen zum Kontaktieren der Sensorstrukturen dabei ebenfalls abgetragen und daher geschützt werden müssen, muß dieser Prozeßschritt nach dem Entfernen des unbestrahlten PMMA's, aber noch vor dem Freiätzen der Sensorstrukturen erfolgen.

Wie die Untersuchung von Sensorstrukturen zeigte, konnte die Unterplattierung bei ausreichend langer Sputterzeit entfernt werden. Beim Freiätzen dieser Sensoren zeigte sich jedoch auf der Oberfläche der Seitenwände ein Belag, der schlecht auf der Oberfläche haftete und zum Teil von den Sensorstrukturen abgelöst war (Abb. 3.10). Dieser abgeplatzte Belag kann zum Kurzschluß der Sensoren führen. Eine Mikroanalyse dieses Belages zeigte einen hohen Anteil an Titan und Nickel. Eine Quantifizierung der beiden Anteile ist jedoch nicht möglich, da der Probenuntergrund auch aus Nickel bestand. Vermutlich handelt es sich hier um redeponiertes Titan, das jedoch in seinen Eigenschaften so

verändert wurde, daß es gegen Flußsäure beständig ist. Auf Grund dieser Redeposition kann Ion Milling nicht zur Entfernung der Unterplattierung eingesetzt werden.

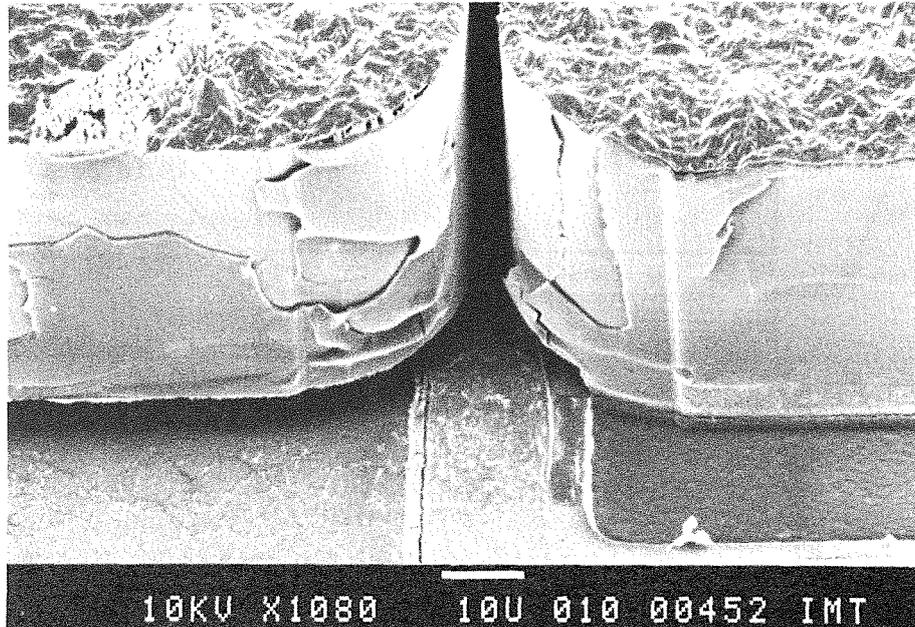


Abb. 3.10 Sensoren nach Ion-Milling mit Argon

3.6.2. Beseitigung der Unterplattierung durch eine galvanische Zwischenschicht

Durch die Verwendung einer galvanischen Kupferzwischenschicht, die nach der Nickelgalvanik selektiv gegen das Nickel weggeätzt wurde, konnten in einer früheren Arbeit Unterplattierungen an LIGA-Förmeinsätzen erfolgreich beseitigt werden [26, 27]. Dieser Weg wurde auch zur Entfernung der Unterplattierung an den Sensorstrukturen untersucht. Dazu wird vor der Nickelgalvanik eine 2-3 μm dicke Kupferschicht galvanisch abgeschieden, so daß die gesamte Unterplattierung aus Kupfer besteht (Abb.3.11). Nach dem Entfernen des Resists und vor dem Ätzen der Titanschicht wird diese Kupferschicht so lange geätzt, bis die Unterplattierung entfernt ist.

Für diese Ätzung wird eine besonders langsame Kupferätze verwendet [28]. Dadurch wird sichergestellt, daß die Mikrostrukturen auch in den feinen Kondensatorspalten ausreichend benetzt und gleichzeitig die frei zugänglichen Bereiche nicht zu stark unterätzt werden.

Es ist möglich, daß ein Bereich der LIGA-Strukturen Unterplattierungen hat und ein anderer Bereich frei von Unterplattierungen ist. Die Sensoren werden daher, unabhängig davon, ob unter dem Mikroskop Unterplattierungen sichtbar sind oder nicht, mit diesem Verfahren behandelt. Eine Überprüfung, ob die

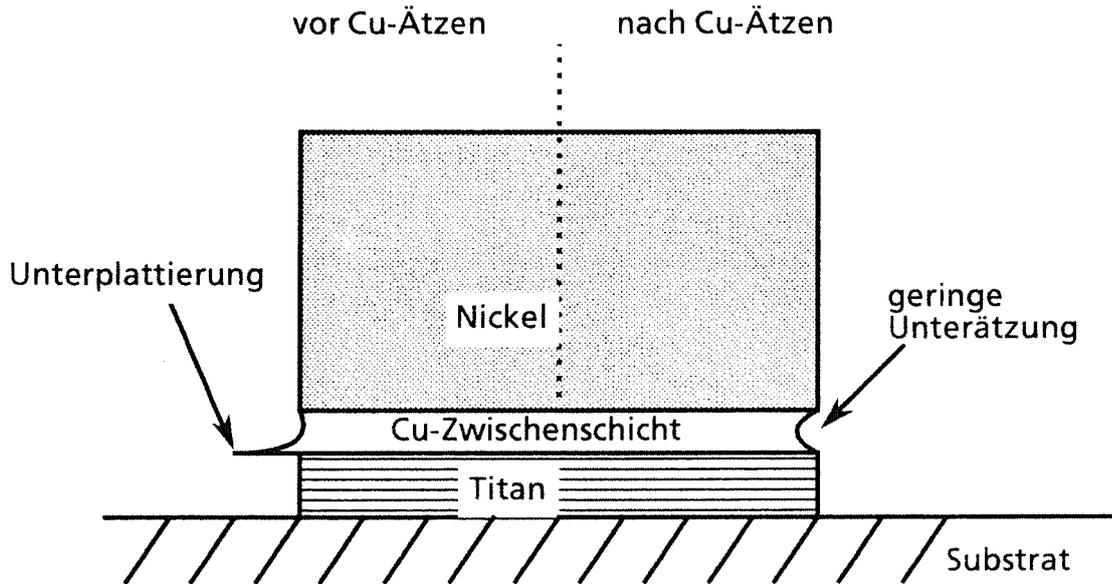


Abb. 3.11 Entfernen der Unterplattierung durch eine galvanische Zwischenschicht.

Unterplattierungen auch im Kondensatorspalt entfernt sind, ist nur durch die Zerstörung der Sensoren möglich. Es wurden daher Ätzparameter ermittelt, die eine Unterätzung von ca. 10 μm verursachen, um sichzustellen, daß die Unterplattierung verläßlich entfernt ist.

4. Untersuchung der Sensoren

Mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Herstellungsverfahren wurden Sensoren hergestellt die den Anforderungen von Kapitel 2 genügen. Es wurden Sensoren mit einer besonders großen Länge der seismischen Masse (3,5 mm) verwendet, da bei diesem Design die meßtechnisch angestrebte Ruhekapazität von einem Pico-farad bereits bei einer Strukturhöhe von 100 μm erreicht wird. Die Biegezunge ist 185 μm lang, 20 μm breit , die Breite der seismischen Masse beträgt 400 μm und die Spaltweite 3 μm . Dabei wurde eine Doppelkondensatoranordnung gewählt, bei der sich die seismische Masse zwischen zwei Gegenelektroden bewegt (Abb.4.1.a). Bei dieser Anordnung ist die Bewegung der seismischen Masse horizontal in beide Richtungen begrenzt, was die Handhabung der Sensoren vereinfacht. Abb. 4.1.b zeigt eine Übersichtsaufnahme einer Sensorstruktur.

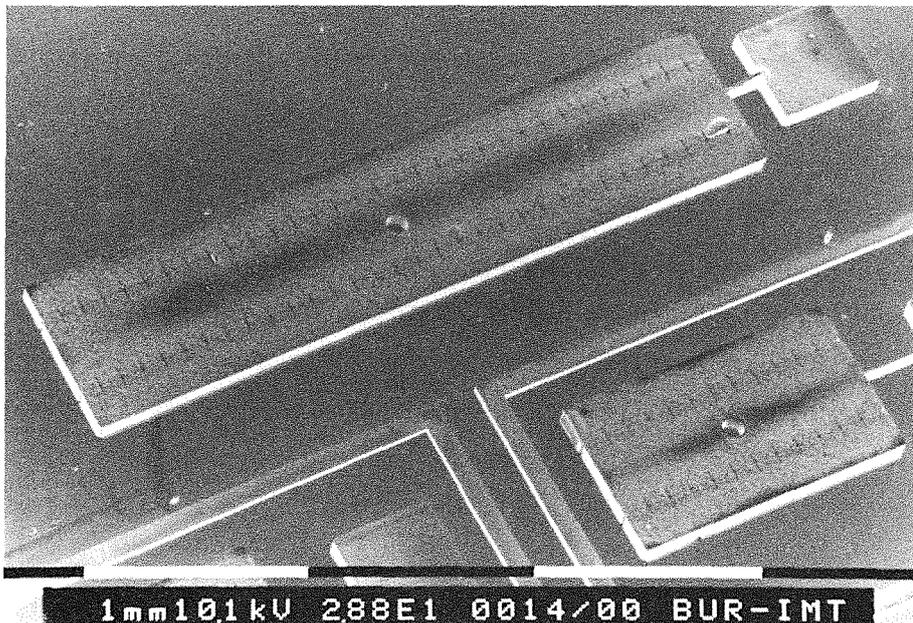
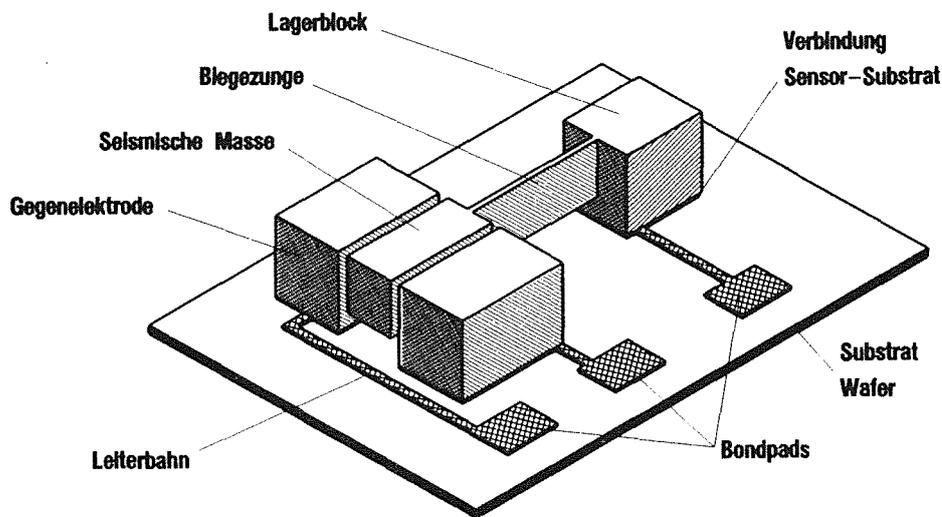


Abb. 4.1 a.) Prinzipskizze eines Beschleunigungssensors
b.) REM-Aufnahme eines Beschleunigungssensors

Deutlich zu erkennen sind der Lagerblock, die Biegezunge, sowie die Gegenelektroden und die seismische Masse. Das genaue Design von Biegezunge und Kondensatorspalt ist in dieser Vergrößerung nur schwer zu erkennen. Sowohl an der Biegezunge wie auch am Kondensatorspalt wurden jedoch Designmodifikationen durchgeführt, um defektfreie Sensorstrukturen herstellen zu können.

Um Spannungsrisse in der PMMA zu vermeiden, müssen rechtwinklige Ecken im Design vermieden werden. Der Übergang zwischen seismischer Masse und Zunge und zwischen Lagerblock und Zunge wurde daher zur Vermeidung von Spannungsrisse durch eine sogenannte Baudlinie verrundet (Abb. 4.2) /29/.

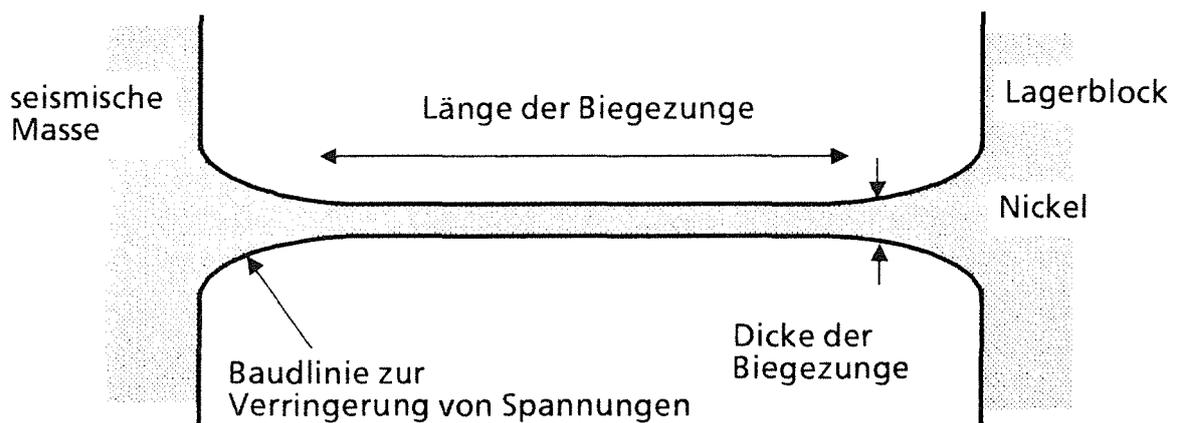


Abb. 4.2 Biegezunge: Die Ecken zwischen der Zunge und der seismischen Masse bzw. dem Lagerblock sind durch eine Baudlinie verrundet

Durch die Baudlinien wird die effektive Länge der Biegezunge verringert bzw. die effektive Dicke der Biegezunge vergrößert. Wegen des großen Aufwandes für die genaue Berechnung des Einflusses der Baudlinie wird dieser Effekt nur geschätzt, daher ist die Länge bzw. die Dicke der Biegezunge nur auf ca. 10 % genau bekannt.

Das gleiche Problem besteht beim Kondensatorspalt. Auch hier müssen Maßnahmen zur Spannungsrißverringern angewendet werden. Zusätzlich zur Spannungsreduktion hat es sich als notwendig herausgestellt, die feinen, wenige Mikrometer breiten PMMA-Strukturen des Kondensatorspalts alle 100 μm mit einer 10 μm breiten und 50 μm tiefen Stützstruktur abzustützen, um die Stabilität der PMMA-Wände zu erhöhen. Einen Ausschnitt des Kondensatorspalts zeigt Abb. 4.3.

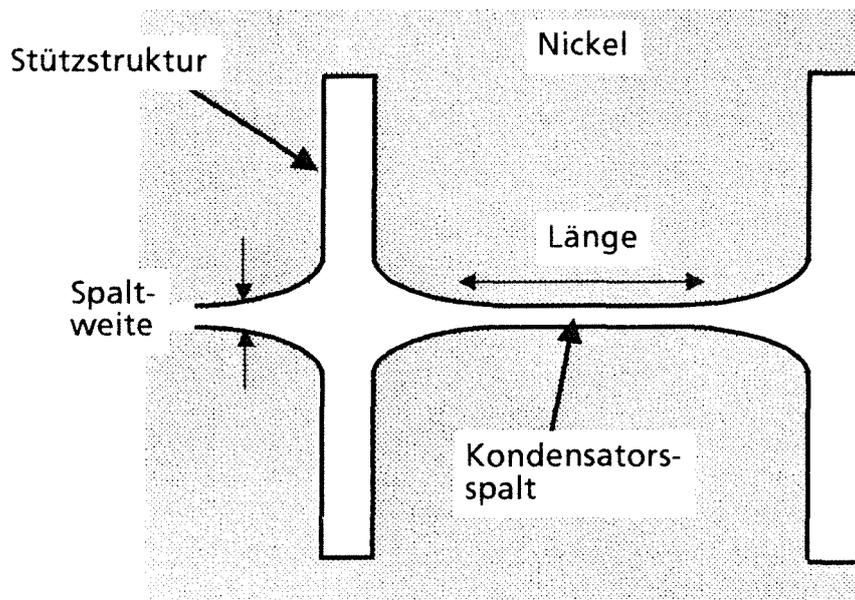


Abb. 4.3 Ausschnitt des durch Stützstrukturen und Baudlinien veränderten Kondensatorspaltes

Die Stützstrukturen bewirken eine im Vergleich zur Länge der seismischen Masse um 10% geringere Kondensatorlänge.

Die effektive Spaltweite des Kondensatorspaltes wird durch die Baudlinien vergrößert. Genau wie bei der Biegezung ist die effektive Spaltweite nur auf ca. 10 % genau bekannt.

An solchen Sensoren wurde die prinzipielle Funktionstüchtigkeit nachgewiesen. Dabei wurde sowohl die Kapazitätsänderung der Sensoren als Funktion der Beschleunigung wie auch die Resonanzfrequenz ermittelt.

4.1. Untersuchung der Empfindlichkeit

4.1.1. Meßaufbau

Zur Untersuchung der Empfindlichkeit werden die Sensoren durch Drehen im Beschleunigungsfeld der Erde Beschleunigungen von $\pm 0.9 \text{ g}$ ausgesetzt. Dazu werden die Sensoren auf einem Drehtisch montiert, an dem beliebige Winkel zur Horizontalen zwischen $\pm 70^\circ$ eingestellt werden können. Aus dem Winkel α gegen das Lot kann die anliegende Beschleunigung a nach

$$(23) \quad a = g \sin \alpha$$

errechnet werden.

Zur Messung der Kapazitätsänderungen wird eine kommerziell erhältliche Meßbrücke (HP 4278 A) verwendet, die laut Hersteller in dem verwendeten Betriebsmodus (Meßfrequenz = 1 MHz, Meßspannung = 1 Volt) einen Meßfehler von kleiner 0,0012 pF hat. Da sich aufgrund des externen Meßaufbaus relativ große und zudem unbekannte Störkapazitäten von Kabeln und Bonddrähten zur Kapazität des Sensors addieren (Abb. 4.4), kann die Absolutkapazität des Sensors nicht ermittelt werden.

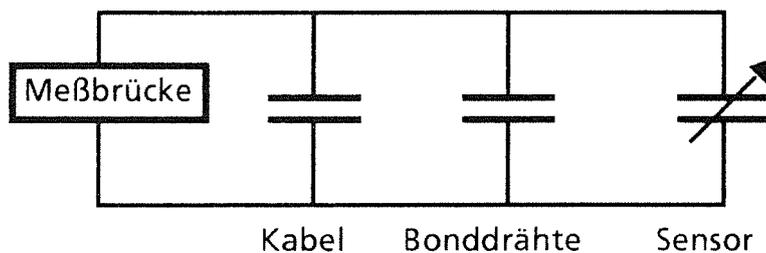


Abb. 4.4 Ursache von Störkapazitäten

Durch Messungen an der Versuchsanordnung ohne Sensor konnte jedoch sichergestellt werden, daß die Störkapazitäten der Kabel nicht durch die Drehung des Meßtisches beeinflusst werden. Daher ist die Bestimmung der Kapazitätsänderung, die für den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Sensoren ausreicht, problemlos möglich.

4.1.2. Meßergebnisse

Abb. 4.5 zeigt die Kapazitätsänderung als Funktion der Beschleunigung im Bereich von $-0,9 \text{ g}$ bis $+0,9 \text{ g}$ an den beiden Kondensatorspalten eines Sensors.

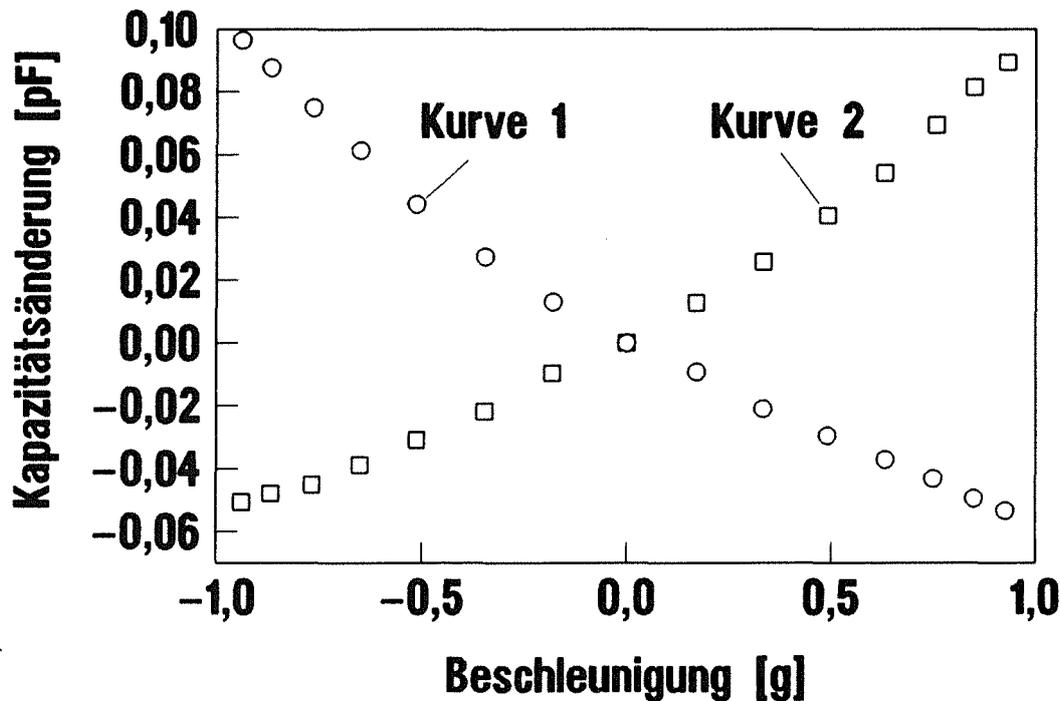


Abb. 4.5 Kapazitätsänderung an beiden Kondensatorspalten als Funktion der Beschleunigung (Meßfehler kleiner als Symbolgröße)

Die unterschiedlichen Kapazitätsänderungen bei gleicher Beschleunigung in positiver und negativer Richtung erklären sich aus der Tatsache, daß beispielsweise der Sensorspalt, aus dem Kurve 2 ermittelt wurde, bei negativer Beschleunigung geöffnet und bei positiver Beschleunigung geschlossen wird. Da die Kapazität umgekehrt proportional zur Spaltweite ist, ergibt sich diese nichtlineare Kennlinie.

Vergleicht man Kurve 1 und Kurve 2, so sieht man, daß die Kennlinie der beiden Kondensatorspalte eines Sensors nicht exakt gleich ist. Dies liegt vermutlich daran, daß die seismische Masse des Sensors in der Ruhelage nicht exakt in der Mitte zwischen den Gegenelektroden liegt, d.h. die beiden Kondensatoren haben prozeßbedingt einen geringfügig unterschiedlich großen Kondensatorspalt.

4.2. Untersuchung der Resonanzfrequenz

4.2.1. Meßaufbau

Zur Untersuchung der Resonanzfrequenz wird der Sensor mit einer sinusförmigen Beschleunigung bei verschiedenen Frequenzen angeregt und die Amplitude des daraus resultierenden Signals betrachtet. Zur Anregung des Sensors wurde ein Schwingungserreger der Firma Brüel & Kjaer verwendet. Mit diesem

Schwingungserreger können die Sensoren mit Beschleunigungen von bis zu 70 g bei Frequenzen bis zu 10 kHz angeregt werden. Die unterste Anregungsfrequenz beträgt ca. 20 Hz. Der Nachweis des Sensorsignals erfolgt durch einen Differenzladungsverstärker. Der Ladungsverstärker liefert als Output ein Analogsignal, welches proportional zur Differenz der Kapazität der beiden Kondensatorspalte ist. Da bei dieser Meßmethode keine Zeit zum Abgleich des Signals wie bei der Meßbrücke benötigt wird, können die Sensoren auch dynamisch, d.h. frequenzabhängig untersucht werden. Die Genauigkeit dieses Meßprinzips ist jedoch geringer als bei der Meßbrücke.

Bei der Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Sensoren zeigte sich, daß erhebliche Störungen der Messung durch Schwingungsanregung des Gehäuses der Sensoren oder des Meßaufbaus auftreten können. Diese äußern sich in zusätzlichen Amplitudenüberhöhungen im Frequenzgang und einer Verzerrung des Sensorsignals. Es wurden daher nur solche Messungen ausgewertet, bei denen der Sensor als Signal die theoretisch erwartete, reine Sinusschwingung zeigte.

Die hier vorgestellten Messungen wurden freundlicherweise von der Firma Bosch in Ettlingen durchgeführt.

4.2.2. Meßergebnisse

Abb. 4.6 zeigt das Sensorsignal als Funktion der Anregungsfrequenz bei Beschleunigungen von 0,5 g.

Im niederfrequenten Bereich bis ca. 200 Hz ist das Signal näherungsweise von der Frequenz unabhängig. Zu höheren Frequenzen nimmt das Sensorsignal deutlich zu, um bei Frequenzen über ca. 600 Hz wieder abzunehmen. Die aus dieser Messung ermittelte Resonanzfrequenz liegt bei 570 Hz.

Die Resonanzüberhöhung (\approx Faktor 5) des Sensorsignals zeigt, daß der Sensor nur schwach gedämpft ist. Dies ist besonders bemerkenswert, da an mikromechanischen Beschleunigungssensoren, die nach der Siliziumätztechnik hergestellt werden, bei Atmosphärendruck in der Regel starke, d.h. überkritische Dämpfung beobachtet wird /13/.

4.3. Untersuchung der Querempfindlichkeit

Die Untersuchung der Querempfindlichkeit wird mit Hilfe des gleichen Meßaufbaus, mit dem auch die Resonanzfrequenz bestimmt wurde, durchgeführt. Die Sensoren werden so auf dem Schwingungserreger angeordnet, daß die Beschleunigung einmal senkrecht zum Substrat und einmal in der

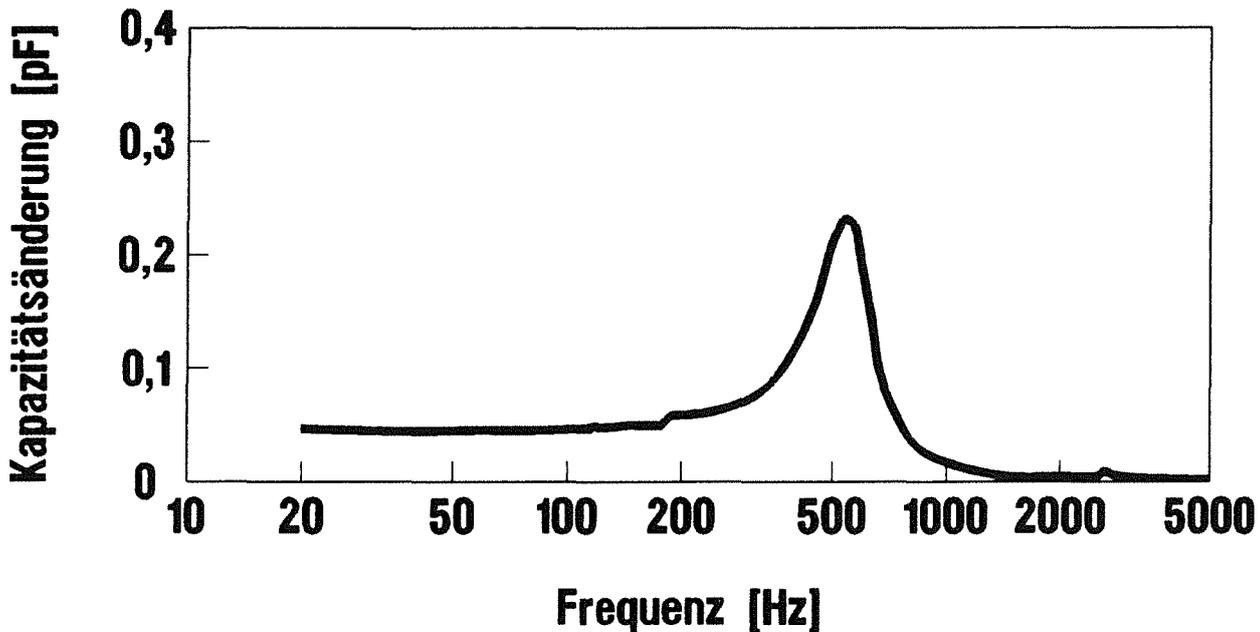


Abb. 4.6 Signal des Sensors als Funktion der Anregungsfrequenz

Längsachse der Zunge gerichtet ist. Der Test erfolgte jeweils mit Beschleunigungen von ± 5 g.

Im Rahmen der Meßgenauigkeit konnte kein Signal des Sensors bei Beschleunigungen in beide Richtungen nachgewiesen werden. Die Signaländerung des Sensors pro g ist daher um mindestens einen Faktor 75 kleiner als in Meßrichtung (Grenze der Meßempfindlichkeit).

4.4. Vergleich der experimentellen Daten mit der Theorie

Aufgrund der Designdaten, die so gewählt wurden, daß die Sensoren eine Empfindlichkeit von 20 %/g bei einem Picofarad Ruhekapazität aufweisen, ist bei einer Beschleunigung von 0.9 g eine Kapazitätsänderung von etwa 0.18 pF zu erwarten. Der gemessene Wert von ca. 0,09 pF ist im Vergleich dazu um ca. einen Faktor zwei zu niedrig. Da die Kapazitätsänderung von allen Geometrie- und Materialdaten beeinflusst wird, kann durch die Messung der Kapazitätsänderung allein nicht erklärt werden, welcher der Parameter von den gewünschten Solldaten abweicht und die im Vergleich zur Theorie verringerte Kapazitätsänderung verursacht.

Die Geometriedaten der Sensoren können durch Ausmessen bis auf die durch das Design verursachten Unsicherheiten bei Spaltweite und Zungenlänge bestimmt werden.

Der Elastizitätsmodul des galvanisch abgeschiedenen Nickels der Mikrostrukturen ist bisher erst ansatzweise untersucht /30/. Es kann daher nur von Literaturwerten für massives Material ausgegangen werden. Die Dichte des Sensormaterials wurde bestimmt, indem galvanisch abgeschiedenes Nickel mit einem definierten Volumen gewogen wurde. Sie stimmt bis auf einen Meßfehler von ca. 1,5 % mit dem Literaturwert von 8,9 g/cm³ überein.

Durch eine zusätzliche Messungen ist es möglich, die effektive Spaltweite und damit auch die Ruhekapazität relativ genau zu bestimmen. Dazu wird an den durch eine Beschleunigung ausgelenkten Sensor eine elektrische Spannung an den Kondensatorplatten anlegt, so daß die seismische Masse wieder in die Ruhelage zurückgezogen wird (force balance). Die Ruhelage wird dabei durch Messung der Kapazitätsänderung bestimmt. In diesem Fall errechnet sich die Beziehung zwischen der Beschleunigung a und der angelegten Spannung U nach:

$$(24) \quad F_{\text{Beschl.}} = F_{\text{el.}} = Ma = \frac{\epsilon_0 \text{Fläche}}{2} \frac{U^2}{S^2} \quad M = \text{Gewicht der seismischen Masse}$$

Da die Dichte des Materials, die Abmessung der seismischen Masse und die Fläche des Kondensators mit geringem Fehler bekannt sind, kann mit dieser Formel die Spaltweite S des Kondensators mit guter Genauigkeit berechnet werden. In diese Formel gehen keine Parameter der Biegezunge ein, d.h. die Bestimmung der Spaltweite ist unabhängig von der Geometrie der Biegezunge und dem Elastizitätsmodul.

Die aus dieser Messung ermittelte effektive Spaltweite des in Abb. 4.5 Kurve 1 gezeigten Kondensators beträgt 4,1 µm. Im REM wurde an den Stellen, die von der Baudlinie nicht mehr beeinflußt werden, eine Spaltweite von ca. 3,7 µm gemessen. Diese Abweichung von den geplanten 3 µm ergibt sich durch die Vielzahl der Prozesse, die für die Herstellung von Röntgenmasken notwendig sind. Die Abweichung kann durch eine exakte Maßverfolgung bei der Maskenherstellung und entsprechende Maskenvorhalte vermieden werden. Aufgrund der Baudlinien ist eine Vergrößerung der effektiven Spaltweite um ca. 10 % durchaus realistisch.

Aus dem Vergleich der gemessenen und der berechneten Resonanzfrequenz lassen sich weitere Informationen erhalten. Die Resonanzfrequenz hängt von der Geometrie der Zunge und der seismischen Masse und vom Elastizitätsmodul und der Dichte des Materials ab (siehe Kapitel 2.3).

Die Abmessung der seismischen Masse und die Dichte des Nickels sind mit guter Genauigkeit bekannt. Für die Dicke der Biegezunge wurde der Wert im nicht von

der Baudlinie beeinflussten Bereich verwendet. Unbekannt sind somit der Elastizitätsmodul und aufgrund der Baudlinie die effektive Länge der Biegezunge. Unter der Annahme, daß auch an mikromechanischen Bauteilen der in der Literatur bekannte Elastizitätsmodul gültig ist, läßt sich aus der Resonanzfrequenz die effektive Länge der Zunge berechnen. Sie ist um ca. 8 % geringer als die Solllänge ohne Baudlinie und liegt somit im geschätzten Unsicherheitsbereich.

Mit den so relativ genau bestimmten Werten für die Spaltweite und die Zungenlänge wurden die Kapazitätsänderungen als Funktion der Beschleunigung berechnet. Abb. 4.7 zeigt im Vergleich die berechnete Kurve und die gemessenen Werte.

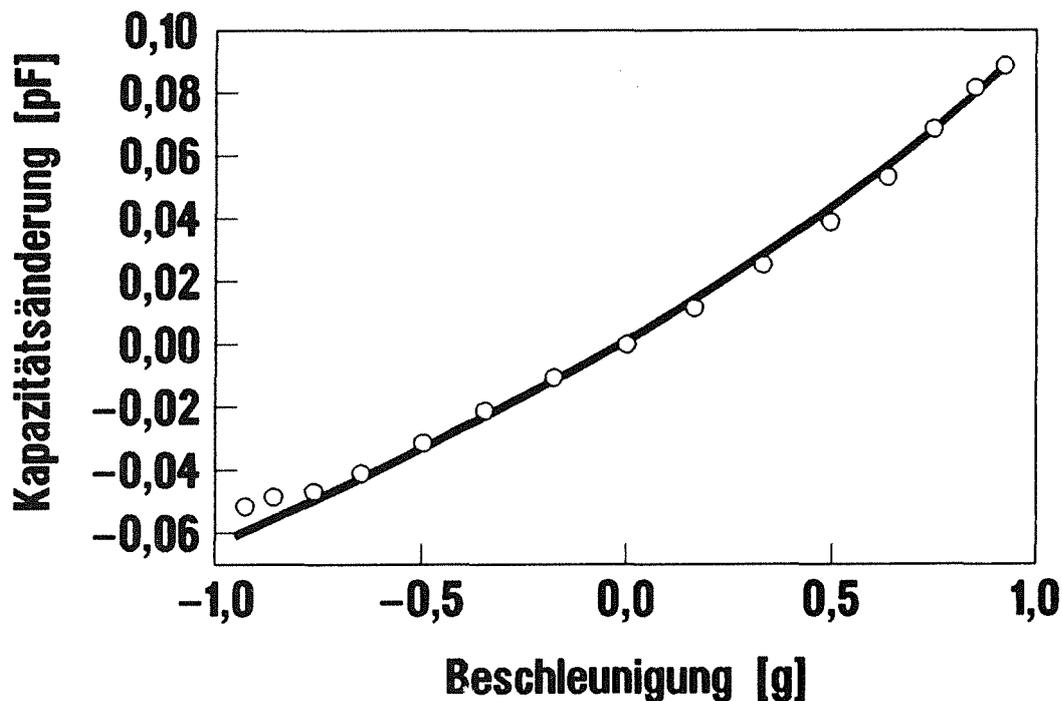


Abb. 4.7 Vergleich von Meßwerten und Theorie

Wie aus der Abbildung zu ersehen, sind die Abweichungen der theoretisch berechneten und der gemessenen Werte gering. Der Sensor zeigt näherungsweise das vorausberechnete Verhalten. Im Rahmen der Meßgenauigkeit stimmt daher der Wert für den Elastizitätsmodul mit dem Literaturwert für massives Material überein.

Aus den ermittelten Werten des Kondensators, d.h. der Fläche und der Spaltweite, kann die Ruhekapazität des Sensors zu 0,6 pF errechnet werden. Wird die so errechnete Ruhekapazität in Relation zur gemessenen Kapazitätsänderung unter Beschleunigung gesetzt, so ergibt sich eine Empfindlichkeit des Sensors von

ca. 15 %/g. Die Abweichung vom angestrebten Wert von 20 %/g wird überwiegend durch die Vergrößerung der Spaltweite des Sensors verursacht. Das Verhältnis von Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz entspricht den in Kapitel 2.4 errechneten Werten.

5. Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit Hilfe des LIGA-Verfahrens ein kapazitiver Beschleunigungssensor hergestellt und dessen Funktionstüchtigkeit nachgewiesen. Im theoretischen Teil der Arbeit wurden die Leistungsdaten der Sensoren als Funktion der Sensorgeometrie berechnet und die sich daraus ergebenden Anforderungen an den Herstellungsprozess untersucht. Für das aus den Berechnungen erarbeitete Design wurde ein Herstellungsverfahren entwickelt, mit dem erstmalig bewegliche Strukturen mit dem LIGA-Verfahren hergestellt wurden. Hierzu waren zahlreiche neue Prozeßschritte mit dem LIGA-Verfahren zu kombinieren.

Für die Berechnung der Leistungsdaten der Sensoren und des Designs wurde eine Empfindlichkeit der Sensoren von 20%/g und eine Resonanzfrequenz von >500 Hz zugrunde gelegt, was den Einsatz der Sensoren beispielsweise zur Fahrwerksregelung erlauben würde. Bestehen die Sensoren nur aus einer Biegezunge, muß diese mehr als 2000 µm lang sein, damit die Abmessungen der Zungendicke und der Spaltweite in Dimensionen von einigen Mikrometern liegen, die zur Zeit mit dem LIGA-Verfahren beherschbar sind. Bei Sensoren mit Biegezunge und seismischer Masse reduziert sich die Länge der Biegezunge auf einige hundert Mikrometer.

Diese Anforderungen können mit dem derzeitigen Stand des LIGA-Verfahrens nicht durch ein stehendes Design realisiert werden. Eine reine Zunge ließe sich nur als Beschleunigungssensor einsetzen, wenn die mit dem LIGA-Verfahren zur Zeit erreichbaren Aspektverhältnisse um einen Faktor 20 und die strukturierbaren Höhen um einen Faktor 10 vergrößert würden. Dies bedeutet, daß Gräben im Resist bzw. freistehende Resistwände mit einem Aspektverhältnis von etwa 1000 bei Abmessungen im Mikrometerbereich hergestellt werden müßten. Die erforderliche Zungenlänge ließe sich zwar durch eine seismische Masse reduzieren, es steht jedoch bisher kein Verfahren zur Verfügung, auf einer stehenden Zunge eine seismische Masse mit der notwendigen Präzision zu erzeugen.

Für liegende Sensoren können die Anforderungen an die Sensorgeometrie bereits mit dem heutigen Strukturierungsmöglichkeiten des LIGA-Verfahrens erreicht werden. Allerdings war es für die Herstellung solcher Strukturen notwendig, das LIGA-Verfahren mit einer Opferschichttechnik zu kombinieren. Dieser erweiterte Herstellungsprozeß, bei dem drei Strukturierungsebenen verwendet werden, erlaubt die Herstellung von frei beweglichen, gegeneinander elektrisch isolierten

Mikrostrukturen. Bei der Anwendung der Opferschichttechnik bleiben alle Vorteile des LIGA-Verfahrens erhalten.

Als Opferschicht wurde dabei Titan verwendet, da die feinen, wenige Mikrometer breiten PMMA-Strukturen der Kondensatorspalte, die für die Realisierung der Sensoren notwendig sind, bisher nur auf Titan ausreichend gute Haftung zum Substrat zeigen. Titan kann durch optische Lithographie und mit Flußsäure strukturiert werden. Die selektive Ätzung der Titanopferschicht erfolgt ebenfalls mit Flußsäure.

Die Untersuchung des Freiätzens von Nickelmikrostrukturen auf dieser Titanopferschicht zeigte, daß im untersuchten Konzentrationsbereich bis 10 % kein Einfluß der Flußsäurekonzentration auf die Qualität der Mikrostrukturen festgestellt werden kann. Geringe Flußsäurekonzentration bewirken als einzigen Nachteil eine Verlängerung der zum Freiätzen benötigten Zeit. Da die Freiätzung unter den Nickelmikrostrukturen linear mit der Zeit fortschreitet, kann gefolgert werden, daß der Transport der frischen Ätzlösung nicht durch Diffusion bestimmt ist. Die Dicke der Titanopferschicht hat im untersuchten Bereich zwischen 1 μm und 5 μm keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit des Freiätzens. Sie kann daher, sofern dies bei anderen Anwendungen des Opferschichtverfahrens notwendig ist, an die Erfordernisse des Anwendungsfalls angepaßt werden.

Wie die Berechnungen zeigen, gibt es bei festem Kondensatorspalt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz, so daß ein gewünschtes Wertepaar von Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz nur durch eine geeignete Wahl der Spaltweite erreicht werden kann. Die gewünschte Empfindlichkeit von 20%/g und die Resonanzfrequenz von größer als 500 Hz erfordert Spaltweiten kleiner als 4 μm . Eine Verringerung der Spaltweite auf 3 μm sollte mit dem derzeitigen Stand der Technik und des Designs möglich sein, so daß das Verhältnis von Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz der Sensoren noch gesteigert werden kann. Wenn geringere Resonanzfrequenzen zulässig sind, so kann die Empfindlichkeit durch Anpassung unkritischer Geometrieparameter, wie zum Beispiel der Zungenlänge, deutlich erhöht werden. Solche Sensoren könnten als Neigungssensor mit hoher Winkelauflösung eingesetzt werden. Die Resonanzfrequenz kann durch Verringerung der Empfindlichkeit gesteigert werden. Solche Sensoren könnten beispielsweise zum Auslösen von Sicherheitssystem in Automobilen verwendet werden, bei denen die Empfindlichkeit der Sensoren etwas geringer sein kann, aber der Sensor sehr schnell auslösen muß.

Die Untersuchung der Sensoren ergab für die Empfindlichkeit und die Resonanzfrequenz gute Übereinstimmung mit der Theorie. Dieses Ergebnis zeigt im Rahmen der Meßgenauigkeit die Verwendbarkeit der Materialkennwerte (Elastizitätsmodul, Dichte) aus der Literatur.

Die für das LIGA-Verfahren typische hohe Steifigkeit der Biegezungung macht einen Schutz der Sensoren gegen Beschleunigungen senkrecht zum Substrat überflüssig. Daher sind abgesehen vom unvermeidbaren Vereinzeln und Kontaktieren der Sensoren, keine weiteren Bearbeitungsschritte notwendig. Ein Zusammenfügen von einzelnen Teilen des Sensors entfällt. Da zudem die beobachtete Dämpfung der Sensoren gering ist, müssen die Sensoren nicht evakuiert werden, um die Dämpfung zu verringern. Die hier vorgestellten Sensoren haben somit eine Reihe von Vorteilen gegenüber den durch anisotropes Siliziumätzen hergestellten Sensoren [31].

Um die Sensoren vom Labormuster zur Marktreife zu entwickeln, müssen noch folgende Fragen weiter untersucht werden. Die geringen zur Zeit erzielten Kapazitätsänderungen sind im Hinblick auf eine einfache Elektronik noch unbefriedigend. Dieses Problem kann durch Erhöhung der Kapazität gelöst werden. Durch die Integration von Schaltkreisen und Sensoren können die Effekte von parasitären Kapazitäten und Induktivitäten verringert und so das Problem der zu geringen Kapazitätsänderung entschärft werden. In der Anwendung muß die Funktionstüchtigkeit der Sensoren über einen langen Zeitraum garantiert werden, in KFZ-Anwendung sollten die Sensoren zum Beispiel über 10^9 Lastwechsel überstehen. Dabei sind vor allem Fragen der Materialalterung zu untersuchen, und gegebenenfalls müssen andere Materialien als Nickel eingesetzt werden.

Eine Erhöhung der Kapazität ist durch höhere Sensorstrukturen, kleinere Spaltweiten oder eine Vergrößerung der Kondensatorfläche möglich. Beim jetzigen Stand des LIGA-Verfahrens erscheint allenfalls eine Vergrößerung der Strukturhöhe um einen Faktor zwei und eine Verringerung der Spaltweite auf ca. $3 \mu\text{m}$ denkbar. Da die Vergrößerung der Kondensatorfläche nicht zu einer Vergrößerung der für den Sensor benötigten Grundfläche führen sollte, muß ein neues Design, beispielsweise mit Kammstrukturen, entwickelt werden.

Durch die Integration der Sensoren mit der dazugehörigen Auswertungs-elektronik können die Störkapazitäten minimiert und so die Nachweisgrenze der Elektronik verbessert werden. Mit geringem Entwicklungsaufwand erscheint eine Hybridintegration möglich, bei der die Sensoren durch Bonddrähte mit der Elektronik verbunden werden. Eine vollständige Integration, d.h. die Anwendung

des LIGA-Verfahrens auf einem mit Schaltkreisen versehenen Wafer muß noch in ihren Grundlagen untersucht werden. Ein Literaturstudium und erste im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Untersuchungen zeigen, daß Schaltkreise durch die beim LIGA-Verfahren verwendete Synchrotronstrahlung zerstört oder aber zumindest in ihren Eigenschaften stark verändert werden /32/. Sofern die Schaltkreise neben dem Sensor auf der Waferoberfläche angeordnet sind, läßt sich die Bestrahlung der Schaltkreise durch eine geeignete Maske jedoch vermeiden. Bei Verwendung der Opferschichttechnik in Verbindung mit abgeformten Mikrostrukturen werden die Schaltkreise nicht durch Röntgenstrahlung belastet. Dabei könnten die Sensoren auch direkt über den Schaltkreisen angeordnet werden. Die Abformung hat darüberhinaus den Vorteil, daß sie eine kostengünstige Massenproduktion ermöglicht. Bei der direkten Integration ist auch zu berücksichtigen, daß Flußsäure, die zum Ätzen der Titanopferschicht verwendet wird, alle üblicherweise in der Halbleitertechnik zur Passivierung der Schaltkreise verwendeten Schichten angreift. Ohne Passivierung sind die Schaltkreise Umwelteinflüssen ausgesetzt, die die Funktion beeinträchtigen oder die Schaltkreise zerstören können. Es wäre daher notwendig, Passivierungen zu verwenden, die gegen Flußsäure beständig sind, oder, wenn neue Resistentwicklungen dies erlauben, andere Materialien für die Opferschichten einzusetzen.

Um eine ausreichend lange Lebensdauer der Sensoren sicherzustellen, müssen die Materialeigenschaften des für die Sensoren verwendeten Nickels untersucht werden. Im Vordergrund steht dabei die Frage nach der Alterung durch Biegespannungen. Wenn sich herausstellen sollte, daß Nickel zu schnell ermüdet, müssen andere Metalle oder besser noch galvanisch abgeschiedene Legierungen, wie zum Beispiel Kobalt/Nickel, für die Herstellung von Sensoren untersucht werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit erweiterten Möglichkeiten des LIGA-Verfahrens durch die Opferschichttechnik lassen sich über den Beschleunigungssensor hinaus auch für die Herstellung anderer Mikrosensoren oder Aktoren nutzen. Als Beispiele sind in diesem Zusammenhang die bereits in der Entwicklung befindliche Mikroturbine und Mikrofedern für die Chip-Faserkopplung zu nennen /30, 33/. Bewegliche Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren bieten als typischen Vorteil die große Strukturhöhe. Daher können mit solchen Mikrostrukturen im Vergleich zu anderen Techniken bedeutend größere elektrostatische Kräfte erzeugt werden. Besonders für Aktoren ergibt sich daher ein besonders großes Potential, da es einfach möglich sein sollte, die für

praktische Anwendungen benötigten Kräfte mit beweglichen LIGA-Strukturen zu erzeugen.

Literaturverzeichnis

1. H. Brendecke, G. Heilmann, G. Wartmann, "Mikroperipherik", in: Sensoren 86/87, VDI-Verlag, Düsseldorf, (1986), 22-25
2. A. Heuberger, "Mikromechanik", Springer Verlag, Berlin, (1989)
3. K.E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material", Proc. IEEE 70, (1982), 420-457
4. J.E. Curran, "Physical and Chemical Etching in Plasmas", Thin solid Films, 86 (1981), 101-116
5. C.M. Melliar-Smith, "Ion etching for pattern delineation", J. Vac. Sci. Tech., Vol. 13, No. 5, (1976), 1008-1022
6. E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer, "Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process)", Microelectronic Engineering 4, (1986), 35-56
7. K.E. Petersen, "Silicon sensor technology", IEEE International Electron Devices Meeting, Washington D.C., (1985), 2-7
8. T.T. Howe, in C.Y. Chang, C.C. Thompson and K.N. King (ed.), Polysilicon Films and Interface, Materials Research Society, Pittsburgh (1988), Vol. 106
9. W. Ehrfeld, P. Bley, F. Götz, P. Hagmann, A. Maner, J. Mohr, H.O. Moser, D. Münchmeyer, W. Schelb, D. Schmidt, E.W. Becker, "Fabrication of Microstructures Using the LIGA Process", Micro Robots and Teleoperators Workshop, November 9-11 1987, Hyannis, Cape Cod, MA, USA. Proc. IEEE, K.J. Gabriel, W.S.N. Trimmer, eds., IEEE Catalog Number 87TH0204-8 (1987), 1-11
10. B. Anderer, W. Ehrfeld, J. Mohr, "Grundlagen für die röntgentiefenlithographische Herstellung eines planaren Wellenlängen-Demultiplexers mit selbstfokussierendem Reflexionsbeugungsgitter", KfK Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1990), KfK 4702
11. W. Ehrfeld, E.W. Becker, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer, D. Schmidt, "Herstellung von elektrischen und optischen Mikroverbindungen mit Hilfe des LIGA-Verfahrens", Fachtagung Verbindungstechnik 1988 für elektronische und elektro-optische Geräte und Systeme, Karlsruhe, 25./26. (1988). VDI-Berichte Nr. 673, 1988, 35-50
12. H. Seidel, H. Riedel, P. Kolbeck, G. Mück, M. Königer, "Mikromechanischer, kapazitiver Beschleunigungssensor mit symmetrischer Aufhängung", in AMA-Seminar Mikromechanik Arbeitsgemeinschaft Meßwertaufnehmer, München, (1989), 147-155

13. F. Rudolf, A. Jornod, "Kapazitiver Beschleunigungssensor", in AMA-Seminar Mikromechanik, Arbeitsgemeinschaft Meßwertaufnehmer, München, (1989), 155-165
14. L. Csepregi, K. Kühl, R. Nießl, H. Seidel, "Technologie dünngeätzter Siliziumfolien im Hinblick auf monolithisch integrierbare Sensoren", Forschungsbericht T 84-209 (1984), Bundesministerium für Forschung und Technologie
15. U. E. Gerlach, "Capacitive Accelerometer Made by Silicon Mikromechanics", Proc. of the 1st Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, Berlin, (1990), 623-628
16. J. Wittenburg, "Mechanik fester Körper", in Hütte, Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, Springer Verlag, Heidelberg, (1989)
17. D. Munz, K. Schwalbe, P. Mayr, "Dauerschwingverhalten metallischer Werkstoffe", Vieweg Verlag, Braunschweig, (1971)
18. C. Burbaum, J. Mohr, P. Bley, W. Ehrfeld, "Fabrication of Capacitive Acceleration Sensors by the LIGA-Technique", Eurosensors IV, Karlsruhe, Germany, October 1-3, (1990), to be published in Sensors and Actuators
19. J. Mohr, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer, "Analyse der Defektursachen und der Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung", KfK 4414, (1988)
20. Gmelin, "Handbuch der anorganischen Chemie", Titan, 41, (1951), Verlag Chemie, Weinheim, 189-194
21. Landolt-Börnstein, "Technologie von Si, Ge und SiC", Springer Verlag, Heidelberg, (1984)
22. E. Lüder, "Bau hybrider Mikroschaltungen", Springer Verlag, Heidelberg, (1977)
23. P.B. Ghate, in Bunshak, "Deposition Technology for Films", Noyes Publications, (1982)
24. W. Kern, C.A. Deckert, "Chemical Etching", in J. Vossen (ed.), Thin Film Processing, New York, Academic Press, (1978), 401-496
25. Gmelin, "Handbuch der anorganischen Chemie", Chrom, 52, (1962), Verlag Chemie, Weinheim, 630
26. A. Maner, W. Ehrfeld, R. Schwarz, "Galvanoformung von Absorberstrukturen aus Gold auf Masken für die Röntgenlithographie", Galvanotechnik 79, 4 (1988), 1101-1106
27. P. Hagmann, W. Ehrfeld, "Fabrication of Mikrostructures of Extrem Structural Heights by Reaction Injection Molding", Journal of the Polymer Processing Society, (1988), International Polymer Processing IV (3) (1989), 527-537
28. R. Schwarz, private Mitteilung

29. H. Huber-Betzer , C. Mattheck , D. Erb , unveröffentlicher Bericht, (1988)
30. A. Rogner, W. Ehrfeld , D. Münchmeyer , P. Bley, C. Burbaum , J. Mohr , "Flexible Microstructures for Fiber-Chip-Coupling", Technical Digest, MME 90, Berlin (1990), 229 -235
31. F. Henschke, H. Weißmantel , "Is it possible to Develop Micromechanical Components According to the Rules of Design for Assembly ? ", Technical Digest, MME 90, Berlin (1990), 75-81
32. W. Daves, F. McLean , P. Robinson , J. Silver , "Hardening Semiconductor Components Against Radiation and Temperature", Noyes Data Corporation, Park Ridge, (1989)
33. J. Mohr, C. Burbaum, P. Bley, W. Menz, U. Wallrabe, "Movable Microstructures Manufactured by the LIGA-Process as Basic Elements for Microsystems", Proc. of the 1st Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, Berlin, (1990), 529 -538

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines vom Kernforschungszentrum Karlsruhe gewährten Doktorandenstipendiums und wurde am Institut für Mikrostrukturtechnik der Universität und des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. W. Menz für die wertvolle Diskussion und Förderung dieser Arbeit.

Herr Dr. Mohr hat durch seine intensive Betreuung wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.