

**Positionserfassung von Dummys mit miniaturisierbaren
Sensorsystemen**

Dipl.-Ing. St. Dauer

**Dipl.-Ing. Stefan Dauer
Institut für Mikrotechnik
Langer Kamp 8
38106 Braunschweig**

**Thema: Positionserfassung von Dummies mit
miniaturisierbaren Sensorsystemen**

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	2
2 Problemstellung	2
3 Lösungsansätze	2
3.1 Messung mit Kameras	2
3.2 Inertiale Positionsbestimmung	3
4 Sensoren für inertielle Messungen	4
4.1 Beschleunigungssensoren	4
4.2 Winkelgeschwindigkeitssensoren	4
4.2.1 Mechanische Gyroskope	4
4.2.2 Optische Gyroskope	5
5 Realisierung eines optischen Gyroskops	7
6 Ausblick	8

1 Zusammenfassung

Die Bestimmung der Bahnkurve $\vec{X}(t) = (x_1 \dots x_3, \phi_1 \dots \phi_3)$ von Teilen eines Dummy, insbesondere des Kopfes, kann prinzipiell mit inertialen Sensorsystemen durchgeführt werden. Die Miniaturisierbarkeit der dafür notwendigen Beschleunigungs- und Drehratensensoren ist nicht für alle Wirkprinzipien möglich oder sinnvoll. Mikromechanische Beschleunigungssensoren sind für viele Anwendungen heute Stand der Technik. Neueste Entwicklungen von Drehratensensoren sind allerdings hinter feinmechanischen oder optischen Kreiselensoren in ihren Leistungsdaten noch weit zurück. Am IMT wurde ein passiver Faserkreisel entwickelt, der bei kleiner Baugröße gute Leistungen zeigt und für die Anwendung im Crash geeignet ist.

2 Problemstellung

Zur Voraussage des Verletzungsrisikos bei Kfz-Unfällen ist es unzureichend, in Crash-Versuchen Kräfte aufgrund von Beschleunigungen am Dummy zu messen. Für die Optimierung von Sicherheitssystemen benötigt man auch Geschwindigkeit und Ort gefährdeter Körperteile zu jedem Zeitpunkt des Unfalls. Dann sind Aussagen möglich, wo und auf welche Weise entsprechende Schutz Einrichtungen wirken müssen.

Das meistgefährdete und zu schützende Körperteil eines Menschen ist der Kopf. Mit Hilfe der Bahnkurve des Kopfes $\vec{X}(t) = (x_1 \dots x_3, \phi_1 \dots \phi_3)$ lassen sich Sicherheitssysteme für diesen Bereich optimieren und Verletzungsrisiken für Halswirbelsäule und Kopf minimieren. Von Seiten der Kfz-Hersteller und des TÜV besteht daher ein verstärktes Interesse an Systemen, die die Bahnkurvenbestimmung ermöglichen.

3 Lösungsansätze

3.1 Messung mit Kameras

Versucht man das Problem mittels Kameras zu lösen, so sind mehrere Hochgeschwindigkeitskameras erforderlich, die im Kfz angebracht werden und an einem Punkt montiert werden müssen, der während des Crash nicht verformt wird.

Bei diesem Lösungsansatz treten folgende Probleme in den Vordergrund:

- Bildaufnahmefrequenzen im kHz-Bereich sind nur mit aufwendigen Drehtrommel- oder Drehspiegelkameras möglich [6].
- Hochgeschwindigkeitskameras sind groß und schwer. Sie werden hohen Beschleunigungen ausgesetzt, die zur Beschädigung oder zur Zerstörung führen können. Sie sind teuer und nicht als Verschleißteil geeignet.
- Es werden aufwendige Einbauten im Serienfahrzeug nötig, damit wird die Übertragbarkeit des Crash auf reale Unfälle eingeschränkt.
- Da vor dem Crash unklar ist, in welcher Weise Kfz-Teile verformt werden, lassen sich keine geeigneten Kamerastandorte im Auto finden, die ein sicheres Ergebnis garantieren.

Die genannten Probleme führen dazu, daß die Positionsbestimmung von Dummys im Crash mit Hilfe von Kameras als ungünstig erscheint.

3.2 Inertiale Positionsbestimmung

Auf dem Gebiet der inertialen oder Trägheitsnavigation haben sich Systeme, bestehend aus 3 Beschleunigungssensoren zur Bestimmung der Translation, sowie 3 Winkelgeschwindigkeitssensoren zur Bestimmung der Orientierung, durchgesetzt. Durch mehrfache Integration erhält man aus den Meßgrößen $\vec{a}(t)$ und $\vec{\omega}(t)$ die Größen $\vec{v}(t)$, $\vec{x}(t)$ und $\vec{\phi}(t)$. Bei dem im Crash eingesetzten Meßsystem kann es sich wegen der hohen Beschleunigungen nur um einen körperfesten Aufbau, ein sogenanntes Strap-Down-System, handeln: die Sensoren sind fest z.B. im Dummykopf eingebaut, die Koordinatenachsen des von den Sensoren aufgespannten Koordinatensystems sind objektfest und bewegen sich entsprechend mit dem Kopf im Raum.

Die inertielle Messung ist für die Bestimmung der Bahnkurve des Kopfes prinzipiell geeignet. Da allerdings völlig andere Randbedingungen vorliegen, als beim üblichen Einsatz als Navigationsinstrument, werden auch z.T. andere Probleme aufgeworfen. Beispielsweise interessieren beim Crashversuch meist Positionsdaten bezüglich eines fahrzeugfesten Koordinatensystems. Um die Dummyposition bezüglich dieses Koordinatensystems angeben zu können, ist ein weiteres inertiell Meßsystem notwendig, das fahrzeugfest montiert ist, mit dessen Daten die Dummyposition transformiert werden kann. Ein weiteres Problem ist die Bestimmung von Position und Orientierung des Dummykopfes zum Ende der Anfahrstrecke. Es liegt nahe, dieses Problem ebenfalls mittels inertialer Navigation zu lösen. Dies bedarf allerdings Sensoren hoher Genauigkeit.

Anforderungen an Sensorsysteme

Die wichtigsten Anforderungen an ein Sensorsystem zur Erfassung der Bahnkurve lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erfassung der Translation (3 Freiheitsgrade) und Orientierung (3 weitere Freiheitsgrade) über eine Strecke von beispielsweise 50 Metern.
- Die zeitliche Auflösung beträgt bei Crashversuchen üblicherweise 16 kHz.
- Der Bauraum ist im Falle des Dummykopfes auf ca. 1000 cm^3 begrenzt, außerdem sollte die Masse möglichst gering sein.
- Während des Crash können Beschleunigungen von einigen 100 g aufgetreten. Entsprechend hoch muß die Schockfestigkeit aller verwendeten Bauelemente sein.

Durch die sehr unterschiedlichen Auslegungen der Meßbereiche lassen sich 2 Meßphasen unterscheiden:

- Phase 1 (bis zum Aufprall): Die Anfangsgeschwindigkeit, Position und Beschleunigung sind null.
Die Meßzeit beträgt wenige Sekunden, translatorische Beschleunigungen treten vornehmlich in x-Richtung in der Größenordnung $\leq 1 \text{ g}$ auf. Die Winkelgeschwindigkeiten liegen unter $100^\circ/\text{s}$ bei gleichzeitig niedrigen Winkelbeschleunigungen.

- Phase 2 (Aufprall): Die Anfangsbedingungen (Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Position) ergeben sich aus Phase 1 und müssen bei der Integration der Aufprallphase berücksichtigt werden.

Die Meßzeit beträgt ca. 100 ms, es treten translatorische Beschleunigungen bis zu einigen 100 g auf. Es ist von Winkelgeschwindigkeiten bis zu $1000^\circ/s$ und hohen Winkelbeschleunigungen auszugehen.

4 Sensoren für inertielle Messungen

4.1 Beschleunigungssensoren

Beschleunigungssensoren werden i.a. passiv als Feder-Dämpfer-Masse Systeme, oder aktiv, z.B. mit piezoelektrischem Wirkprinzip, ausgeführt [2], [3]. Der Dynamikumfang beträgt je nach Bauform $10^2 - 10^4$, die Bandbreite ca. 100 - 1000 Hz. Feinwerktechnische Lösungen sind aufgrund jahrzehntelanger Optimierung mikromechanischen Lösungen bezüglich der erreichbaren Genauigkeit derzeit noch überlegen.

Der Crashversuch stellt in den Phasen 1 und 2 völlig unterschiedliche Anforderungen an die Beschleunigungssensoren (s.o.). Jeder Phase muß daher ein eigenes, den jeweiligen Erfordernissen angepaßtes Sensorsystem zur Verfügung gestellt werden. Wegen der bei Problemen der inertialen Navigation hohen geforderten Genauigkeit sind closed-loop Systeme (Rückstell-, Kompensationssysteme) den einfacheren offenen Systemen vorzuziehen.

4.2 Winkelgeschwindigkeitssensoren

Nach den wirkenden physikalischen Prinzipien lassen sich mechanische Gyroskope, denen der Corioliseffekt zugrunde liegt von optischen, die nach dem Sagnaceffekt arbeiten, unterscheiden. Darüberhinaus gibt es noch andere Wirkeffekte, wie z.B. magnetohydraulische Sensoren [8], die allerdings in der Praxis geringere Bedeutung haben und hier nicht berücksichtigt werden.

4.2.1 Mechanische Gyroskope

Kreisel

Wird einem mit ω_s schnell rotierenden Kreisel mit dem Drehimpuls L_s eine Drehung ω_m senkrecht zu ω_s aufgebracht, so übt die Laufachse des Kreisels aufgrund der Coriolisbeschleunigung ein Drehmoment senkrecht zu der aus ω_m und ω_s aufgespannten Ebene nach $M_k = \omega_m L_s$, mit $L_s = \Theta_s \omega_s$ aus. Für $L_s = \text{const}$ und ideal steife Einbauverhältnisse kann das Moment als Auflagerkraft F_L proportional zu ω gemessen werden.

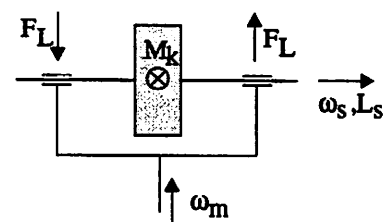


Abbildung 1: Kreiselmoment

Die Größe des Meßeffekts ist entscheidend abhängig von der Spindrehrate ω_s und dem Trägheitsmoment $\Theta_s = \rho \pi r^4 l / 2$ (Radius r , Dichte ρ , Länge l der rotierenden Kreiselmasse). Abschätzungen im Rahmen einer Simulation haben gezeigt, daß bei feinmechanischen Kreiseln mit Abmessungen von beispielsweise $r = 10 \text{ mm}$

und $l = 2 \text{ mm}$ der Meßeffect für die genannten Anforderungen zu gering ist. Auch erfordert die Unterdrückung der Vielzahl mechanischer Störgrößen Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich Fertigungstoleranzen, die bei kleiner Baugröße praktisch nicht realisierbar sind. Eine Miniaturisierung oder die Entwicklung mikromechanischer Kreisel erscheint zur Positionsbestimmung von Dummys als nicht sinnvoll.

Schwinggabel

Regt man eine Schwinggabel mit ihrer Eigenfrequenz an (f_x) und läßt man sie um ihre Längsachse mit ω_m rotieren, entsteht eine Schwingung (f_y) senkrecht zur körperfesten xz-Ebene, deren Amplitude proportional zu ω_m ist. Feinmechanische Realisierungen werden von verschiedenen Herstellern für Meßbereiche bis $1000^\circ/\text{s}$ bei einer Genauigkeit von $1^\circ/\text{s}$ angeboten. Eine mikromechanische Version wird derzeit beispielsweise von [4] entwickelt. Über die Leistungsfähigkeit der ersten Prototypen werden allerdings keine genauen Angaben gemacht.

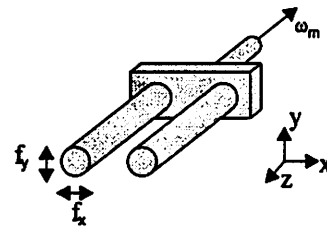


Abbildung 2: Schwinggabelsensor

4.2.2 Optische Gyroskope

Sagnaceffekt

Der Sagnaceffekt ist ein relativistischer Effekt. Für das Verständnis und die Anwendung optischer Gyroskope ist eine unrelativistische Betrachtungsweise allerdings ausreichend und soll an dieser Stelle genügen.

Voraussetzung für den Effekt ist die Invarianz der Lichtgeschwindigkeit im Medium. Die Ausbreitung der Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig von der Geschwindigkeit oder Beschleunigung der Lichtquelle. Koppelt man Licht in eine kreisförmig angeordnete Faser ein und dreht diese Faser aus Position 0 in Position 1, verlängert sich der von der Lichtquelle in Drehrichtung zurückgelegte Weg von 0 bis 1 um $\Delta L+$. Entsprechend verkürzt sich der von dieser Lichtquelle gegen Drehrichtung zurückzulegende Weg um $\Delta L-$. Man erhält eine Laufzeitdifferenz $\delta t = 4\pi R^2 \omega / c^2$ (c = Lichtgeschwindigkeit im Medium). Überlagert man die Teilstrahlen beider Richtungen, so erhält man Interferenzen, die die Bestimmung von ω ermöglichen.

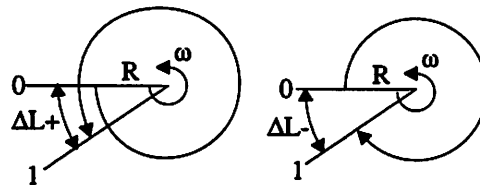


Abbildung 3: Sagnaceffekt

Aktiver Ringkreisler

Mittels einer Kavität und dreier Spiegel, von denen einer teildurchlässig ist, wird ein Ringlaser erzeugt. Die Wellenlängen der durch den Teilspiegel ausgekoppelten Lichtwellen beider Umlaufrichtungen sind abhängig von der optischen Weglänge, also nach dem Sagnac-Effekt von ω . Koppelt man die Wellen beider Richtungen aus dem Resonator aus und bringt sie durch Überlagerung zur Interferenz, entsteht aufgrund des geringen Frequenzunterschiedes der beiden Wellen eine Schwebung. Die Schwebungsfrequenz, mit der die Interferenzstreifen am Detektor vorbeilaufen ist gerade die Differenz der Frequenz der in beide Richtungen umlaufenden Lichtwellen.

Man erhält (vom Lichtweg umschlossene Fläche A, Resonatorlänge L):

$$\Delta f = \frac{4A}{L\lambda} \omega. \quad (1)$$

Dieses zunächst einfache Prinzip stellt sich in der Anwendung als komplexes Problem dar, da Störgrößen, wie z.B. der Lock-in (Mitnahme-) Effekt, aufwendig kompensiert werden müssen. Zur Erzeugung einer stabilen Referenzfrequenz ist eine sehr konstante Resonatorlänge notwendig. Temperatureinflüsse und Verformungen aufgrund höherer Beschleunigungen beispielsweise wirken hier als Störquellen.

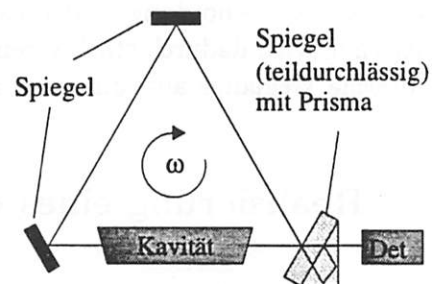


Abbildung 4: Aktiver Ringkreis

Passiver Ringresonator

Der passive Ringresonator unterscheidet sich vom aktiven durch eine externe Laserstrahlquelle. Die Laserstrahlung wird in und gegen Drehrichtung in die ringförmig angeordnete Faser eingekoppelt. Die Länge der Faser beträgt ein Vielfaches der Laserwellenlänge, so daß sich in der Faser eine stehende Welle ausbildet. Wie beim aktiven Laserkreis bilden die durch Überlagerung der ausgekoppelten Wellen entstandenen Interferenzen das Meßsignal.

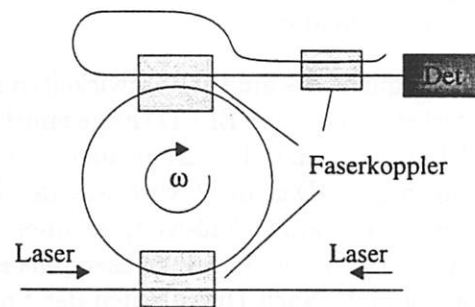


Abbildung 5: Passiver Ringresonator

Einschränkend für eine Miniaturisierung des aktiven und passiven Ringresonators ist die Voraussetzung einer sehr stabilen Resonanzfrequenz. Diese Stabilität ist einerseits abhängig von Abweichungen der Resonatorlänge aufgrund mechanischer Belastungen oder Temperaturdrift, andererseits von der absoluten Resonatorlänge: Je länger der Resonator, desto stabiler ist die Resonanzfrequenz. Einer Miniaturisierung wirkt außerdem entgegen, daß die Größe des Meßeffektes von der Länge des Lichtweges abhängt.

Passives Ringinterferometer

Grundlage des passiven Ringinterferometers ist ein Interferometeraufbau nach Michelson.

Von einer Lichtquelle ausgesendetes Licht wird mit Hilfe eines Strahlteilers im und gegen den Uhrzeigersinn durch eine optische Spiegelanordnung gelenkt, so daß der zurückgelegte Weg ein Rechteck der Fläche A ergibt. Überlagert man die beiden Strahlen, nachdem sie das Rechteck durchlaufen haben, so können Interferenzerscheinungen beobachtet werden. Wird die Anordnung mit einer Winkelgeschwindigkeit ω gedreht, so ergeben sich Änderungen der optischen Weglängen

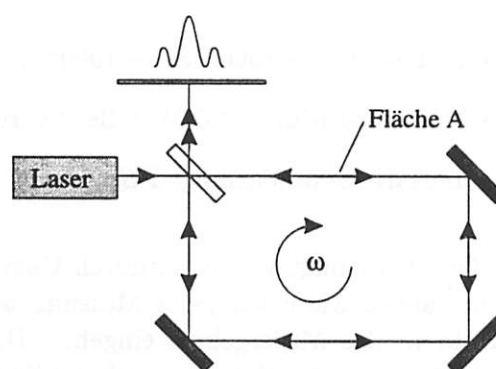


Abbildung 6: Passives Ringinterferometer

Wird die Anordnung mit einer Winkelgeschwindigkeit ω gedreht, so ergeben sich Änderungen der optischen Weglängen

der beiden Umlaufrichtungen gemäß des Sagnaceffektes, die eine gegenläufige Phasenverschiebung der beiden Strahlumlaufrichtungen bewirken. Diese Phasenverschiebung kann als Intensitätsänderung gemessen werden und gibt Informationen über die Drehrate wieder.

Vorteil dieser Anordnung ist der Verzicht auf einen resonanten Aufbau, die technische Realisierung wird dadurch stark vereinfacht. Nachteilig wirkt sich die relativ große benötigte optische Weglänge aus, um einen meßbaren Effekt zu erzielen.

5 Realisierung eines optischen Gyroskops

Am Institut für Mikrotechnik wurde ein Ringinterferometer in Fasertechnologie, ein passiver Faserkreislauf aufgebaut. Auf die Verwendung konventioneller optischer Bauteile konnte dabei vollständig verzichtet werden. Der Vorteil dieses Konzeptes ist der sehr einfache optische Aufbau. Es entfallen beispielsweise die sonst in der Optik häufig aufwendigen Justieraufgaben.

Lichtquelle des am IMT entwickelten Faserkreises ist eine ELED (Edge emitting LED) mit einer Kohärenzlänge von einigen μm . Das Licht wird aus der Faser 1 über einen 3x3-Koppler über die Ausgänge 5 und 6 in eine Faserspule eingekoppelt. Nach Durchlaufen der Spule in beide Umlaufrichtungen wird der Lichtstrahl aus den Enden 5 und 6 durch Überkopplung in 2 und 3 zur Interferenz gebracht, so daß die Phasendifferenzen infolge Drehung des Systems und Veränderung der optischen Weglängen mittels der PIN-Dioden detektiert werden können. Für die Phasenverschiebung ergibt sich (umschlossene Fläche einer Windung A , Windungszahl n):

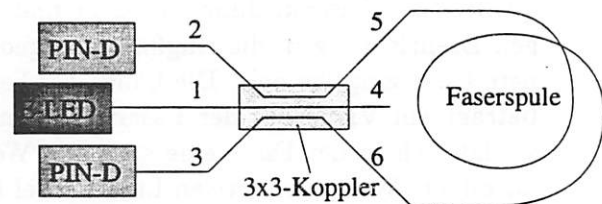


Abbildung 7: Passiver Faserkreislauf

Nach einer analogen und digitalen Meßdatenverarbeitung sind die wichtigsten Leistungsdaten:

$$\Delta\Phi = \frac{8\pi An}{\lambda c} \omega \quad (2)$$

Nach einer analogen und digitalen Meßdatenverarbeitung sind die wichtigsten Leistungsdaten:

- Meßbereich: $-1000^0/s \dots + 1000^0/s$
- Auflösung (durch AD-Wandler begrenzt): 12 bit
- Linearitätsabweichung: $FS : 0,5\%$, $-300^0/s \dots + 300^0/s : 0,05\%$

Der Offset, bedingt vor allem durch Unsymmetrien im Faserkoppler, wird vom Meßprogramm automatisch vor jeder Messung bestimmt und softwaremäßig eliminiert, so daß er nicht in das Meßergebnis eingeht. Die Langzeitoffsetdrift, vor allem auf Temperatureinflüsse zurückzuführen, wird zur Zeit verbessert. Sie ist für Kurzzeitversuche, wie Crashversuche sie darstellen, ohne Bedeutung. Für andere Anwendungen jedoch ist eine Optimierung in der Hinsicht unumgänglich.

Der 3x3-Koppler stellt mit 80 mm Baulänge das momentan größte Bauteil des Gyroskops dar. Berücksichtigt man den notwendigen Faserauslauf mit minimal zulässiger Krümmung, so könnte ein dreidimensionaler Aufbau bei Lagerung aller Koppler in die Raumdiagonale als Würfel mit einer Kantenlänge von ca. 90 mm ausgeführt werden.

6 Ausblick

Eine weitergehende Miniaturisierung erscheint nur als integriert optischer Aufbau möglich. Es werden momentan Möglichkeiten evaluiert, die Baugruppen LED, PIN-Dioden, und Koppler auf einem Chip zu integrieren. Die Faser, deren Länge je nach Meßbereich einige Meter bis zu Kilometern betragen kann, ist sicher nicht sinnvoll zu integrieren, sondern wird diskret angekoppelt. Man erhält auf diese Weise ein

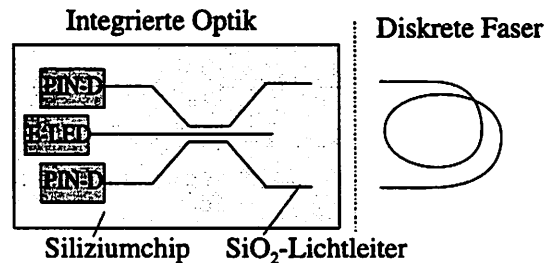


Abbildung 8: Integriert optisches Gyroskop

universell einsetzbares, hochgenaues Drehratenmeßinstrument, dessen Meßbereich ohne aufwendige konstruktive Änderung der speziellen Meßaufgabe angepaßt werden kann.

Für den Einsatz im Crash könnte man sich eine Hybridintegration eines Sensorsystems vorstellen, das aus einzelnen mikromechanischen und integriert-optischen Baugruppen besteht. Für die unterschiedlichen Anforderungen der Phasen 1 und 2 des Crashversuchs stehen zwei unabhängige Sensorsysteme zur Aufnahme der Beschleunigungen in die drei Koordinatenachsen zur Verfügung. Herzstück des integriert optischen 3-D Gyroskops ist eine zentrale LED, deren Strahlung mit einem 3x3-Koppler auf drei einzelne Gyroskope mit jeweils eigenen Detektoren geleitet wird. Mittels diskret anzukoppelnder Fasern, die in Richtung der Rotationsfreiheitsgrade ausgerichtet werden, können aufgrund des hohen Dynamikbereichs des Faserkreiselprinzips die Drehraten für beide Crashphasen bestimmt werden.

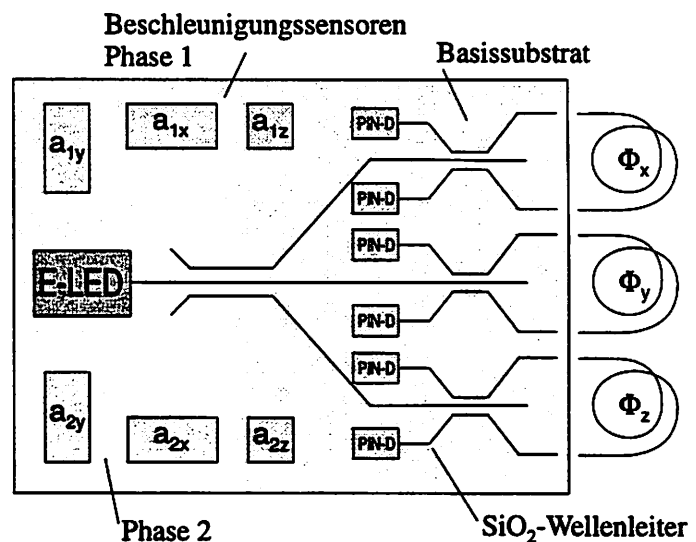


Abbildung 9: Inertiales Mikrosensorsystem

Wesentlicher Vorteil dieses Aufbaus ist, daß abgesehen von den externen Fasern eine signifikante Ausdehnung des Meßsystems nur in zwei Dimensionen besteht. Gegenüber einem feinwerktechnischen Aufbau ist also mit Methoden der Mikromechanik eine wesentliche Miniaturisierung des Meßsystems zu erreichen.

Literatur

- [1] S. EZEKIEL, H. ARDITTY: *Fiber-Optic Rotation Sensors*. Springer-Verlag, Berlin, 1982
- [2] W. GÖPEL, J. HESSE, J. ZEMEL: *Sensors, a Comprehensive Survey, Vol. 7*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1994
- [3] J. GARDNER: *Microsensors*. John Wiley and Sons, Chichester, 1994
- [4] P. GREIFF, B. BOXENHORN, T. KING, L. NILES: *Silicon Monolithic Micromechanical Gyroscope*. Transducers '91, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, 1991, 966-968
- [5] M. HASHIMOTO, C. CABUZ, K. MINAMI, M. ESASHI: *Silicon Resonant Angular Rate Sensor using Electromagnetic Excitation and Capacitive Detection*. J. Micro-mech. Microeng. 5 (1995) 219-225
- [6] C. JACOBS: *Ein Beitrag zum Einsatz von Halbleiterbildaufnehmern in Hochgeschwindigkeitskameras*. Dissertation, Braunschweig, 1990
- [7] G. TROMMER: *Passive Fiber Optic Gyroscope*. Appl. Opt., 29 (1990) pp. 5360
- [8] *Inertial Angular Rate Sensors*. Pewatron Firmenschrift