

2 Geodätische Messgeräte

Moderne geodätische Geräte sind feinmechanische, optische und elektronische Meisterwerke. An solche Instrumente werden hinsichtlich des Aufbaus besondere Bedingungen und Anforderungen gestellt. Abweichungen davon sind entweder zu justieren oder zu kalibrieren bzw. durch die gewählte Messanordnung zu eliminieren.

Definition 2.1: Justieren bedeutet eine solche Einstellung des Messgerätes, dass die Messabweichungen möglichst klein werden oder dass die Beträge der Messabweichungen die Fehlergrenzen nicht überschreiten.

Im Unterschied zu dem Justieren erfolgt beim Kalibrieren kein technischer Eingriff am Gerät, stattdessen werden Korrekturwerte ermittelt und angebracht. In der Regel werden dabei die Messabweichungen zwischen den durch das Messgerät angezeigten und den als richtig geltenden Werten festgestellt.

Definition 2.2: Kalibrieren bedeutet eine Feststellung des mathematischen Zusammenhanges zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße des Messgerätes.

Je nach der erforderlichen Genauigkeit macht man von einer oder mehreren dieser Möglichkeiten Gebrauch. Die modernen Instrumente werden meist mit solcher Präzision hergestellt, dass sie nur selten justiert werden können. In bestimmten Fällen können aber die Abweichungen zu den richtigen Werten durch geeignete Messanordnungen eliminiert werden. Daher sind die Messabläufe im geodätischen Bereich sehr standardisiert.

2.1 Bestandteile geodätischer Messinstrumente

2.1.1 Messfernrohr

Ein Fernrohr ist ein optisches Instrument, mit dessen Hilfe weit entfernte Objekte genauer und mit mehr Einzelheiten erkannt werden können als mit bloßem Auge. Es besteht in seiner einfachsten Form (Abbildung 2.1) aus zwei zentrierten Sammellinsen, einer *Objektivlinse* mit großer Brennweite und einer *Okularlinse* mit kleiner Brennweite. Damit lassen sich entfernte Gegenstände optisch vergrößert betrachten. Das Objektiv liefert ein umgekehrtes und verkleinertes Bild, das durch das Okular betrachtet werden kann. Die Verbindungslinie der Krümmungsmittelpunkte von zwei Linsenflächen realisiert die optische Achse der Linse. Bei mehreren Linsen muss das Gesamtsystem so justiert sein, dass die optischen Achsen aller Linsen auf einer Geraden liegen.

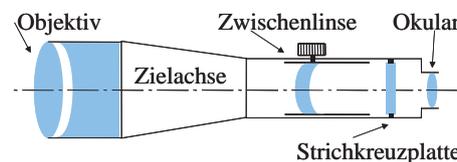


Abbildung 2.1: Aufbau des Messfernrohrs

Definition 2.3: Ein Messfernrohr ist eine optische Zielvorrichtung, die im Wesentlichen aus Objektiv, Fokussierlinse mit Fokussiertrieb, Strichplatte und einstellbarem Okular besteht.

Damit ein Fernrohr als Messfernrohr verwendet werden kann, muss ein *Strichkreuz* auf einer Glasplatte in der vorderen Brennebene des Okulars angebracht sein. Zum Scharfstellen des Kreuzes lässt sich das Okular entlang der optischen Achse verschieben. Weiterhin kann das Strichkreuz durch Justierschrauben horizontal und vertikal verstellt werden. Der optische Mittelpunkt des Objektivs und die Mitte der Strichplatte bestimmen die Zielachse des Fernrohrs, die im Allgemeinen nicht mit der optischen Achse des Fernrohres übereinstimmt.

Definition 2.4: Die Zielachse eines Fernrohrs ist eine Verbindungsgerade eines unendlich fernen, mit dem Strichkreuz eingestellten Punktes mit dem Brennpunkt des Objektivs.

Im Strahlengang können weitere optische Komponenten wie Blenden und Linsen angebracht sein. So dient z. B. eine Zerstreuungslinse zwischen Objektiv und Okular als Zwischenlinse, welche verschoben werden kann. Damit lässt sich ein zu betrachtender Gegenstand scharf einstellen bzw. *fokussieren*. Durch weitere Linsen bzw. Umkehrprismen erhält man ein aufrechtes Bild des Gegenstandes.

2.1.2 Libelle

Um geodätische Lage- und Höhenmessungen auf die Bezugsflächen gemäß Kapitel 1.1.3 beziehen zu können, müssen die Achsen der Geräte in die Lotrichtung gebracht resp. horizontalisiert werden. Hierfür bedient man sich sog. Libellen (Abbildung 2.2).

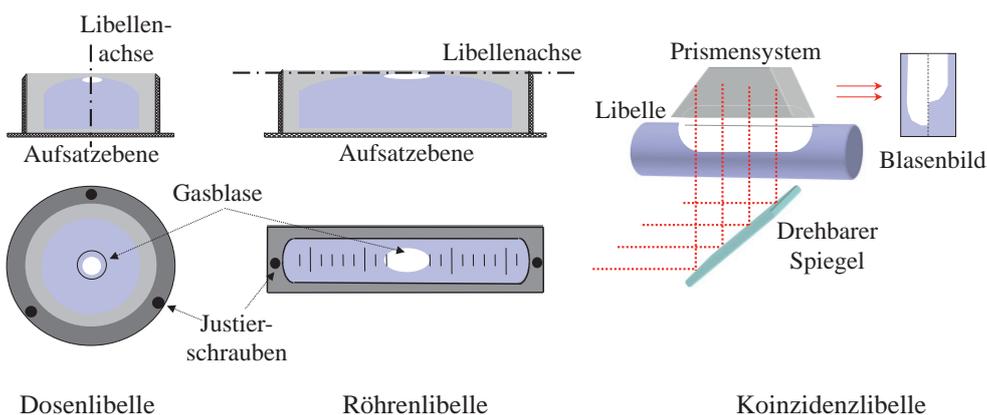


Abbildung 2.2: Aufbau der geodätischen Libellen

Definition 2.5: Eine Libelle ist ein geschlossener, hohler Glaskörper, der so geschliffen und mit Flüssigkeit gefüllt wird, dass eine Gasblase entsteht, die zur Anzeige benutzt wird. Die Libelle dient zum Horizontieren und Lotrechtstellen von Instrumenten bzw. Instrumententeilen.

Der *Schliffradius* bestimmt die Empfindlichkeit der Libelle und somit die Präzision, mit der eine Achse ausgerichtet werden kann. Zur groben Horizontierung der geodätischen Geräte

werden Libellen mit kleineren internen Radien (Dosenlibellen) eingesetzt. Zur Feinhorizontierung müssen diese Radien aber sehr groß sein, was bei geodätischen Röhrenlibellen der Fall ist. Am höchsten Kreispunkt wird sich die eingeschlossene Luftblase einstellen. An der Außenwand der Libelle ist eine Teilung angebracht, deren Mittelpunkt den sog. *Normalpunkt* markiert. Im *Spielpunkt* der Libelle liegt die Tangente des Schliffkreisbogens parallel zur Aufsatzebene.

Eine Libelle ist dann richtig justiert, wenn ihr Spielpunkt mit dem Normalpunkt zusammenfällt. Das Zusammenfallen von Spielpunkt und Normalpunkt kann sehr einfach geprüft werden, da der Spielpunkt sich geometrisch als der Mittelwert zweier Blasenstellungen vor und nach dem Drehen der Libelle um 200 gon ergibt. Wenn die Libellenblase beim Drehen um 200 gon aus der Mittellage wandert, ist die Libelle dejustiert. Dieser Ausschlag wird dann zur einen Hälfte mit den Justierschrauben der Libelle und zur anderen Hälfte mit den Fußschrauben beseitigt. Zur Kontrolle der Justierung wird die Libelle erneut um 200 gon gedreht.

Die geodätischen Libellen tragen in der Regel eine zum Normalpunkt symmetrische, durchgehende Teilung. Unter der Angabe einer Libelle versteht man dabei ihre Neigungsänderung im Winkelmaß ($''$), die eine Verschiebung der Libellenblasenmitte um 2 mm (Standardteilung) bewirkt. Je kleiner dieser Wert ist, umso leichter reagiert die Libelle auf Neigungsänderungen. Der Grenzfehler der Einstellung ist mit etwa 10 % der Angabe anzunehmen.

Nivellier- und Höhenindexlibellen werden meist als *Koinzidenzlibellen* gebaut. Die Libelle wird dabei durch einen drehbaren Spiegel von unten beleuchtet. Über der Libelle ist ein Prismensystem angeordnet, das je eine Hälfte der Blasenenden nebeneinander spiegelt. Bei einspielender Blase koinzidieren die Enden. Wird die Libelle geneigt, so bewegen sie sich nach entgegengesetzten Seiten. Die Koinzidenzlibellen ermöglichen ein parallaxefreies Einstellen der Blase von einem passenden Beobachtungspunkt (z. B. Okular des Fernrohrs) aus und ermöglichen dabei wesentlich höhere Einstellgenauigkeit als die gewöhnlichen Libellen.

Für die Horizontierung geodätischer Geräte werden zunehmend *elektronische Libellen* verwendet. Das Prinzip solcher Sensoren besteht darin, den Weg oder die Kraft eines schwerkraftabhängigen Elements in eine elektrische Größe umzuwandeln. Dabei werden die Abweichungen der Stehachse des Instruments aus der Lotrichtung (ein- oder zweiachsig) gemessen und diese Werte dem Mikroprozessor zur Berechnung der daraus abgeleiteten Korrekturen übergeben.

Definition 2.6: Eine elektronische Libelle ist eine Vorrichtung, mit der die Neigung gegen die Horizontale oder Vertikale elektronisch abgegriffen und angezeigt wird.

Elektronische Libellen lassen sich in Flüssigkeits- und Pendelsysteme unterteilen. Die Röhre einer digitalen Flüssigkeitslibelle enthält z. B. eine leitende Flüssigkeit und die eingeschmolzenen Elektroden. Wandert die Blase aus ihrer Mitteleinstellung heraus, so wird die Symmetrie der Wechselstrombrücke gestört und am Ausgang entsteht analog zur Neigung eine Wechselstromspannung, die gemessen und digitalisiert werden kann.

Bei den Libellen mit einem Flüssigkeitshorizont (Abbildung 2.3) handelt es sich um Zwei-Komponenten-Neigungsmesser, mit denen Neigungen gleichzeitig in zwei zueinander senkrechten Richtungen bestimmt werden können. Der Lichtpunkt wandert über den Detektor,

wenn die Libelle unterschiedlich geneigt wird. Entsprechende Neigungen in den beiden Achsrichtungen werden als Spannungswerte erfasst und digitalisiert.

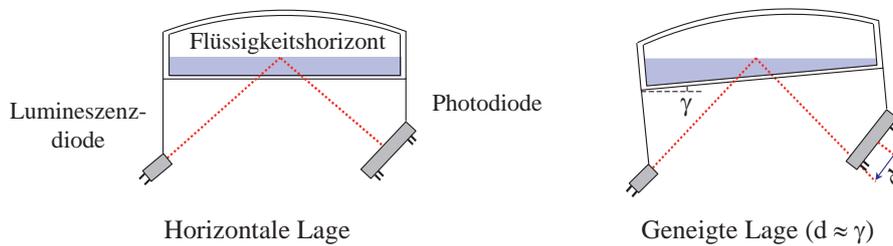


Abbildung 2.3: Libelle mit Flüssigkeitshorizont

2.1.3 Kompensator

Röhrenlibellen sind recht anfällig gegen einseitige Sonnenstrahlung und reagieren auch stark auf mechanische Störungen durch vorbeifliegende Fahrzeuge usw. Schließlich müssen die Libellen vor jeder Ablesung sorgfältig eingespielt werden, was Zeit kostet und leider manchmal vergessen wird. Aus allen diesen Gründen brachten die Hersteller in steigendem Umfang Instrumente heraus, bei denen die Feinhorizontierung durch Einbau verschiedener optisch-mechanischer Elemente automatisch erfolgte. Im Gegensatz zur Libelle erledigt ein Neigungskompensator die Horizontierung selbstständig (automatisch) unter dem Einfluss der Schwerkraft (Abbildung 2.4).

Definition 2.7: Ein Kompensator ist eine optisch-mechanische Einrichtung, die einen Zielstrahl so ablenkt, dass seine kleinen Abweichungen aus der Horizontalen automatisch ausgeglichen werden.

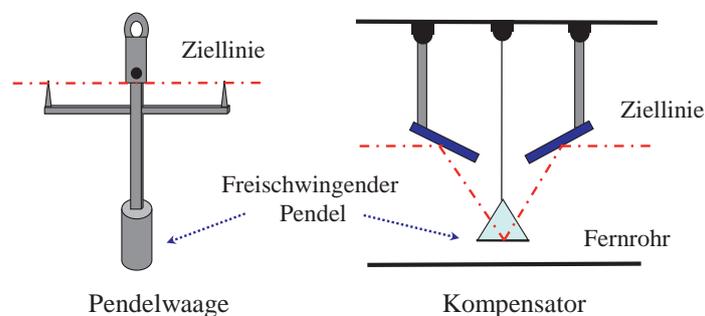


Abbildung 2.4: Prinzip des Kompensators

Ganz allgemein bedarf es zur automatischen Kompensation einer kleinen Fernrohrneigung (bis etwa $\pm 0,5^\circ$) eines unter dem Einfluss der Schwerkraft stehenden beweglichen Gliedes

und einer Dämpfungseinrichtung. Der eigentliche Kompensator besteht aus mehreren beweglichen und festen optischen und mechanischen Bauteilen wie Spiegeln, Prismen oder Linsen. Die beweglichen Teile hängen normalerweise an sehr dünnen Drähten, sodass sie sich bei einer Neigung des Instruments unter dem Einfluss der Schwerkraft wieder in die Waagrechte einpendeln können.

2.1.4 Gaslaser und Lumineszenzdioden

Lichtquellen wandeln zugeführte Energie zum Teil in Strahlungsenergie um. In vermessungstechnischen Geräten werden meistens sog. Lumineszenzstrahlen verwendet. Unter der Bezeichnung *Lumineszenz* fasst man alle Fälle von Lichtemission zusammen, die ihre Ursache nicht bzw. nicht allein in der Temperatur der Stoffe haben.

Definition 2.8: Laser ist ein Gerät zur Verstärkung von Licht einer bestimmten Wellenlänge bzw. zur Erzeugung eines scharf gebündelten kohärenten Lichtstrahls.

Unter dem Kunstwort LASER (Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation) versteht man den Prozess der Lichtverstärkung durch angeregte Aussendung von Strahlung. Zur Erzeugung der Laserstrahlung dient ein durch Rückkopplung zu Eigenschwingungen angeregter Laser-Oszillator. In einem *Helium-Neon-Laser (He-Ne-Laser)* bewirkt die Hauptfrequenzentladung eine Wechselwirkung zwischen den Atomen des Heliums und des Neons. Es entstehen Strahlungen, die durch die Spiegel auf Quarzplättchen reflektiert werden und eine Resonanz erzeugen. Durch den zum Teil durchlässigen Spiegel tritt ein Teil des Lichtes als ein fast paralleles Strahlenbündel mit einer Wellenlänge von 623,8 nm (sichtbares Rot). Die Strahlenabmessung beträgt bei Laseraustritt je nach Instrumententyp 5 bis 15 mm und bei einer Entfernung von 300 m zwischen 7 und 30 mm.

Bei den *Lumineszenzdioden* wird die Lichterzeugung durch den inneren Photoeffekt in einem Halbleitermaterial bewirkt. Die Wellenlänge der von Lumineszenzdioden abgegebenen Strahlung hängt vom verwendeten Halbleitermaterial ab. Die Lumineszenzdioden, die optische Strahlung im Bereich von 380 nm bis 780 nm abstrahlen, werden auch als LED (Light Emitting Diode) bezeichnet.

Definition 2.9: Die Lumineszenzdiode ist eine Halbleiterlichtquelle, die aus zwei Halbleiterschichten besteht, von denen eine Elektronenmangel und die andere Elektronenüberschuss aufweist.

In der Lumineszenzdiode (Abbildung 2.5) ist zwischen zwei Kontakten ein Halbleiter (Galliumarsenid) angeordnet. Wird eine Spannung angelegt, so wird die Energie in Form von Wärme und Lichtquanten ausgestrahlt. Liegen an der Diode unterschiedliche Spannungen an, werden unterschiedliche Strahlungsleistungen entstehen. In einem bestimmten Bereich weist diese Abhängigkeit einen linearen Charakter auf, sodass die sinusförmigen Spannungsschwankungen eine sinusförmige Amplitudenmodulation des Trägers erzeugen.

Eine besondere Bauart der Lumineszenzdioden stellen die *Halbleiterlaser* dar. Solche Laserdioden sind ähnlich aufgebaut wie die Lumineszenzdioden, sie haben aber eine wesentlich höhere Strahlungsleistung. Damit in einem Halbleiter ein Laserbetrieb zustande kommt, muss die äußere Form des Chips einen Resonator bilden, in welchem es zu einer optischen Verstärkung kommen kann. Wird der Laserdiode Strom zugeführt, so verhält sie sich bei

niedrigen Stromstärken wie eine LED. Erst wenn der Diodenstrom so weit erhöht wird, dass durch den Resonator die Verstärkung größer als die Absorption wird, kann Laserstrahlung austreten. Die Strahlendivergenz der Lumineszenzdiode ist an die tausendmal größer als z. B. die des He-Ne-Lasers.

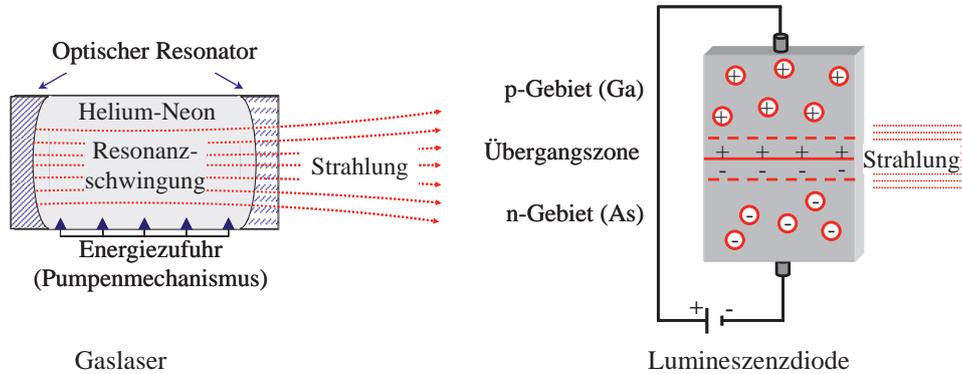


Abbildung 2.5: Wirkungsweise der Lumineszenzstrahler

2.1.5 Photodioden

Das wichtigste Element einer *Photodiode* ist ein lichtempfindlicher Halbleiter. Durch die Lichteinstrahlung werden in solch einem Halbleiter freie Ladungsträger erzeugt, wobei sich der Widerstand des Elementes ändert (Abbildung 2.6). Da die Ausgangsspannung parallel zum Widerstand des lichtempfindlichen Halbleiters steigt und fällt, kann die Spannungsdifferenz als Maß für die Lichtintensität dienen. Die Photodioden weisen ein ziemlich kleines

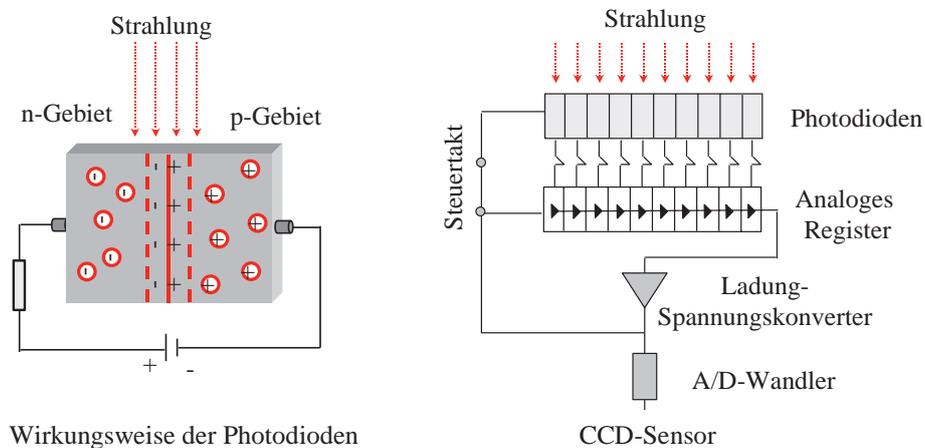


Abbildung 2.6: Prinzip eines CCD-Sensors

Ausgangssignal, das für die spätere Auswertung erheblich verstärkt werden muss, und eine vom Herstellungsmaterial abhängige, spektrale Empfindlichkeit auf.

Definition 2.10: Die Photodiode ist eine Halbleiterdiode, die unter Belichtung ihre elektrischen Eigenschaften stark ändert und zu Lichtmesszwecken Verwendung findet.

In vermessungstechnischen Geräten werden Photodioden besonders oft in Form der sog. *CCD-Sensoren* verwendet. Diese Bezeichnung stellt ein Akronym von Charge Coupled Devices (Ladungsgekoppelte Systeme) dar. Für eine Auswertung der Signale von den Photodioden werden dabei die während der Belichtungszeit gesammelten Photoelektronen an das analoge Schieberegister und den Ausgangsverstärker geleitet. Dort werden diese sog. Ladungspakete der einzelnen Photosensoren in analoge Spannungen umgewandelt, die am Ausgang des Sensors zur Verfügung stehen. Für die digitale Verarbeitung ist es erforderlich, das analoge Ausgangssignal des Sensors in ein Zahlenfeld zu überführen, was in einem *Analog/Digital-Wandler* (A/D-Wandler, Kapitel 2.1.7) geschieht.

Die CCD-Sensoren können eine Vielzahl von Aufgaben in der Vermessungstechnik lösen, z. B. das Auge des Beobachters ersetzen. Damit lässt sich folglich ein automatischer Datenfluss von der Gewinnung der Messinformationen über die gewünschten Berechnungen bis zum Endergebnis realisieren. CCD-Bildsensoren bestehen in der Regel aus einer Zeile oder einer Matrix (Zeilen- und Flächensensoren) mit lichtempfindlichen Photodioden, die Pixel genannt werden (Kurzform von „picture element“). Digitale Zeilen- und Flächensensoren sind die Basiskomponenten heutiger Kameratechnologien sowohl im privaten Gebrauch wie auch in der Bildvermessung (Kapitel 2.6.5 und 5.2). Mittelformatige Kameras finden Einsatz in der terrestrischen oder Industriephotoграмmetrie, während großformatige Kameras in der Luftbildphotoграмmetrie verwendet werden. Kamerasysteme für den Luftbildfall besitzen quadratische Pixel mit Kantenlängen von 2 μm bis 20 μm . Full-Frame CCD-Sensoren dieser Art besitzen heute Chips mit ca. 9 000 \times 9 000 Pixel. Zeilensensoren hingegen sind in der Luftbild- und Satellitenfernerkundung im Gebrauch mit bis 12 000 Pixel/Zeile.

Je größer die Fläche der Pixel, desto höher ist die Lichtempfindlichkeit des CCD-Sensors, desto kleiner ist aber, bei gleicher Sensorgröße, die Bildauflösung. Aufgrund des technischen Fortschritts sind die CCD-Elemente in den letzten Jahren immer kleiner geworden, was bei gleicher Sensorgröße zu immer mehr Pixeln geführt hat. Mit panchromatischen CCD-Sensoren, in Kombination mit vorgeschalteten Spektralfiltern, können einzelne definierte Spektralbereiche abgetastet werden. Mit mehreren CCD-Sensoren (Zeilen) in einem Kamerasystem können sowohl Farbe als auch Farbinfrarot (CIR) in einem Überflug aufgenommen werden. Bei einem Farb-CCD-Chip werden die Pixel des CCD-Chips abwechselnd mit Farbfiltern versehen. Bei den meisten Digitalkameras erhalten je zwei von vier Pixeln winzige Grünfilter, die anderen rote und blaue. Für jedes Pixel wird jedoch nur ein Grauwert gemessen. Um anschließend Farbwerte für jedes Pixel zu erhalten, werden die fehlenden Farbwerte aus der Nachbarschaft interpoliert.

2.1.6 MEMS-Sensoren

Unter einem Sensor wird allgemein eine Komponente verstanden, die Messgrößen unterschiedlicher Art in eine elektrische Messgröße umwandelt. Sensoren sind die wichtigsten Bestandteile der Messtechnik und speziell der geodätischen Messeinrichtungen. Da in der

Messtechnik oftmals bereits eine geringe Absenkung der Produktionskosten oder der geometrischen Abmessungen zu einem entscheidenden Wettbewerbsvorteil führen kann, werden hier zunehmend die sog. MEMS-Sensoren angesetzt.

Die Technologie der sog. mikroelektronisch-mechanischen Systeme (engl. *Micro-Electro-Mechanical-System, MEMS*) hat für unterschiedliche technische Bereiche in den letzten Jahren rasant an Bedeutung gewonnen. Wie der Name schon nahelegt, handelt es sich dabei um miniaturisierte Systeme mit den Abmessungen von einigen Mikrometer bis zu Bruchteilen von Millimeter mit sowohl elektronischen als auch mechanischen Komponenten. Gängige Sensoren dieser Art sind beispielsweise Beschleunigungssensoren, Drehratensensoren, Magnetfeldsensoren, Temperatursensoren, Drucksensoren usw.

Definition 2.11: MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ist eine amerikanische Bezeichnung für Mikrosystemtechnik. Mikrosystemtechnik ist ein Überbegriff für die gemeinsame Verwendung verschiedener Basistechnologien wie Mikroelektronik, Mikromechanik und Mikrooptik.

Die Funktionsweise von MEMS-Sensoren soll hier am Beispiel von Beschleunigungssensoren erläutert werden. Die Eigenschaften von MEMS-Beschleunigungssensoren basieren auf den besonderen Merkmalen von Silizium. Allgemein führt eine Beschleunigung bei solchen Sensoren zu einer Bewegung der winzigen Prüfmassa aus ihrer Ruheposition, was zu einem Ungleichgewicht in einer kapazitiven Halbbrücke (Abbildung 2.7) führt. Grundsätzlich können MEMS-Beschleunigungssensoren deswegen als kapazitive Sensoren bezeichnet werden. Ihr Aufbau sieht meistens drei gestapelte Platten vor, die über Federn miteinander verbunden sind. Die äußeren Platten sind dabei immer fixiert und die mittlere dagegen beweglich. Durch diese Anordnung entsteht eine Reihenschaltung von zwei Kondensatoren mit durch den Plattenabstand veränderlicher Kapazität.

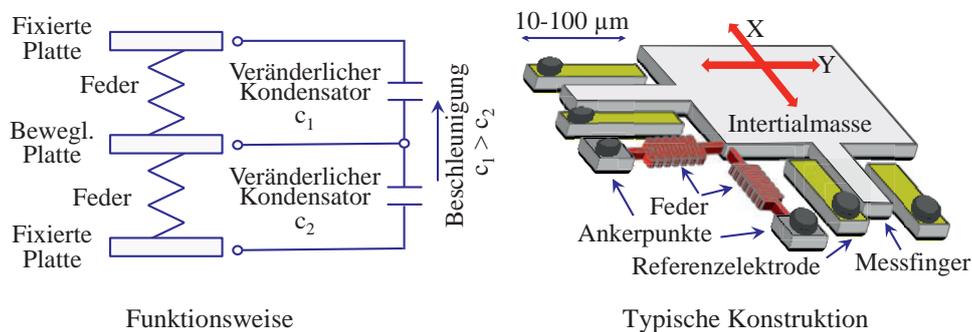


Abbildung 2.7: MEMS-Beschleunigungssensoren

Bei den typischen Konstruktionen von MEMS-Beschleunigungssensoren kommt es beim Auftreten einer Beschleunigung aufgrund der flexiblen Aufhängung der Inertialmasse zu einer Relativbewegung zwischen freihängenden Messfingern und den am Substrat befestigten Referenzelektroden. Diese Relativbewegung bewirkt eine Kapazitätsänderung (differenzial), die dann von der Auswerteelektronik in ein analoges Sensorsignal umgewandelt wird. Bei