



ITWissen



Das große Online-Lexikon
für Informationstechnologie

SENSOREN

KLAUS LIPINSKI (Hrsg.)

Inhalt

ALS, *ambient light sensor*

AMR, *anisotropic
magneto-resistive*

Anwesenheitssensor

Bildsensor

CCD, *charged coupled device*

CMOS-Sensor

Dehnungsmessstreifen

Drehzahlmessung

Feldplatte

Fotodiode

Fototransistor

Fotowiderstand

Funksensor

Geschwindigkeitsmessung

GMI, *giant
magnetic-inductance*

GMR, *giant magneto-resistive*

Hall-Effekt

Kalbleiter

Kapazitiver Sensor

Lorentzkraft

Magnetfeldsensor

NTC, *negative
temperature coefficient*

Oberflächenwellenfilter

Peltierelement

Photoeffekt

Piezo-Effekt

PLCD, *permanentmagnetic
linear contactless displacement*

PMD, *photonic mixer device*

Pt100-Sensor

RTD, *resistance
temperature detector*

Sensor

Sensorfusion

Thermistor

Thermoelement

TMR, *tunneling
magneto-resistive*

Transducer

Wegmessung

XMR, *X-magneto-resistive*

Impressum:

Herausgeber: Klaus Lipinski

Sensoren, V2

Copyright 2010

DATAKOM-Buchverlag GmbH

84378 Dietersburg

Alle Rechte vorbehalten.

Keine Haftung für die angegebenen
Informationen. Das E-Book ist
urheberrechtlich geschützt und darf nicht
auf fremden Websites ins Internet oder
in Intranets gestellt werden.

Produziert von Media-Schmid

www.media-schmid.de

ALS, ambient light sensor

HP-Notebook mit Ambient Light Sensor (ALS)



Unter dem Aspekt der Energieeinsparung und des Energiemanagements wurden diverse technische Verfahren entwickelt mit denen einzelne Computer-Komponenten in einen Energie-sparenden Modus geschaltet oder ganz abgeschaltet werden. ACPI ist ein solches Konzept für das Power Management in Personal Computern. Es hat neben diversen Sparmodi auch eine Funktion mit der die Helligkeit von Displays an das Umgebungslicht angepasst wird. Das Konzept arbeitet mit einem Ambient Light Sensor (ALS), was nicht anderes ist als ein helligkeitssensitiver Sensor, ein

Fotowiderstand oder eine *Fotodiode*.

Displays gehören zu den Komponenten, die am meisten Energie verbrauchen. Deswegen passt das ALS-Konzept die eingestellte Helligkeit und Farbtemperatur von Displays an die Umgebungshelligkeit an. Ist das Display einer größeren Beleuchtungsstärke ausgesetzt, muss die Display-Helligkeit größer sein, in dunkleren Räumen hingegen kann die Helligkeit reduziert werden, will man den gleichen Helligkeitseindruck haben. Das in ACPI benutzte ALS-Konzept berücksichtigt nicht nur die Helligkeit sondern auch die Farbtemperatur und hat eine Referenzkurve auf der verschiedene Umgebungsbeleuchtungen in Referenzpunkten eingestellt werden können: Tageslicht, Bürobeleuchtung, Konferenzraum-Beleuchtung.

AMR, anisotropic magneto-resistive

Es gibt verschiedene Verfahren mit denen der Widerstandswert von leitenden Materialien unter Einfluss eines Magnetfeld beeinflusst werden kann. Diese Effekte, die unter dem Oberbegriff *X-Magneto-Resistive* (XMR) zusammengefasst sind, werden in *Magnetfeldsensoren* umgesetzt.

Anisotropic Magneto-Resistive (AMR) nutzt den Effekt, dass sich der Widerstandswert von magnetisch hochpermeablen Metalllegierungen durch die Richtung des Magnetfeldes ändert. Diese Legierungen wie Permalloy oder Mu-Metall haben eine Materialstruktur bei der der elektrische Widerstand richtungsgebunden, also anisotrop ist. Wird die mäanderförmig angeordnete Legierung mit einem Magnetfeld durchsetzt, ändert sich dessen Widerstandswert abhängig vom Winkel zwischen der Magnetisierung und dem Richtungsvektor des Widerstands. Wird das Material in der magnetischen Sättigung betrieben, ist die Widerstandsänderung allein abhängig von der Ausrichtung der Materialstruktur in Relation zum Magnetisierungswinkel. Der Widerstandswert ändert sich mit dem Quadrat der Magnetfeldstärke. Ein auf dem AMR-Effekt basierender Magnetfeldsensor eignet sich somit ideal für Winkeländerungen.

Neben dem AMR-Effekt gibt es andere magneto-resistive Effekte, die in Festplatten eingesetzt werden. Als Beispiel ist der *GMR-Sensor* zu nennen, dessen Effekt auf dem magnetischen Fluss basiert.

Anwesenheitssensor *occupancy sensor*

Die Konzepte der Gebäudeautomatisierung berücksichtigen für die Alarmauslösung und die Automatisierung Bewegungs- und Anwesenheitssensoren. Nicht zuletzt leisten sie einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung.

Der Anwesenheitssensor stellt fest, ob sich jemand in einem Raum oder im Umkreis eines Objektes befindet. Ein solcher *Sensor* muss sich bewegende und sich nicht bewegende Personen erkennen können. Entsprechend sind auch die technischen Ansätze: Infrarot und Ultraschall.

Während die Infrarot-Sensoren anhand der Infrarotstrahlung feststellen, ob sich eine Person in einem Raum aufhält, arbeiten die Ultraschall-Sensoren nach einem Vergleichsverfahren. Sie vergleichen das aktuelle mit dem charakteristischen Raumecho. Neben der klassischen Messgröße, die aussagt, ob sich jemand im Raum befindet, wird bei diesem Ansatz eine integrale Größe für die Bewegungsaktivität berechnet.

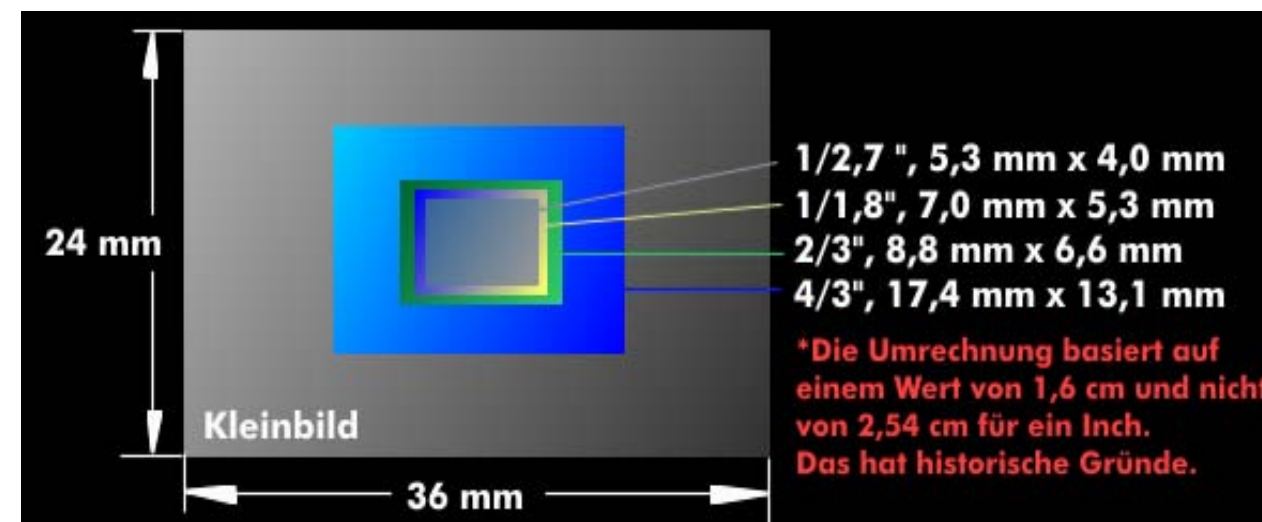
Bei den Infrarotsystemen gibt es Entwicklungen, die mit Sensor-Arrays arbeiten und feststellen können, ob eine Person sitzt, steht oder liegt. Bei dieser Technik werden störende Einflüsse von den Heizkörpern ebenso eliminiert, wie der Tag-Nacht-Einfluss. Entsprechende Systeme arbeiten mit Bilddatenerfassung und benutzen die gewonnenen Daten zur Steuerung von Beleuchtung und Heizung.

Bildsensor *picture sensor*

Bildsensoren sind lichtempfindliche *Sensoren*, die Helligkeit in Spannung umsetzen. Sie bilden die zentrale elektronische Komponente von Digitalkameras und Camcorder und treten an Stelle des Negativfilms in Analogkameras. Bildsensoren sind flächenmäßige Sensoren, die aus vielen kleinsten lichtempfindlichen Fotozellen bestehen, die matrixmäßig in Reihen und Spalten angeordnet sind. Aufnahmeelemente können *Fotodioden* oder *Fototransistoren* sein, die mittels *Photoeffekt* das auf sie fallende Licht in Spannung umsetzen.

Bildsensoren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Technologie, ihrer Größe und der Pixelzahl. Die am häufigsten benutzten Basis-Technologien sind *Charged Coupled Device* (CCD) und *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) für *CMOS-Sensoren*. Von diesen Technologien gibt es einige Weiterentwicklungen, die sich durch verbesserte Kennwerte auszeichnen, so den Foveon-X3-Sensor, den *Contact Image Sensor* (CIS), den *Digital Pixel Sensor* (DPS), die *Intensified Charge Coupled Device* (ICCD) oder die *Super Charge Coupled Device* (SCCD).

Größe der verschiedenen
Bildsensortypen



In Zusammenhang mit der Sensor- resp. Chipgröße sind die Fotozellengröße und die Fotozellenzahl, zu sehen. Alle drei Kennwerte stehen in einer Beziehung zueinander und bestimmen die Bildauflösung, die Lichtempfindlichkeit, den Dynamikumfang und das Bildrauschen. Die eigentliche Sensorgröße bezieht sich ausschließlich auf den

*Kennwerte von
Bildsensoren*

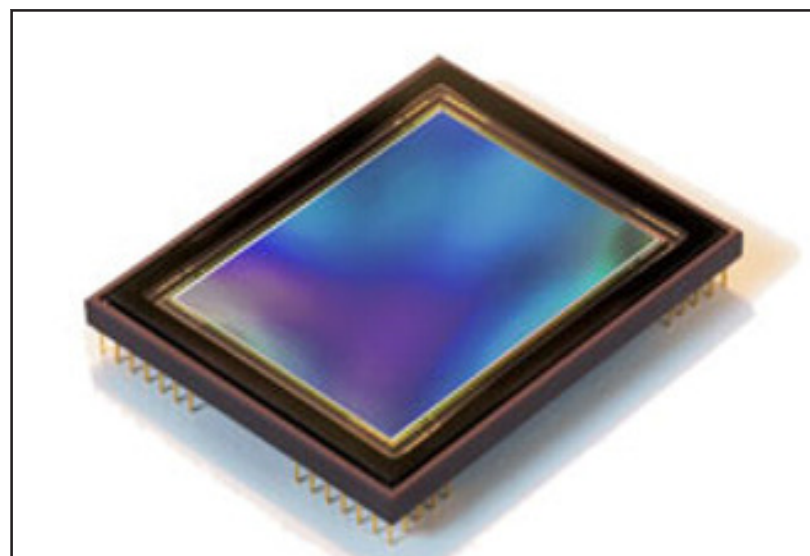


Sensorchip. Es gibt festgelegte Sensorgößen, die zwischen 4,5 x 3,0 mm und 48 x 36 mm liegen. Die kleineren Größen haben Zollangaben, so 1/3,2", 1,2,7", 1/2,5", 1/1,8" und 2/3". Betrachtet man die Millimeterangaben, dann wird man nicht auf die entsprechenden Werte kommen. So ist beispielsweise die Sensorgöße 2/3" 8,8 x 6,6 mm groß. Das hat historische Gründe, die in der nutzbaren Fläche der früheren Bildaufnahmeröhren liegen. Daher erfolgt die Umrechnung nicht auf Zoll-Basis, sondern auf einem abgeleiteten Erfahrungswert. Die größeren Sensorformate heißen u.a. FourThirds, APS-C und Kleinbildformat wie bei

klassischen Kleinbildkameras mit 36 x 24 mm. Dieses Format wird auch als Vollformat bezeichnet. Was die Pixelzahl betrifft, so ist diese abhängig von der Chipgröße und der Pixelgröße. Die Pixelzahl selbst, die ein Maß für die Bildauflösung ist, wird in Megapixel (MP) angegeben. Bei der Angabe handelt es sich um die tatsächliche Anzahl an Pixel, die die Kamera darstellen kann, nicht um die Anzahl an Fotozellen. Sie liegt bei Bildsensoren zwischen 0,3 MP und 10 MP, in professionellen Digitalkameras beträgt sie ein Vielfaches von 10 MP. Aus der Pixelzahl kann man über das Bildseitenverhältnis die Bildauflösung bestimmen. Bildsensoren haben Seitenverhältnisse von 4:3, aber auch von 3:2, 16:9 oder 1:1. Bei 1 Megapixel und einem Bildseitenverhältnis von 4:3 ergibt sich eine Bildauflösung von 1.152 Pixel in der Horizontalen und 864 in der Vertikalen, bei 10 MP sind es 3.650 x 2.750 Pixel. Was die Pixelgröße betrifft, so liegen diese in der Praxis zwischen 1,5 µm und ca. 30 µm. Je größer ein Pixel ist, desto mehr Licht kann es aufnehmen und desto größer ist seine Lichtempfindlichkeit. Andererseits verringert sich bei größeren Pixeln die Bildauflösung aber auch das Bildrauschen. Es geht also darum für Digitalkameras einen sinnvollen Kompromiss zwischen diesen drei Größen herzustellen. Da die eigentlichen Halbleitersensoren nur Helligkeitswerte nicht aber Farbtöne unterscheiden können, müssen die Helligkeitssignale, bevor sie auf die eigentlichen Halbleitersensoren treffen, mittels Farbfilter in die Primärfarben zerlegt werden. Daher sind bei vielen Konsumer-Kameras unmittelbar auf den Halbleitersensoren sogenannte Bayer-Filter integriert. Andere Techniken wie der Foveon-X3-Sensor nutzen ein mehrschichtiges Filterkonzept.

CCD, charged coupled device *CCD-Sensor*

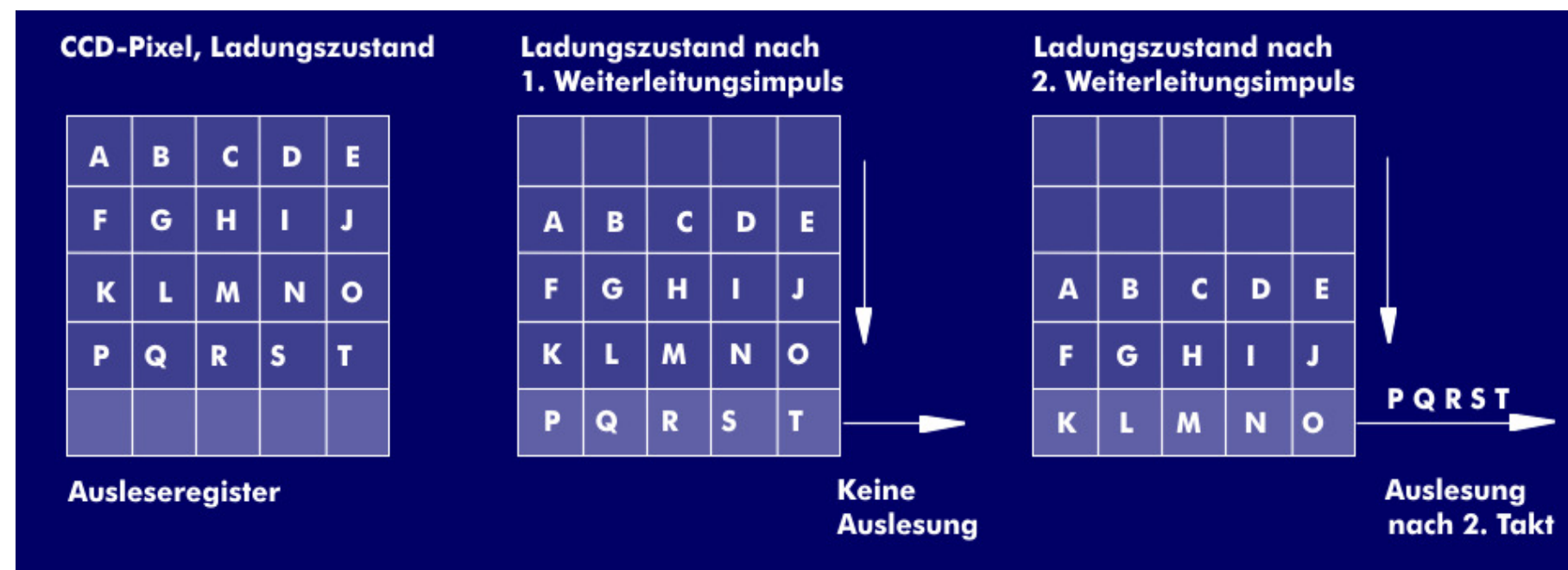
Charge Coupled Devices (CCD) sind Halbleiter-Arrays, die Lichtsignale in elektrische Signale wandeln. CCD-Komponenten werden als *Bildsensoren* in Digitalkameras, digitalen Videokameras, Camcordern und anderen optischen Erfassungseinrichtungen wie Scannern und Röntgendetektoren eingesetzt. Ein CCD-Element ist ein Halbleiter-Array aus *Fotodioden*, kleinsten Kapazitäten, Feldeffekttransistoren, Steuerleitungen und Leitungspfaden. Wenn Licht auf die Fotozelle fällt, erzeugt sie eine Elektronenladung, die linear mit der Lichtmenge, also der Lichtintensität und der Belichtungsdauer, ansteigt. Die



CCD-Sensor mit 12 MPixel,
Foto: Dalsa.com

Elektronenladung wird als momentanes Ladungsbild in einem sogenannten Potentialtopf, einer Kleinstkapazität, zwischengespeichert. Wenn der Potentialtopf gefüllt ist, können Elektronen auch in die Potentialtöpfe der Nachbarpixel abfließen. Dieser störende Effekt heißt Blooming. Das gesamte Ladungsbild des CCD-Sensors entspricht somit der Lichtintensität an jedem einzelnen Pixel. Bevor aus den Ladungszuständen der Pixel das Spannungsbild für das projizierte Licht erzeugt wird, werden die Ladungszustände nach bestimmten Schemen von den Ladungssenken ausgelesen, nach außen geführt und dort aufbereitet.

Die Bezeichnung Charge Coupled Device, CCD, sagt aus, dass es sich um ein Bauelement mit Ladungskopplung handelt. Beim Auslesen der elektrischen Ladung aus den vielen Potentialtöpfen werden die Ladungen von einem zum nächsten Potentialtopf verschoben, jeweils ausgelöst durch einen Weiterleitungsimpuls. Dieses Verfahren wird auch als Kettenspeicher oder Eimerkettenschaltung bezeichnet. Die Ladung jeder einzelnen Kleinstkapazität wird also nacheinander zum Zeilenende transportiert und steht dort als Ladungsabbild für die Weiterverarbeitung zur Verfügung. Die Weiterleitung der Ladung erfolgt über Feldeffekttransistoren (FET), über die die Potentialtöpfe, die als Transfer-Register fungieren, miteinander verbunden sind. Während des Auslesens darf kein Licht auf den CCD-Sensor fallen, da sich dadurch die Ladungen auf den Transfer-Registern verändern würden. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Auslesevorgänge, die das Ladungsproblem unterschiedlich angehen: Den Full Frame Transfer CCD (FF-CCD), Frame Transfer CCD (FT-CCD), Interline Frame Transfer CCD (IT-CCD) und Frame Interline Transfer CCD (FIT-CCD). Generell werden beim Auslesevorgang die Ladungen



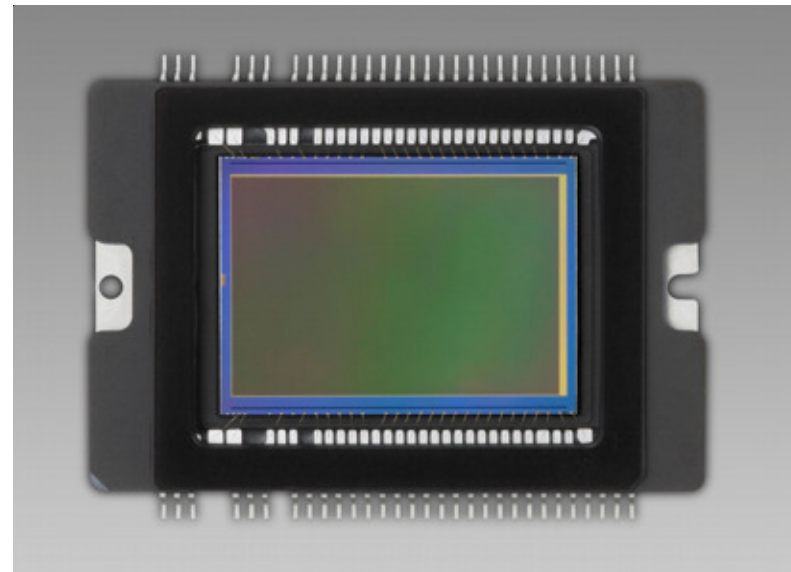
In CCD-Sensoren angewandtes
Eimerkettenprinzip

reihenweise von Pixel zu Pixel verschoben und am Reihenende seriell dem Ausleseverstärker zugeführt. Die CCD-Technik zeichnet sich durch eine enorme Lichtempfindlichkeit und hohe Auflösung aus, wodurch auch bei geringer Helligkeit Ladungsbilder erstellt werden können. Die Bildauflösung ist von einer dynamischen Entwicklung gekennzeichnet. So gibt es bereits Konsumer-Kameras mit 10 Megapixeln (MP) und mehr. Technisch wurden bereits CCD-Sensoren mit 100 Megapixeln entwickelt. Ein weiterer Aspekt ist der hohe Dynamikbereich, der im Bereich von 1:10.000 liegt, und damit über 10.000 Helligkeitsstufen repräsentiert. Das entspricht einer Quantisierung von $2^{\exp 13}$ und höher. Die Chipgrößen von CCD-Sensoren liegen zwischen wenigen Millimetern und dem von Kleinbildkameras her bekannten Kleinbildformat. Da CCD-Sensoren nur helligkeitsempfindlich sind, nicht aber farbempfindlich, müssen die Lichtsignale für die Farberfassung vor der Umwandlung über Farbfilter, einem Bayer-Filter oder einem Interferenzfilter, in die Primärfarben rot, grün und blau gefiltert werden. Beim Bayer-Filter ist jedem einzelnen CCD-Pixel ein eigenes Farbfilter vorgeschaltet. Da die Farbfilter die physikalische Auflösung des Bildsensors reduzieren, wird durch Interpolation der Helligkeitswerte der Nachbarpixel jedem Bildpunkt des Sensors ein eigener RGB-Wert zugewiesen. Eine Alternativtechnik für die Farbtrennung bietet der Foveon-X3-Sensor. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit und zur Verbesserung der Bildqualität von CCD-Sensoren gibt es verschiedene Entwicklungen, wie die wabenförmigen Pixel und die Drehung des CCD-Arrays um 45 Grad. In dem ClearVid-Sensor von Sony oder den EXR-Sensor von Fujifilm sind andere Pixelanordnungen realisiert, außerdem benutzt der EXR-Sensor das Bayer-Filter und kann im sogenannten Pixel-Binning zwei nebeneinander liegende Pixel zu einem zusammenfassen.

CMOS-Sensor *CMOS sensor*

Der CMOS-Sensor ist ein *Bildsensor*, der in Digitalkameras und Camcordern eingesetzt wird. Ebenso wie CCD-Sensoren sind CMOS-Sensoren lichtempfindliche Bauteile, die das auf sie fallende Licht in Spannungen umsetzen. Funktional unterscheiden sich beide elektronische Bauteile dadurch, dass bei CCD-Sensor das Ladungsbild schrittweise verschoben und dann ausgelesen wird, beim CMOS-Sensor hingegen erfolgt die Umwandlung durch Transistoren, die sich unmittelbar am Pixel befinden.

Was die spezifischen Daten wie die Lichtempfindlichkeit, die Pixelzahl, die Auslesegeschwindigkeit, die Chipgröße, das Bildrauschen oder den mit dem Bildrauschen in Zusammenhang stehenden Dynamikbereich betrifft, so wurden diese Werte im Laufe der Entwicklung wesentlich verbessert und sind qualitativ durchaus vergleichbar oder teilweise besser als die von CCD-Sensoren. CMOS-Sensoren können kompakter und preiswerter produziert werden. Die Auflösung von CMOS-Sensoren liegt bei bis zu zehn Megapixel (MP) und darüber. Da jeder Pixel direkt adressierbar ist, ist das Pixel-Binning einfacher und das Auslesen wesentlich flexibler und schneller. Es können sogar Teilbilder partiell ausgelesen werden. Außerdem ist die Leistungsaufnahme wesentlich geringer und das Blooming begrenzt. In die in CMOS-



*CMOS-Sensor mit 22 x 15 mm
Chipgröße, EOS1000D von Cannon*

Technologie gefertigten Bildsensoren können zudem weitere Funktionseinheiten wie Belichtungskontrolle und AD-Wandler integriert werden.

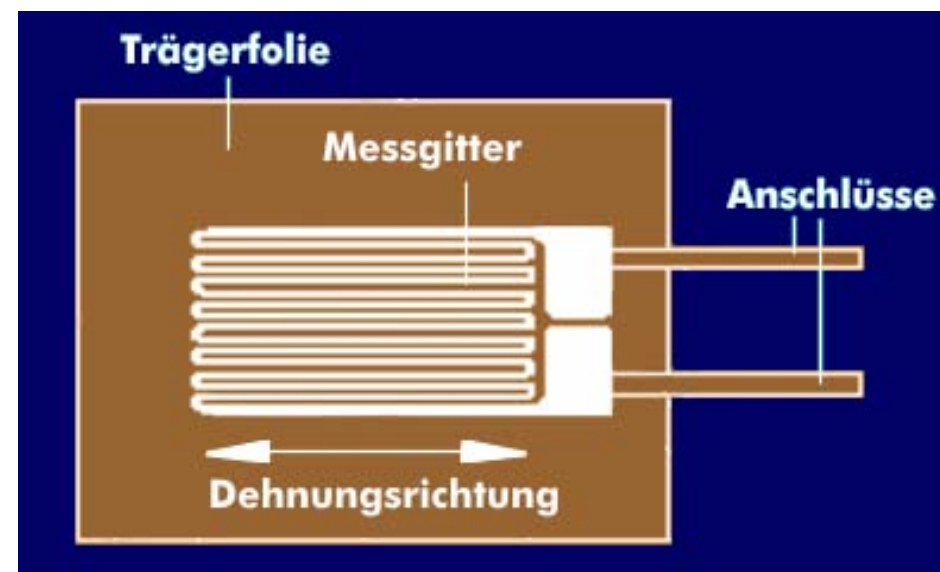
Vom Aufbau her besteht eine aktive CMOS-Zelle aus einer *Fotodiode*, einem kleinen Kondensator für die Ladungsaufnahme, einem Verstärkerelement und den Datenleitungen für das Auslesen und Rückstellen. Eine solche aktive Zelle wird als Active Pixel Sensor (APS) bezeichnet. Die Fotozelle erzeugt mittels *Photoeffekt* eine Spannung, die proportional der Lichtmenge ist, also der Lichtintensität und der Belichtungszeit. Die Ladespannung wird im Kondensator gespeichert und von dem nachgeschalteten MOSFET verstärkt. Ausgelesen wird die verstärkte Ladespannung durch einen Auslesepuls. Sie gelangt von dort als Analogspannung an den verarbeitenden Signalprozessor.

Wie andere Bildsensoren auch, kann der CMOS-Sensor nur hell und dunkel unterscheiden, nicht aber die Farben. Die Farberkennung kann nur über vorgeschaltete Farbfilter erfolgen, die das Licht in seine Primärfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) aufteilen. Über ein solches vorgeschaltetes Farbfilter wird jedem Pixel eines CMOS-Sensors nur Licht einer Primärfarbe zugeführt. Die dafür benutzten Farbfilter, die aus regelmäßig angeordneten roten, grünen und blauen Farbfiltern bestehen, können Bayer-Filter oder Interferenzfilter sein.

Bildsensoren haben vereinheitlichte Formate, die in Inch angegeben werden und die Sensordiagonale betreffen. Standardformate liegen zwischen 1/2,7" mit einer Diagonalen von 5,9 mm und 4/3" mit einer solchen von 21,3 mm. Neben den kleinformatigen Bildsensoren gibt es auch großformatige mit Größen bis hin zum Kleinbildformat mit 36 mm x 24 mm.

Dehnungsmessstreifen, DMS *strain gauge*

Ein Dehnungsmessstreifen (DMS) ist ein *Sensor*, dessen Widerstandswert sich mit der Ausdehnung ändert. Die Widerstandsänderung ist auf die minimale Veränderung der Leitungsstruktur im Falle der Dehnung zurückzuführen. Wird der Leiter in Längsrichtung gedehnt, wird die Leiterstruktur dünner und länger, was zu einem höheren Widerstand führt. Diese minimale Widerstandsänderung ist es, die als Messwert dient. Um die Empfindlichkeit von Dehnungsmessstreifen zu erhöhen sind sie mäanderförmig aufgebaut, wodurch der Leiter insgesamt länger wird.



*Aufbau eines
Dehnungsmessstreifens*

Dehnungsmessstreifen werden in Drucksensoren eingesetzt, sie sind aus Metall oder Halbmateriale, vorwiegend aus Silizium und Germanium, und haben einen relativ geringen Widerstand von einigen hundert Ohm, typische 100 Ohm bis 350 Ohm. Die Widerstandsänderung liegt bei etwa 0,1 bis 0,3 Ohm.

Die Halbleiter-Dehnungsmessstreifen haben gegenüber den metallischen eine vielfach höhere Empfindlichkeit, allerdings auch eine schlechtere Temperaturstabilität. Sie werden auf die zu überwachenden Teile geklebt und verändern mit der Ausdehnung ihren Widerstand. Zur Erfassung

der relativ geringen Widerstandsänderungen werden sie in Brückenschaltung wie der Wheatstone-Brücke geschaltet und die Spannungsdifferenzen in nachgeschalteten Differenzverstärkern verstärkt. Dehnungsmessstreifen können bei langsamen Vorgängen bis in den kHz-Bereich eingesetzt werden.

Drehzahlmessung *speed measurement*

Die Drehzahlmessung dient zur Feststellung der Umdrehungsfrequenz rotierender Körper. Zur Messung dienen mechanische, magnetische, photoelektrische und induktive Geber. Die Drehzahl "n" entspricht der Anzahl der Umdrehungen, z.B einer Welle, pro Zeiteinheit. Drehzahlangaben erfolgen in Hertz (Hz), Umdrehungen pro Minute (Upm) oder in der Winkelgeschwindigkeit Klein-Omega in 1/s.

Tachogeneratoren dienen zur Erfassung von Drehzahlen. Es handelt sich um Generatoren, die über Wellen vom rotierenden Teil angetrieben werden. Die hierbei erzeugte Generatorspannung ist der Drehzahl proportional. Tachogeneratoren werden zur Erfassung von Drehzahlen bis zu 3000 U/min eingesetzt. Die drehzahlabhängige Wechselspannung kann auch in eine pulsierende Gleichspannung umgeformt werden. Zur Auswertung der Generatorspannung werden entweder die Amplitude oder die Frequenz herangezogen. Tachogeneratoren liefern Ausgangsspannungen von 20 V bis 60 V. Vorteil ist, dass sie direkt ohne Verstärker angeschlossen werden können. Nachteilig ist, dass ein Anschluss nicht überall möglich ist, sie nicht berührungslos arbeiten, einem Verschleiß unterliegen und ein Drehmoment aufnehmen.

Digitale Drehzahlsensoren: Zur Messung der Drehzahl können am Umfang des Drehteiles eine oder mehrere Markierungen angebracht werden, die induktiv, optisch oder magnetisch abgetastet werden. Die Ermittlung der Drehzahl erfolgt über Auszählung der abgetasteten Impulse während eines konstanten Zeitintervalls.

Induktive Drehzahlgeber werden bei sehr großen und auch sehr kleinen Drehzahlen eingesetzt. Sie haben keine Rückwirkung auf das Messobjekt. Die mit einer Nut oder Erhebung versehene Welle dreht sich bei aktiven induktiven Drehzahlgebern im Feld eines Dauermagneten. Dabei ändert sich der magnetische Fluss in der Spule, so dass ein Spannungsimpuls induziert wird. Durch Zählen der Spannungsimpulse in einer festen Zeiteinheit wird die Drehzahl ermittelt.

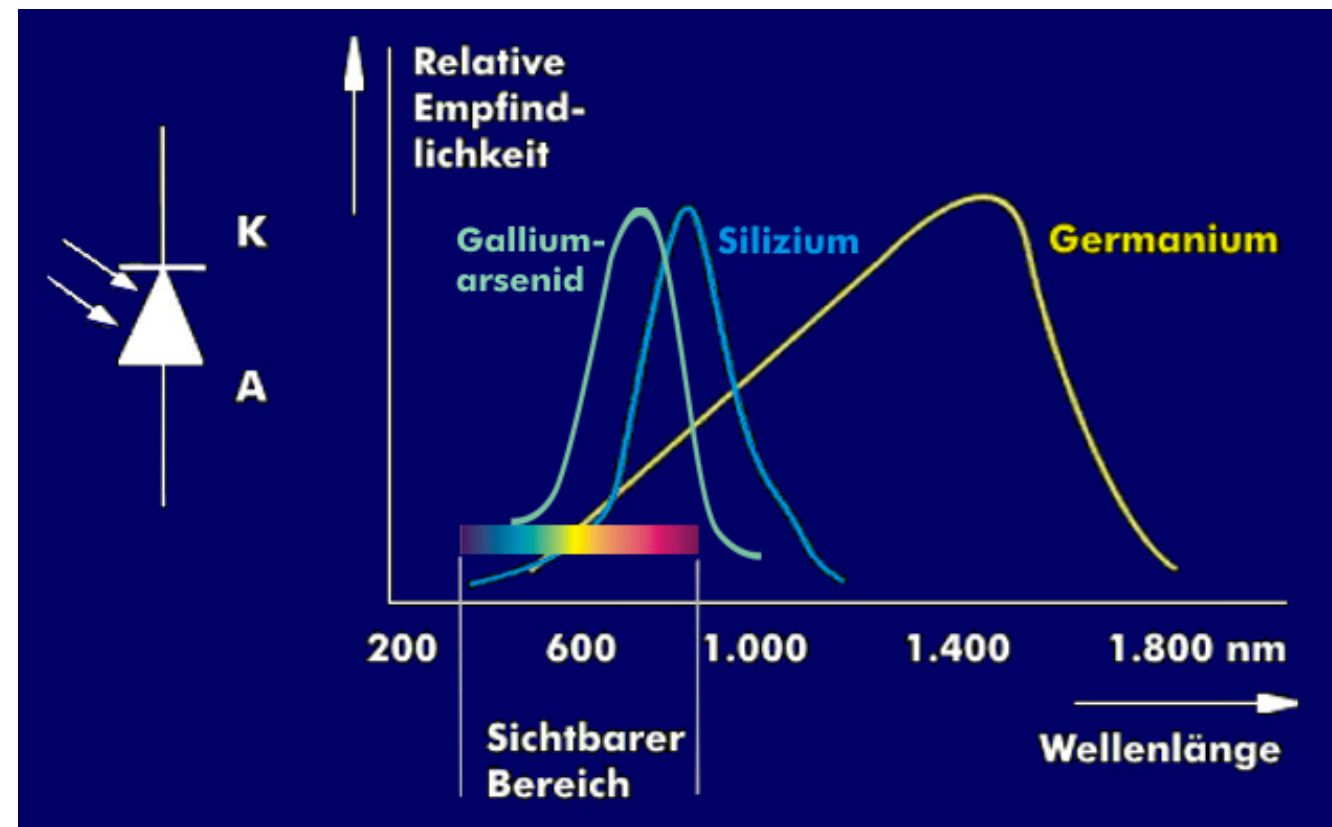
Feldplatte *MDR, magnetic dependent resistor*

Ein Magnetic Dependent Resistor (MDR) ist ein magnetosensitives Bauteil dessen Widerstandswert vom magnetischen Fluss abhängt, der ihn durchdringt. Der Effekt heißt Gauß-Effekt und tritt dann auf, wenn ein stromführender Leiter senkrecht in ein Magnetfeld eindringt. Dabei versucht das magnetische Feld die Ladungsträger von ihrer Bahn durch den Leiter abzulenken. Der Strompfad durch den Leiter verengt sich, was zur Folge hat, dass sich der leitende Querschnitt verringert und sich der elektrische Widerstand erhöht. Der Gauß-Effekt tritt bei allen Materialien in unterschiedlicher Stärke auf.

Daher kommen in MDRs, als Feldplatte bekannt, solche Materialien zum Einsatz, in denen der Gauß-Effekt besonders ausgeprägt ist. Indiumantimonid (InSb) mit Nickelantimonid (NiSb) sind solche Materialien, die als Halbleiter einen ausgeprägten Gauß-Effekt aufweisen. In der Indium-Schicht befindet sich als leitendes Material Nickelantimonid, das den Strom unter Einfluss eines magnetischen Feldes ablenkt und dadurch den Weg durch das Halbleitermaterial verlängert. Steigt die magnetische Flussdichte (B), erhöht sich somit der Widerstandswert.

Feldplatten können Widerstandswerte von wenigen Ohm bis hinzu einigen kilo-Ohm haben.

Fotodiode *photo diode*



Kennlinien von Fotodioden aus Silizium und Germanium

Fotodioden sind *Sensoren* die Licht in elektrische Energie umwandeln. Es handelt sich um Bauelemente der Optoelektronik, die als Germanium- oder Siliziumdioden in Sperrrichtung betrieben werden und auf dem Phototeffekt basieren. Zwischen den beiden dotierten Halbleiterschichten (P und N) befindet sich ein undotierter Bereich. Aus diesem werden bei Lichteinfall durch den lichtelektrischen Effekt freie

Elektronen aus der atomaren Struktur herausgerissen, deren Anzahl von der Lichtintensität abhängt. Der Sperrstrom ist abhängig von der Beleuchtungsstärke (Ix): Je höher die Beleuchtungsstärke, desto höher der Sperrstrom. Der Sperrstrom ist weitestgehend unabhängig von der angelegten Sperrspannung. Bei der Fotodiode unterscheidet man zwischen dem Sperrbetrieb, bei dem der Spannungsabfall am Arbeitswiderstand proportional der Beleuchtungsstärke ist, und dem Elementarbetrieb, der sich durch eine hohe Temperaturunabhängigkeit auszeichnet.

Im Gegensatz zum *Fotowiderstand* haben Fotodioden eine wesentlich geringere Trägheit und können Signale im Nano- und Mikrosekunden-Bereich schalten. Die Schaltgeschwindigkeit hängt von der Sperrspannung ab, je höher diese ist, desto kürzer werden die Schaltzeiten. Das hängt damit zusammen, dass bei Erhöhung der Sperrspannung die Kapazität der Sperrschicht geringer wird.

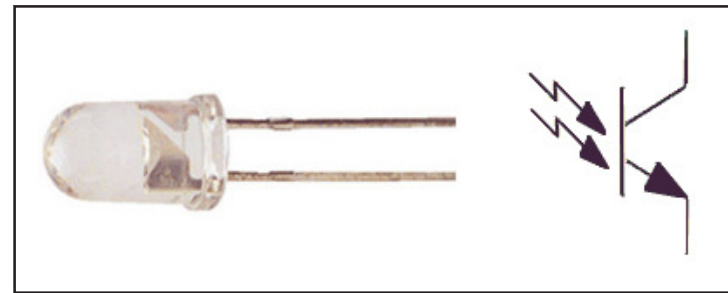
Die spektrale Empfindlichkeit von Fotodioden hängt vom verwendeten Halbleitermaterial ab. Bei Selen (Se) liegt die höchste spektrale Empfindlichkeit bei 500 nm bis 600 nm, bei Galliumarsenid (GaAs) bei 700 nm bis 800 nm, bei Silizium (Si) zwischen 800 nm bis 900 nm und bei Germanium bei etwa 1.400 nm, also bei Infrarot. Daher werden diese Bauelemente speziell in der Infrarottechnik eingesetzt.

Beispiele für Fotodioden sind die kostengünstigen PIN-Dioden und die empfindlichere APD-Dioden. Fotodioden finden ihren Einsatz in Lichtschranken, Fernbedienungen und in der Lichtmessung, sie werden in optischen Übertragungssystemen und in Solarzellen eingesetzt.

Fototransistor *photo transistor*

Die die *Fotodiode* basiert auch die Funktion des Fototransistors auf dem *Photoeffekt*. Dieser Effekt bewirkt, dass sich die Eigenschaften einer Halbleiterstrecke bei Lichteinfall durch den Aufprallen von Photonen

Fototransistor und Schaltzeichen, Foto: Kingbright

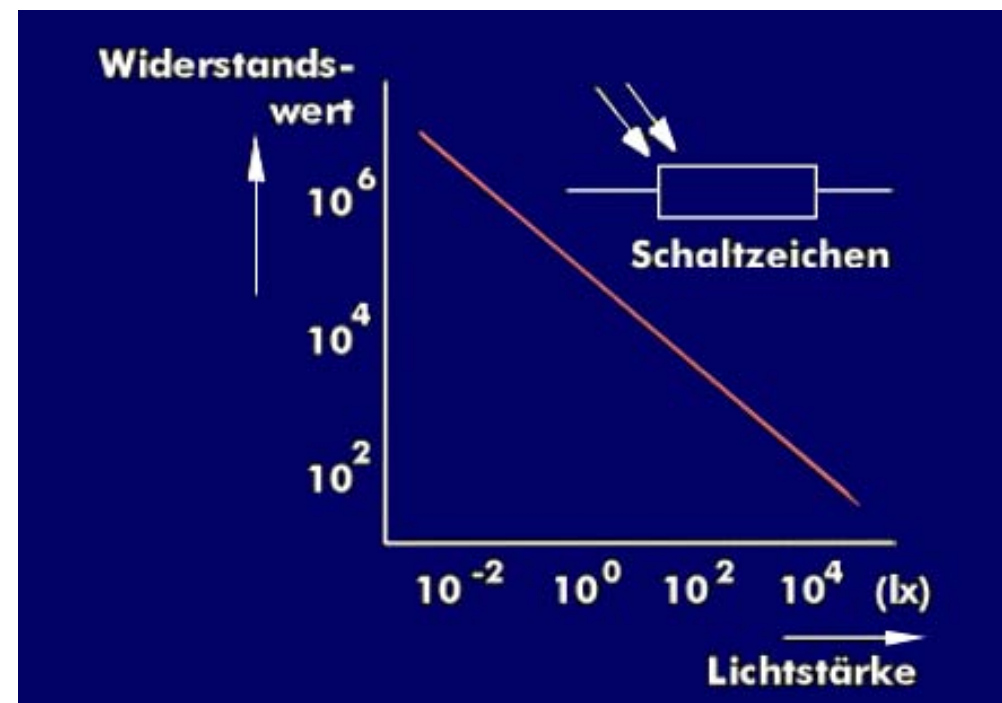


ändert. Es handelt sich dabei um die Kollektor-Basis-Strecke, die als Fotodiode fungiert und den Basisstrom für den Fototransistor erzeugt. Der wesentliche Vorteil des Fototransistors gegenüber der Fotodiode ist die wesentlich höhere Empfindlichkeit, weil die Basis-Kollektorstrecke durch den Lichteinfall beeinflusst wird. Allerdings ist die Trägheit höher als die der Fotodiode, wodurch

der Fototransistor nur bei Anwendungen mit niedriger Pulsfrequenz eingesetzt werden kann. Die Grenzfrequenz liegt bei etwa 250 kHz.

Die spektrale Empfindlichkeit ist vergleichbar der der Fotodiode, d.h. dass Fototransistoren aus Germanium ihr Maximum bei etwa 1.500 nm haben, solche aus Silizium bei etwa 800 nm. Beide Wellenlängen liegen im Infrarotbereich und damit oberhalb der sichtbaren Wellenlängen. Die Empfindlichkeitskurve ist abhängig davon aus welchem Material das Transistorgehäuse besteht. Ein transparentes Gehäuse hat eine breitere Empfindlichkeitskurve als ein schwarzes Epoxy-Gehäuse.

Fotowiderstand
LDR, light dependent resistor



Fotowiderstände (LDR) sind Halbleiterbauelemente der Optoelektronik, deren Widerstand sich bei Lichteinfall ändert. Als Halbleitermaterial werden u.a. im sichtbaren Lichtbereich Cadmiumsulfid (CdS) und Selen benutzt, das als dünne Schicht mäanderförmig zwischen die kammförmigen Leiterbahnen gelegt wird. Bei Lichteinfall erhöht das Cadmiumsulfid durch verstärkte Loch-Elektronen-Bildung den elektrischen Strom. Da es sich bei Fotowiderständen um Widerstände handelt, können sie in beiden Richtungen betrieben werden und steuern über den Lichteinfall den Stromfluss durch Veränderung des Widerstandswertes. Steigt der Lichteinfall, sinkt der Widerstandswert. Der

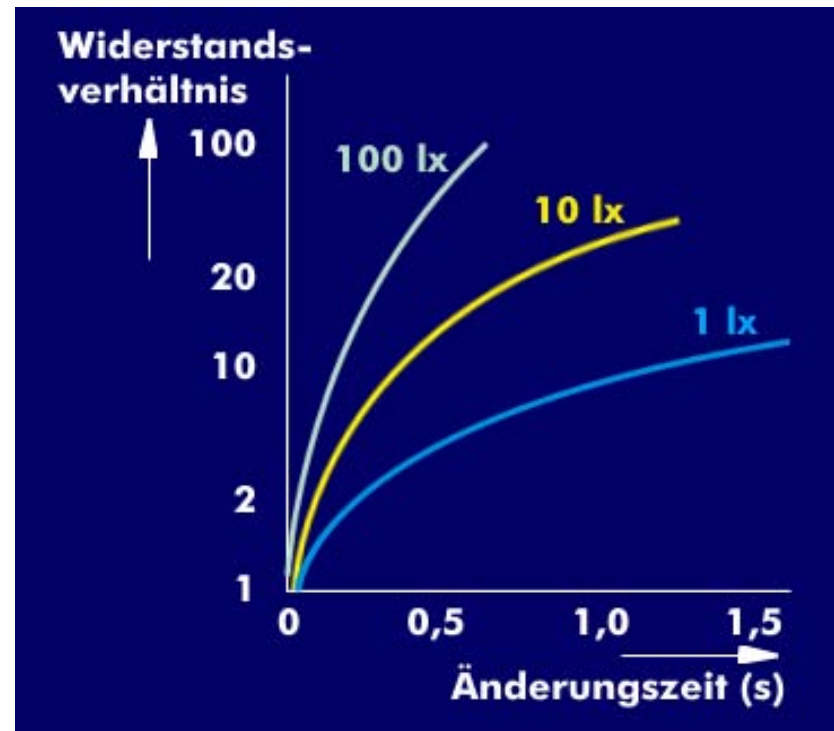
Widerstands-Licht-Kennlinie eines Fotowiderstands

Dynamikbereich des Widerstandswertes kann durchaus zwei bis drei Zehnerpotenzen umfassen, also beispielsweise zwischen einigen Ohm und Mega-Ohm liegen.

Die Lichtempfindlichkeit entspricht bei den Standard-Fotowiderständen dem Bereich der sichtbaren Wellenlängen, das Maximum liegt bei etwa 600 nm, also im gelborangen Bereich. Es gibt aber auch spezielle Ausführungen die ihre höchste Empfindlichkeit bei Infrarot haben. Darüber hinaus haben diese Bauelemente eine nicht zu vernachlässigende Trägheit.

Bei einem LDR sind zwei Kupferkämme auf einer isolierten Unterlage angebracht. Dazwischen liegt eine dünne Cadmiumsulfid-Schicht (CdS) in Form eines gewundenen Bandes. Cadmiumsulfid ist ein

Widerstandsänderung eines Fotowiderstands in Abhängigkeit von der Beleuchtung



Halbleitermaterial, bei dem die elektrische Leitfähigkeit von der einfallenden Lichtmenge abhängt. Je mehr Licht auf das CdS fällt, desto größer ist die Paarbildung (Rekombination zwischen Löchern und Elektronen), desto größer ist auch der elektrische Strom. Fotowiderstände können in Abhängigkeit von dem Material einen Dunkelwiderstand zwischen 1 MOhm und 100 MOhm haben, der bei Beleuchtung mit 1.000 Lux (lx) auf unter 100 Ohm bis 1 kOhm fallen kann. Die Veränderungsgeschwindigkeiten liegen im Millisekunden-Bereich, pro Sekunde kann sich der Widerstandswert um einige hundert Kilo-Ohm verändern. Fotowiderstände werden u. a. in Dämmerungsschaltern eingesetzt. Weitere Halbleitermaterialien für Fotowiderstände sind z. B. Cadmiumselenid (CdSe), Bleisulfid (PbS), Bleiselenid (PbSe), Cadmiumtellurid (CdTe), Zinkoxid (ZnO), Selen (Se), Indiumantimonid (InSb), Indiumarsenid (InAs),

Germanium (Ge) oder Silizium (Si).

Funksensor radio sensor

Funksensoren sind drahtlos arbeitende *Sensoren*, die mit einem Funkmodem ausgestattet sind. Bei Funksensoren, die in der Regel mit eigener Stromversorgung arbeiten, ist der Stromverbrauch im Ruhemodus ein wichtiger Parameter, der einen unmittelbaren Einfluss auf die Batterielebensdauer hat. Durch entsprechende Energiespartetechniken können Funksensoren mit ZigBee mehrere Jahre mit einer Batterie arbeiten.

Neben den batteriebetriebenen Funksensoren gibt es noch die batterielosen. Diese Sensoren basieren auf Energy Harvesting und beziehen ihre Energie durch den Tastendruck.

Für die Übertragung stehen die lizenzfreien ISM-Bänder zwischen 315 MHz und 434 MHz, 868 MHz und 870 MHz (SRD), 902 MHz und 926 MHz und 2,400 GHz und 2,4835 GHz zur Verfügung. Die Frequenzbänder bis 434 MHz und zwischen 868 MHz und 870 MHz werden vorwiegend in Europa benutzt und eignen sich für mittlere Übertragungsdistanzen in Gebäuden. Das 2,4-GHz-Band kann mit geringer Leistung über kurze Distanzen von einigen Metern benutzt werden.

Geschwindigkeitsmessung speed measurement

Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung stehen über physikalische Gesetze in unmittelbarem Zusammenhang.

Bei der Geschwindigkeitsmessung wird ein mittels *Sensoren* ermittelter Weg (s) auf die für die Zurücklegung benötigte Zeit (t) bezogen. Die Geschwindigkeit (V) wird aus dem Quotienten der Strecke zur benötigten Zeit errechnet. In der elektrischen Messtechnik können alle gängigen Verfahren zur *Wegmessung* eingesetzt werden. Der zeitliche Bezug wird durch Zeitglieder hergestellt. Auch Signallaufzeiten geben Aufschluss über einen von elektrischen Signalen zurückgelegten Weg. So kann beispielsweise aus der Laufzeit von an

Fehlerstellen reflektierten Signalen die Entfernung eines Kabelbruchs ermittelt werden. Dieses Messverfahren wird beispielsweise in der Zeitbereichsreflektometrie (TDR) und der optischen Reflektometrie (OTDR) angewendet.

Neben den nachfolgend beschriebenen Sensorsystemen werden auch Differenzierglieder und Integrierglieder zur Messung von Geschwindigkeit und Beschleunigung eingesetzt.

Die Beschleunigung (a) berechnet sich aus dem Quotienten der Geschwindigkeitsänderung (ΔV) pro Zeiteinheit (t). Zur Ermittlung der Beschleunigung dienen Beschleunigungsumformer.

Feder-Masse-Systeme: Diese Sensoren nutzen die Wirkung der Beschleunigung auf ein gedämpftes Feder-Masse-System.

Kapazitive Beschleunigungssensoren: Bei diesen Sensoren werden Kapazitäten zur Messung der Verschiebung von Massen eingesetzt. Hierbei wird die Masse (m) in einem Differenzialkondensator so aufgehängt, dass bei der durch die Beschleunigung hervorgerufenen Bewegung der Plattenabstand und somit die Kapazität des Kondensators verändert wird. Während die Kapazität des einen Kondensators bei Verringerung des Plattenabstands ansteigt, verringert sie sich bei dem anderen. Die Auswertung der Veränderung erfolgt über eine Brückenschaltung.

Magnetische und induktive Beschleunigungsaufnehmer: Der magnetische Aufnehmer nutzt den *Hall-Effekt* und hat einen Permanentmagnet, der als Beschleunigungsmasse (m) dient. Der Permanentmagnet verändert seinen Abstand gegenüber einem Hallelement.

Piezoelektrische Beschleunigungssensoren nutzen den *Piezo-Effekt*. Dabei wird bei Belastung an der Oberfläche eine Ladung erzeugt, die der Kraft proportional ist. Die aus der abgeführten Ladung gewandelte Spannung wird zur Ermittlung der Beschleunigung aus dem physikalischen Zusammenhang von Kraft, Masse und Beschleunigung benutzt.

GMI, giant magnetic-inductance

Neben den diversen magnetisch-resistiven Effekten, die in *Magnetfeldsensoren* eingesetzt werden, gibt es mit dem Giant Magnetic-Inductance (GMI) auch einen magnetisch-induktiven Effekt.

Der GMI-Effekt tritt bei Drähten auf, deren Oberfläche mit einem magnetischen Material beschichtet ist, dessen Magnetisierungsrichtung ringförmig um den Draht verläuft. Wird ein solcher Draht mit einem in Längsrichtung verlaufenden Magnetfeld belegt, ändert sich der magnetische Fluss in der Beschichtung und führt bei hohen Frequenzen durch die Beeinflussung des Skineffekts zu einer Änderung der Induktivität.

GMR, giant magneto-resistive GMR-Effekt

Der GMR-Effekt ist ein magneto-resistiver Effekt, bei dem sich der Widerstandswert eines metallischen Dünnschichtsystems in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke ändert. Im Unterschied zu anderen magneto-resistiven Verfahren wird beim Giant Magneto-resistance-Effekt der Elektronen-Spin-Effekt in einem ultradünnen Schichtsystem ausgenutzt, der die Leitungsmechanismen verändert. Das Dünnschichtsystem besteht aus verschiedenen dünnen Schichten aus weichmagnetischem, unmagnetischem, metallischem und hartmagnetischem Material. Die Ausrichtung zwischen der weich- und hartmagnetischen Schicht ist entscheidend für den Widerstandswert, der sich mit der Winkeländerung des magnetischen Feldes ändert. Die Widerstandsänderung ist dann am größten, wenn die magnetischen Schichten in entgegengesetzter Richtung magnetisiert sind.

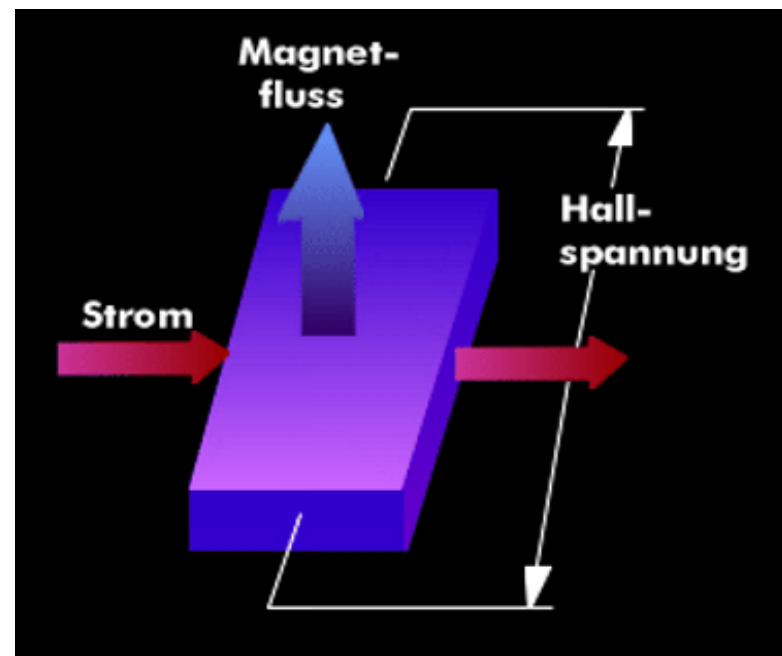
Der GMR-Effekt wird in feldstärkegesteuerten GMR-Sensoren genutzt, die in der Automation und Automotive-Technik eingesetzt werden.

In Festplatten nutzt man den GMR-Effekt zur Erhöhung der Speicherdichte. Da die GMR-Schichten unter magnetischem Einfluss eine hohe Widerstandsänderung aufweisen, kann in den Schreib-/Leseköpfen ein vergleichsweise starkes Lesesignal erzeugt werden. Bedingt durch die höhere Empfindlichkeit des GMR-Sensors gegenüber anderen Schreib-/Leseköpfen kann die Speicherdichte um etwa 20 % gegenüber klassischen Festplatten auf ca. 100 GB/qinch erhöht werden. Dies nutzt man vor allem beim Perpendicular-Recording.

Neben dem beschriebenen GMR-Effekt gibt es weitere magnetoresistive Effekte, die alle unter dem Oberbegriff *X-Magneto-Resistive* (XMR) zusammengefasst sind.

Hall-Effekt Der Hall-Effekt ist ein nach dem amerikanischen Physiker Edwin Herbert Hall (1855 bis 1938) benannt und zeigt den magnetischen Einfluss auf stromführende Leitungen.

Hall effect



Generierung der Hallspannung durch Magnetfluss und Stromfluss

Das Phänomen des Hall-Effekts basiert auf der *Lorentzkraft*. Es tritt dann auf, wenn sich Ladungsträger bewegen und wenn senkrecht zur Bewegungsrichtung ein Magnetfeld anliegt. In diesem Fall wirkt auf die Ladungsträger eine Kraft, deren Richtung orthogonal sowohl zum Magnetfeld als auch zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger ist. Durch die Lorentzkraft findet im Hall-Element eine Ladungsverschiebung statt. Daraus ergibt sich ein elektrisches Feld, welches auf die Ladungsträger eine Kraft ausübt, die der Lorentzkraft entgegenwirkt. Zwischen diesen beiden Kräften stellt sich ein Gleichgewicht ein. Bringt man an den Längsseiten des Hall-Elementes Kontakte an, dann liegt an ihnen die Hallspannung. Die Höhe der Hallspannung ist proportional zur Lorentzkraft und ein Maß für die Dichte des magnetischen Flusses.

Der Hall-Effekt wird u.a. in *Sensoren* eingesetzt, so in Strommess-Sensoren, bei denen das Hall-Element so nahe wie möglich an das Magnetfeld gelegt wird, und in kontaktlosen Bewegungssensoren wie dem IMC-Hall-Sensor. Außerdem werden Hall-Elemente zur Untersuchung von Halbleitermaterialien benutzt.

Kaltleiter
PTC, positive temperature coefficient

Kaltleiter sind wie *Heißeleiter* wärmeempfindliche, nichtlineare Widerstände mit positivem Temperaturkoeffizienten, was bedeutet, dass sich ihr Widerstandswert mit steigender Temperatur erhöht. PTCs (Positive Temperature Coefficient) werden auch als Kaltleiter bezeichnet, weil sie bei niedrigen Temperaturen den Strom besser leiten. PTC-Thermistoren gibt es in Widerstandswerten von 1 Ohm bis zu 100 kOhm. Die Temperaturbereiche liegen zwischen -65 °C und + 200 °C und der Temperaturkoeffizient liegt bei bis zu 1 %/°C. Sie werden zur Temperaturkompensation in Netzteilen, Geräten und von elektronischen Bauelementen eingesetzt.

Kapazitiver Sensor *capacitive sensor*

*Kapazitiv arbeitender
Hochleistungs-Sensor für
Fingerabdrücke,
Foto: Siemens*



Kapazitive *Sensoren* basieren auf der Umwandlung ihrer Kapazität in eine andere physikalische Größe oder der daraus abgeleiteten Zeitkonstanten und Frequenzänderungen. Ein einfaches Prinzip basiert auf der Änderung des Dielektrikums. Der Aufbau solcher Dielektrika-Sensoren ist denkbar einfach. Er besteht aus zwei Leiterbahnen, die nebeneinander auf einer Leiterplatte aufgebracht sind und eine Kapazität bilden. Das Medium zwischen den zwei Leiterbahnen hat eine Dielektrizitätskonstante, die nahe "1" liegt. Taucht in das elektrische Feld des Kondensators ein anderes Material ein, dann verändert sich dessen Kapazität.

In der Praxis werden Dielektrika-Sensoren als Füllstandsensoren in der Automotive-Technik, in berührungslosen Schaltern oder Einklemmschutz für elektrische Fensterheber eingesetzt.

Kombiniert mit einem Sigma-Delta-Wandler detektiert der Sigma-Delta-Wandler statt einer Spannung eine unbekannte Kapazität. Das Verfahren nennt sich Capacity to Digital Converter (CDC).

Lorentzkraft *Lorentz force*

Jede elektrische Ladung "Q", die in einem magnetischen Feld mit der magnetischen Flussdichte mit der Geschwindigkeit (v) bewegt wird, erfährt eine quergerichtete Kraft. Diese Kraft ist die Lorentzkraft. Die Lorentzkraft (F) ist das Produkt aus der magnetischen Flussdichte (B), der Geschwindigkeit (v) und der Ladung (Q): $F=B \times v \times Q$.

Magnetfeldsensor *magnetic field sensor*

Magnetfeldsensoren werden von Magnetfeldern aktiviert. Es sind magnetoresistive *Sensoren*, die den magnetischen Fluss oder die -feldstärke in eine elektrische Größe umsetzen. Da es sich bei diesen Sensoren um berührungslose, zuverlässige und verschleißfreie Sensoren handelt, die relativ preiswert hergestellt werden können, werden sie häufig für die Erfassung anderer physikalischer Größen eingesetzt: für Druck, Füllstand, Drehzahl, u.a.

Zu den Magnetfeld-abhängigen Sensoren gehören u.a. die Hall-Sensoren und die Feldplatten, die allerdings bestimmte Einschränkungen im Temperaturbereich aufweisen und in der Herstellung relativ aufwändig sind. Daneben gibt es die Gruppe der magnetisch-resistiven Effekte, die unter der Bezeichnung *X-Magneto-Resistive* zusammengefasst sind: Anisotropic Magneto-Resistive (AMR), Giant Magneto-Resistive (GMR), Tunneling Magneto-Resistive (TMR), Colossale Magneto-Resistive (CMR) und *Extraordinary Magneto-Resistive* (EMR).

Mit dem *Giant Magnetic-Inductance* (GMI) wird auch ein magnetisch induzierter Effekt ausgenutzt.

NTC, negative temperature coefficient *Heißleiter*

Negative Temperature Coefficient (NTC) sind Thermistoren mit negativem Temperaturkoeffizient. Im kalten Zustand haben sie einen relativ hohen Widerstand, der sich bei Erwärmung durch Stromfluss nichtlinear verringert. Bei hohen Temperaturen ist der Widerstandswert sehr gering.

NTC-Thermistoren sind Halbleiterbauelemente, sie bestehen vorwiegend aus Silizium (Si), Germanium (Ge) und Galliumarsenid (GaAs). Es handelt sich um hochempfindliche Bauelemente, die auf kleinste

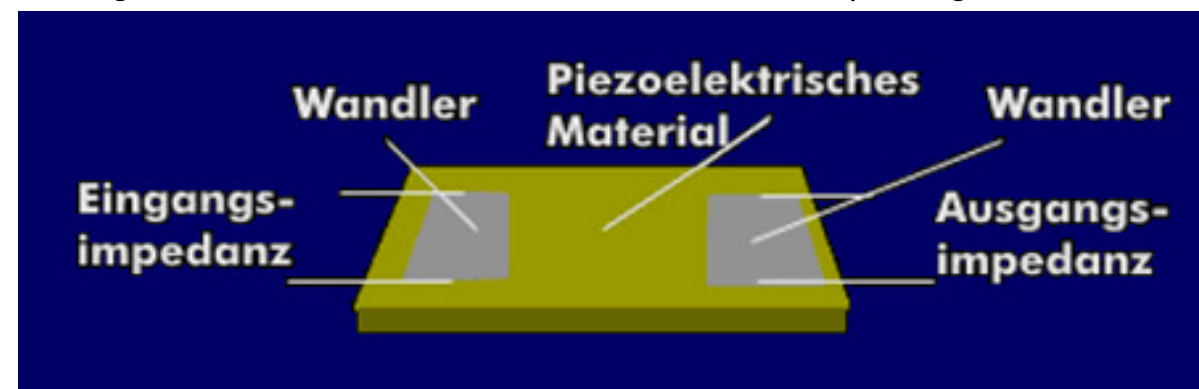
Temperaturschwankungen reagieren, kurze Reaktionszeiten haben und als thermischer Schutz zur Begrenzung des Einschaltstromstoßes in Motoren, Netzteilen und anderen elektrischen und elektronischen Schaltungen eingebaut werden.

Die Widerstandswerte für NTC-Thermistoren liegen zwischen 1 Ohm und 1 MOhm, sie sind ausgelegt für Temperaturen zwischen - 50 °C und + 300 °C und haben Temperaturkoeffizienten von bis zu 5 %/°C.

Oberflächenwellenfilter, OFW *SAW, surface acoustic wave*

Oberflächenwellenfilter (SAW) sind piezoelektrische Bauelemente, die auf elektrisch-akustisch-elektrischer Basis arbeiten. Diese Filter zeichnen sich durch einen hohen Gütefaktor (Q) mit steilen Filterflanken aus. Vom Prinzip her wird bei den OFW-Filtern ein elektrisches in ein akustisches Signal umgewandelt. Das akustische Signal breitet sich in dem piezoelektrischen Material aus. Durch Aufbau und Dimensionierung der Piezo-Materials, meistens werden Substrate aus Quarz oder Lithium-Tantalat benutzt, kann die Wellenlänge und Selektionsschärfe des akustischen Signals beeinflusst werden. Dieses wird anschließend wieder in eine elektrische Spannung umgewandelt. Der Aufbau eines Piezo-Umwandlers kann so ausgeführt sein, dass aus einem breitbandigen elektrischen Eingangssignal nur eine akustische Welle zur Ausgangselektrode durchgelassen wird und in eine hochselektive Frequenz gewandelt werden kann.

*Aufbau eines
Oberflächenwellenfilters*

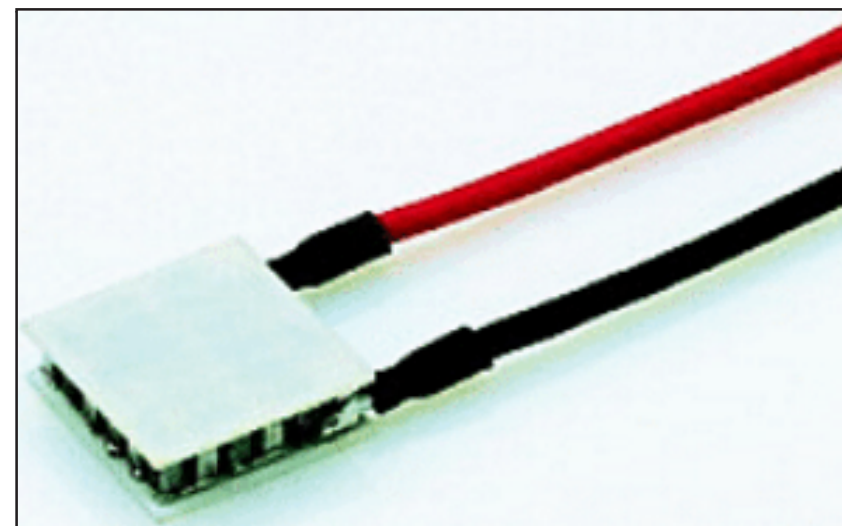


Oberflächenwellenfilter werden in der Rundfunk- und Fernsehempfangstechnik und in anderen HF-orientierten Empfangstechniken wie in Mobilfunkgeräten und WLAN-Empfängern eingesetzt. Aber auch als Oberflächenwellen-Sensoren in der Automotive-Technik, der

Gebäudeautomation oder in Touchscreens zur Positionsbestimmung des Cursors.

Peltierelement *Peltier element*

Das Peltierelement ist ein Bauelement der Thermoelektrik, das Wärme von einer Elektrode zur anderen transportiert. Die beiden unterschiedlichen Halbleiter-Elektroden sind über Kupferdrähte miteinander verbunden. Der so genannte Peltier-Effekt, bei dem die eine Elektrode kalt und die andere heiß wird, entsteht bei Anlegen einer Spannung an die Elektroden, wobei die dotierten Halbleiter ihr Energieniveau ändern. Die kalte Elektrode, die Coldplate, nimmt dabei Wärme auf die zur heißen Elektrode, der Hotplate, transportiert und dort abgeführt wird. Die zur Hotplate transportierte Wärme kann durch Kühlkörper und Lüfter abgeführt werden. Peltierelemente, die als eine Art Wärmepumpe fungieren, werden u.a. in der Computertechnik zur



*Peltier-Element für die Kühlung von
CPUs, Foto: Conrad Electronic*

Kühlung von Bauelementen wie CPUs eingesetzt. Sie haben je nach Größe eine Stromaufnahme von mehreren Ampere und arbeiten mit Temperaturdifferenzen von ca. 60°C, und werden auch als Icecaps bezeichnet.

Zur Steuerung des Peltierelements werden Thermistoren eingesetzt, über die die Steuerspannungen für die Peltierelemente erzeugt werden.

Der Peltier-Effekt kann umgekehrt werden und aus Temperaturunterschieden Spannung erzeugen. Dieser Effekt wird in Thermogeneratoren genutzt.

Photoeffekt
photo effect

Der Photoeffekt ist ein physikalisches Phänomen, das erstmals 1839 von dem französischen Physiker A. E. Becquerel nachgewiesen wurde. Später wurde dieses Phänomen von den deutschen Physikern Heinrich Hertz und Wilhelm Hallwachs bestätigt. Daher spricht man auch vom Hallwachs-Effekt.

Der Photoeffekt ist ein lichtelektrischer Effekt bei dem aus metallischen Oberflächen Elektronen herausgelöst werden, und zwar bei Bestrahlung der Oberfläche mit Licht. Wird eine Oberfläche mit Licht bestrahlt, dann treffen Photonen auf sie und reißen Elektronen aus ihrem Verbund. Arbeitete Hallwachs noch mit Zinkplatten, so wurde bei späteren Versuchen mit dem Halbleitermaterial Selen (Se) gearbeitet und noch später wurden Germanium (Ge) und Silizium (Si) benutzt. Mit dieser Technik konnten erstmals Fotozellen, später *Fotodioden* und *Fototransistoren* hergestellt werden.

Piezo-Effekt
piezoelectric effect

Bei bestimmten Kristallen, beispielsweise bei Turmalinen, Quarzen und Seignettesalzen bilden sich bei Druckbelastung auf der Oberfläche elektrische Ladungen. Dieses Phänomen wird mit dem griechischen Wort für Druck bezeichnet: Piezo.

Der Piezo-Effekt besagt, dass bei Deformation eines Quarzkristalls Ladungen erzeugt werden. Solche Deformationen können durch mechanische Beanspruchungen verursacht werden, durch Druck, Zug oder Torsion. Er wurde Ende des 19. Jahrhunderts von den Gebrütern Jacques und Pierre Curie entdeckt. Der Effekt kann auch als inverser Piezo-Effekt umgekehrt werden, indem man durch Anlegen einer Spannung an einen Kristall diesen verbiegt. Die für den Piezo-Effekt benutzten Kristalle werden gezüchtet und in Richtung einer bestimmten Kristallstruktur geschnitten.

Den normalen und den inversen Piezo-Effekt macht man sich u.a. in *Sensoren*, Mikrofonen, Piezo-Druckern, LwL-Schaltern, *Oberflächenwellenfiltern* und in der Konsumelektronik wie Feuerzeugen, als Schallgeber in Armbanduhren, Weckern oder Computern und in Tonabnehmern von Schallplattenspielern zunutze.

**PLCD, permanentmagnetic
linear contactless
displacement**

Permanentmagnetic Linear Contactless Displacement (PLCD) ist eine Technik, die in feldstärkegesteuerten *Sensoren* eingesetzt wird, ähnlich Anisotropic Magneto-Resistive (*AMR*) und Giant Magneto-Resistive (*GMR*).

Wie die anderen Techniken arbeitet auch die PLCD-Technik sättigungsinduziert. Ein PLCD-Element besteht aus einem weichmagnetischen Material, das in seiner Länge von einer Primärspule umgeben ist. Angesteuert wird das PLCD-Element durch einen Permanentmagneten, der das weichmagnetische Material an der Stelle in die Sättigung führt, an der der Permanentmagnet sich dem Material nähert. Die Position, an der die Sättigung erfolgt, wird durch Spulen an den Querseiten erfasst.

Da PLCD-Elemente im Sättigungsbereich betrieben werden, sind sie relativ unempfindlich gegen Feldstärkeschwankungen, Temperatureinflüsse auf das Magnetmaterial und gegenüber der Abstandsänderung des Permanentmagneten.

PMD, photonic mixer device *PMD-Sensor*

Bekannte optische *Bildsensoren* arbeiten ein- oder zweidimensional. Beispiele hierfür sind die verschiedenen O/E-Wandler, *CCD-Sensor* und *CMOS-Sensor*. In der Robotertechnik, der Mess- und Automatisierungstechnik und nicht zuletzt in der Automotive-Technik ist aber auch ein steigender Bedarf an dreidimensionalen Lichtsensoren. Der *PMD-Sensor* (Photonic Mixer Device) ist ein solcher Sensor, der neben den Helligkeitsinformationen auch die Entfernung von Objekten erfasst.

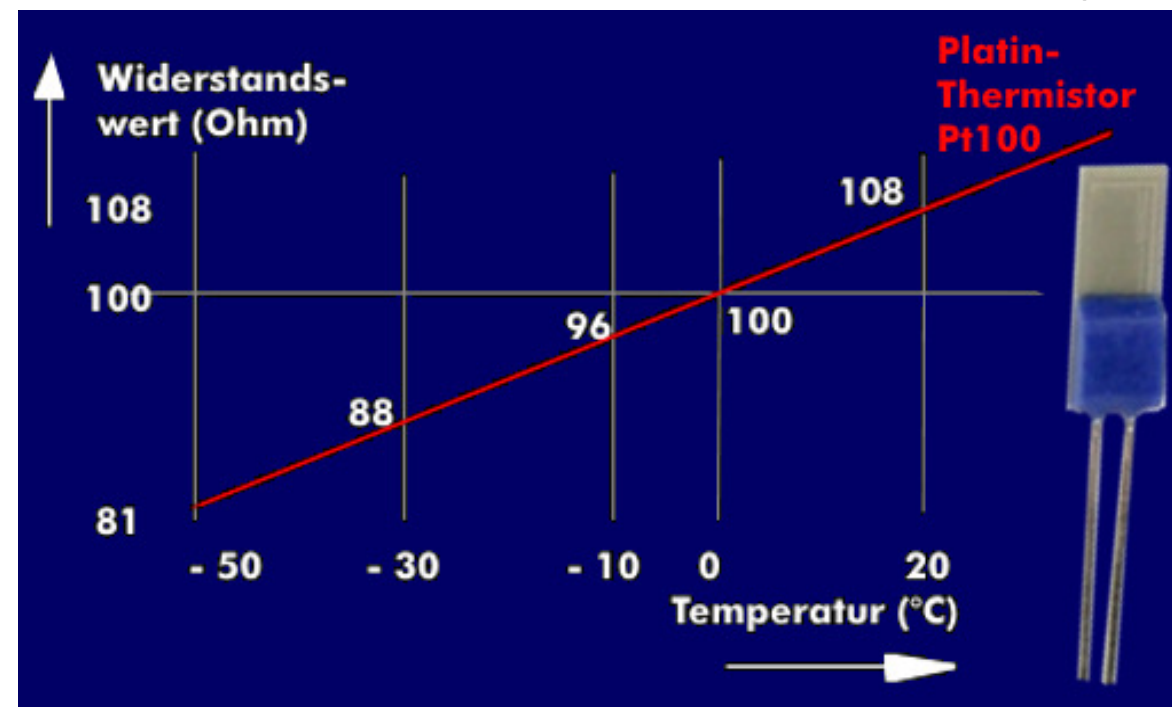
Wie beim Radar bestimmt ein PMD-Sensor über die Reflektion eines ausgesendeten Signals an einem Objekt, dessen Entfernung. Das vom PMD-Sender abgestrahlte, intensitätsmodulierte Licht oder Infrarotlicht beleuchtet dabei die zu vermessende Szene. Das zurückgestreute und um die Laufzeit verzögerte Lichtsignal trifft auf den PMD-Sensor. Das empfangene Lichtsignal wird in einer PMD-Matrix als Ladungsbild entfernungsselektiv dargestellt.

Pt100-Sensor

Der *Pt100-Sensor* ist ein *RTD-Element*, das als Widerstand einen Platindraht als Temperaturwandler benutzt und dessen Widerstandswert bei 0 °C 100 Ohm beträgt. Der Nomenklatur entsprechend heißen die weiteren Platin-Elemente mit 200 Ohm Widerstand Pt200, mit 500 Ohm Pt500 und mit 1 kOhm Pt1000.

Der Pt100 zeichnet sich durch eine hohe Linearität aus, es hat eine Empfindlichkeit von ca. 0.4 %/K und wird im Temperaturbereich zwischen -200 °C und 850 °C eingesetzt. Pt100 gibt es in zwei Toleranzklassen: die Toleranzklasse "A" mit einer höheren Genauigkeit und Reproduzierbarkeit als die Toleranzklasse "B".

Die extrem lineare Widerstandsänderung ist in verschiedenen Standards festgelegt. Der *Pt100-Sensor* ist ein *RTD-Element*, das als Widerstand einen Platindraht als Temperaturwandler benutzt und dessen



Widerstandswert bei 0 °C 100 Ohm beträgt. Der Nomenklatur entsprechend heißen die weiteren Platin-Elemente mit 200 Ohm Widerstand Pt200, mit 500 Ohm Pt500 und mit 1 kOhm Pt1000. Der Pt100 zeichnet sich durch eine hohe Linearität aus, es hat eine Empfindlichkeit von ca. 0.4 %/K und wird im Temperaturbereich zwischen -200 °C und 850 °C eingesetzt. Pt100 gibt es in zwei Toleranzklassen: die Toleranzklasse "A" mit einer höheren Genauigkeit und Reproduzierbarkeit als die Toleranzklasse "B".

Widerstandskennlinie und Pt100-Thermistor in Dünnschichttechnik

RTD, resistance temperature detector
RTD-Element

Resistance Temperature Detektoren (RTD) sind Thermistoren, die aus einem Platindraht oder einer in Dünnschichttechnik auf ein Oxydplättchen aufgedampfte Platinschicht bestehen und den positiven Temperaturkoeffizienten von Metallen, der sich bei steigender Temperatur durch einen höheren Widerstand bemerkbar macht, ausnutzen. Je höher die Temperatur, desto höher wird der elektrische Widerstand. Die meisten RTD-Elemente verwenden Platin (*PRT*), das sich durch einen besonders hohe Linearität des Widerstandswertes auszeichnet. Die Messgenauigkeit dieser Temperaturfühler ist durchaus besser als $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Damit diese Elemente Ansprechzeiten von Bruchteilen einer Sekunde aufweisen, sind die Platin-Elemente extrem klein und haben eine geringe Wärmekapazität. Bei Messfühlern sind die RTD-Elemente in verkapselten Tastköpfen untergebracht. Neben Platin kommen als weitere Metalle Kupfer, Nickel und Eisen-Nickel- und andere Legierungen zum Einsatz.

Material	Temperaturbereich (°C)	Bemerkungen
Platin	-260 bis 1.000	angewendet < 550 °C
Kupfer	-200 bis 260	
Nickel	-200 bis 430	keine gute Linearität
Balco 70 % Ni, 30 % Fe	-100 bis 230	keine gute Linearität, hoher Widerstand
Tungsten	-100 bis 1.200	

Um Messfehler durch Anschlussdrähte zu minimieren, werden spezielle Schaltungen mit drei oder vier Anschlussdrähten in Brückenkonfiguration benutzt. Der Temperaturbereich für RTD-Elemente liegt zwischen -260°C und $+1.000^\circ\text{C}$. RTD-Thermofühler sind kommerziell für Widerstandsbereiche zwischen 10 Ohm und 25 kOhm verfügbar. Allgemein gebräuchlich sind RTD-Elemente mit 100 Ohm, 200 Ohm und 1 kOhm aus dehnungsfreiem Platin.

Temperaturbereiche verschiedener RTD-Materialien

Generell kann festgestellt werden, dass, je höher der Widerstand ist, desto geringer ist der Einfluss der Anschlussdrähte und der Schaltkreise. Einer der bekanntesten Platin-Sensoren ist der *Pt100*, der seine Bezeichnung durch seinen Widerstandswert bei 0°C erhalten hat.

Sensor
sensor

Ein Sensor oder Messwertempfänger ist eine mechanisch-/chemisch-elektronische Komponente, die eine gemessene physikalische Größe oder einen chemischen Effekt in ein analoges elektrisches Signal umwandelt. Physikalische Größen können Druck, Gewicht, Beschleunigung, Lichtstärke, Temperatur, Strahlung, Schall, magnetischer Fluss, Drehzahl und viele andere physikalische Größen sein. Der Sensor misst diese physikalischen Größen und wandelt sie mit induktiven, kapazitiven, piezoelektrischen, magnetischen, feldstärkegesteuerten, radioaktiven, ladungstechnischen oder photoelektrischen Wandlern in eine elektrische Spannung. Sensoren unterteilt man in mechanische und nicht-mechanische Sensoren. Zu der ersten Gruppe gehören

Übersicht über verschiedene Sensoren

Resistive Sensoren
Elektrische Widerstandsänderung Beispiele: Potentiometrische Sensoren Dehnungsmessstreifen
Induktive Sensoren
Änderung der Induktion Beispiele: Schwingungsaufnehmer Induktivaufnehmer
Wirbelstrom-Sensoren
Änderung des Wirbelstroms Beispiele: Induktive Initiatoren Wirbelstrom-Initiatoren
Magnetfeld-Sensoren
Änderung des Magnetfeldes Beispiele: Hall-Generatoren Feldplatte
Kapazitive Sensoren
Kapazitätsänderung Beispiele: Drucksensor Kap. Näherungsschalter
Optoelektrische Sensoren
Opto-elektrische Umsetzung Beispiele: Fototransistor Fotodiode
Temperatur-Sensoren
Kontaktthermometrie Beispiele: Widerstandsthermometer Thermoelement

solche für Position, Annäherung, Kraft und Druck; und zu den nicht-mechanischen gehören Sensoren für Temperatur, Licht, Magnetfeld und chemische Sensoren. Die Positionsmessung kann wiederum über *Dehnungsmessstreifen*, kapazitive Abstandsmessung, induktive Längenmessung oder über Widerstandspotentiometer erfolgen. Annäherungsmessungen können sich auf Personen und Sicherheitseinrichtungen beziehen und über Radarbewegungsmelder, Infrarotmelder, Ultraschallmelder oder Kamera-Differenzbilder ausgeführt werden. Und bei den Temperatursensoren reicht die Palette vom *Kaltleiter* über *Heißeleiter* und *RTD-Elemente* bis hin zu *Thermoelementen*. In optischen Netzen, in CD-, DVD- und BD-Laufwerken, in Scannern, Digitalkameras und Camcordern erfolgt die optisch-elektrische Wandlung mit lichtempfindlichen Sensoren. Dazu gehören *Fotodioden*, APD-Dioden, PIN-Dioden, *Fototransistoren*, aber auch CMOS- und *CCD-Sensoren*. Sensoren werden in Studios, in der Prozesssteuerung, in Sicherheitseinrichtungen und Fernwirksystemen, in optischen Netzen, CD-Playern, Kraftfahrzeugen, Flugzeugen, Produktionsanlagen und in vielen anderen technischen, medizinischen und naturwissenschaftlichen Einrichtungen eingesetzt. Man unterscheidet zwischen drahtgebundenen Sensoren und *Funksensoren*, mit eigener Energieversorgung. Darüber hinaus können Sensoren mit eigener Intelligenz ausgestattet sein, beispielsweise mit einem Mikroprozessor oder mit Mikrosystemen. In diesem Zusammenhang wird die

Bezeichnung Smart Sensor verwendet.

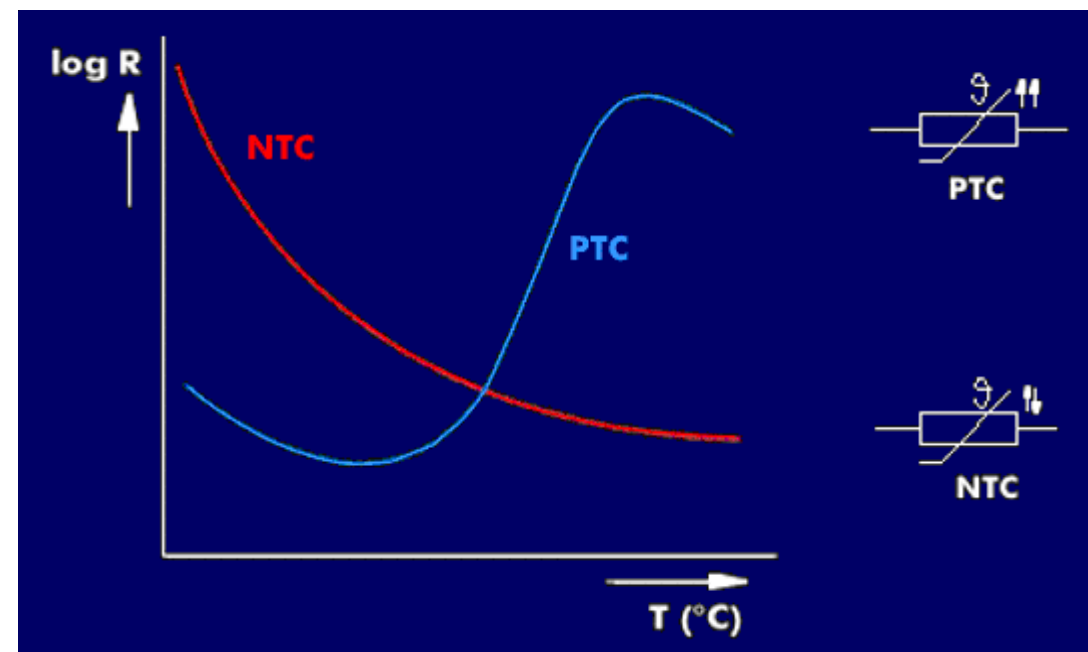
Sensorfusion *sensor fusion*

Sensorfusion ist die intelligente Kombination von den Messwerten von verschiedenen *Sensoren*. Aus diesen kombinierten Informationen unterschiedlicher oder gleichartiger Sensoren, die häufig untereinander abhängig sind, lassen sich Zusammenhänge und Parameter für die Anwendungsteuerung ableiten. Außerdem kann bei dem Einsatz mehrerer gleichartiger Sensoren die Genauigkeit der Sensorinformation verbessert werden.

Das aus der Sensorfusion gewonnene Resultat ist im Ergebnis besser, als wenn die Messwerte einzelner Sensoren interpretiert würden. Daraus folgt, dass die interpretierten Ergebnisse genauer sind, die Abhängigkeit der physikalischen Größen zueinander dargestellt wird und ihre Darstellform mehrdimensional sein kann.

Es gibt verschiedene mathematische Verfahren für die Interpretation und Auswertung der Sensorfusionssignale. Dazu gehören beispielsweise die Korrelation der unterschiedlichen physikalischen Messwerte oder deren Gewichtung oder die Transformation der Messwerte zum Zwecke der Analyse. In einer Sensorfusion können beispielsweise der Druck und die Temperatur zusammengeführt werden oder die Temperatur und die Feuchtigkeit oder die Entfernung, Beschleunigung und Geschwindigkeit und viele andere physikalische Größen.

Thermistor
thermistor Die Bezeichnung Thermistor ist eine Wortschöpfung aus Thermal Resistor, also wärmeempfindlicher Widerstand. Es handelt sich um einen Widerstand mit positiver oder negativer Temperaturcharakteristik, die eine starke Nichtlinearität aufweist.



Kennlinien von NTC- und PTC-Thermistoren

Das bedeutet, dass sich der Widerstandswert mit steigender Temperatur erhöht oder verringert. Daher unterscheidet man zwischen *Heißeleitern* und *Kaltleitern*, die als PTC-Thermistoren geführt werden. NTC steht für Negativ Temperature Coefficient und PTC für Positiv Temperature Coefficient. Erstere verringern ihren Widerstand mit steigender Temperatur, bei Letzteren erhöht er sich mit steigender Temperatur. Zu dieser Gruppe gehören auch die RTD-Elemente.

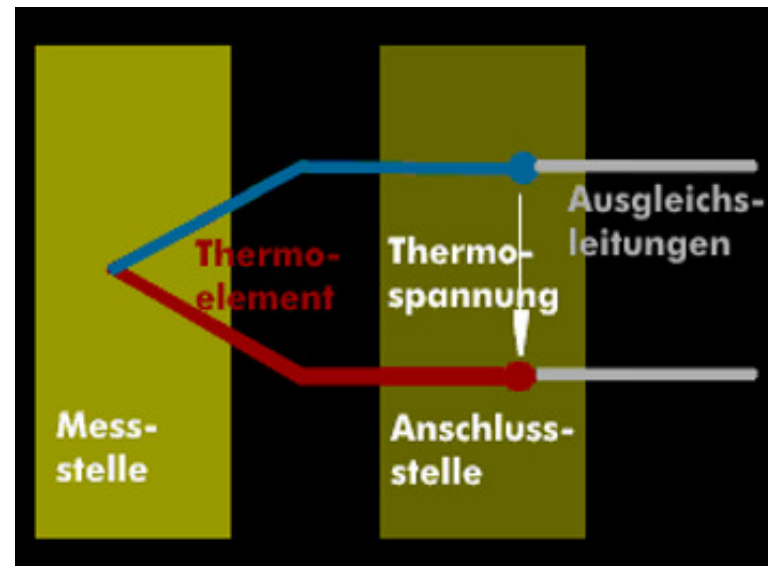
Der Heißeleiter hat einen relativ hohen Widerstand bei niedrigen Temperaturen und einen sehr geringen Widerstand bei hohen Temperaturen. Sie werden als thermischer Schutz zur Begrenzung des Einschaltstromstoßes in Motoren, Netzteilen und anderen elektrischen und elektronischen Schaltungen eingebaut.

Die Kaltleiter haben wie die meisten Metalle einen positiven Temperaturkoeffizient; das bedeutet, dass sich der Widerstandswert mit steigender Temperatur erhöht.

Thermoelement
TE, thermal element Thermoelemente (TE) sind im Gegensatz zu den passiven Thermistoren *Sensoren*, die bei Temperaturänderungen Spannung erzeugen.

Sie basieren auf dem so genannten Seebeck-Effekt und dem *Peltier-Effekt*, die besagen, dass an der Kontaktstelle zwischen zwei verschiedenen, sich berührenden Metallen, eine Kontaktspannung entsteht.

Prinzipieller Aufbau eines Thermoelements



Diese Kontaktspannung wird durch die Ladungsverschiebung zwischen den beiden Metallen hervorgerufen, sie ist direkt abhängig ist von der Temperatur an der Kontaktstelle, und heißt Thermospannung. Der Seebeck-Effekt und der Peltier-Effekt treten gemeinsam auf, können aber getrennt genutzt werden.

Die Ladungsverschiebung ist durch die elektromotorische Kraft (EMK) in den metallischen Leitern bedingt. Die EMK ist materialabhängig und entsteht sobald in einem metallischen Leiter ein Temperaturgefälle vorhanden ist. Bei zwei verschiedenen Materialien entsteht somit eine temperaturabhängige Potentialdifferenz. Am Beispiel von Zinn und Nickel würde eine Thermospannung von $4,9 \times 10^{-6}$ V/K entstehen, und damit bei Raumtemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Thermospannung $1,44 \text{ mV}$.

Thermoelemente erzeugen an der Verbindungsstelle der beiden Metalle thermoelektrische Spannungen, die nur einige Mikrovolt klein und temperaturabhängig sind. Da jedes Metall und demzufolge jede Kombination zweier Metalle eine andere Spannung erzeugt, gibt es eine von DIN standardisierte thermoelektrische Spannungsreihe über die die Thermospannung ermittelt werden kann.

Thermoelemente können im Temperaturbereich zwischen $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ und $1.800 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden.

TMR, tunneling magneto-resistive

Beim TMR-Mechanismus (Tunneling Magneto-Resistive), einem Verfahren das in *Magnetfeldsensoren* eingesetzt wird, geht es um einen Tunnel-Effekt, der auf der Quantenphysik basiert. Die Gesetze der klassischen Physik sind in diesem Fall nicht mehr anwendbar.

Der TMR-Effekt ist damit zu erklären, dass bei extrem dünnen Strukturen, die in der Größenordnung von Molekülen angesiedelt sind, auch dünnste Isolatoren, die zwischen zwei leitenden Schichten befinden, Elektronen durchlassen. Beim Tunneling Magneto-Resistance befindet sich ein hochdünner Isolator zwischen zwei ferromagnetischen Schichten und ändert mit der Ausrichtung des Magnetfeldes seinen Widerstandswert.

Der Vorteil dieser Technik gegenüber den anderen magnetisch-resistiven Verfahren, dem Anisotropic Magneto-Resistive (*AMR*) und dem Giant Magneto-Resistive (*GMR*), liegen in der extrem kleinen Bauweise von *TMR-Sensoren*, die Kantenlängen im Mikrometerbereich haben.

Transducer transducer

Transducer sind Wandler oder Umformer, die eine Energieform in eine andere umformen, so beispielsweise elektrische Energie in Bewegungsenergie oder Drehmomente in elektrische Energie.

Es sind *Sensoren* und Aktoren, wobei der Begriff Transducer häufig eingeschränkt für Messwertwandler benutzt wird. Damit Transducer in der Anwendung vergleichbar werden, hat IEEE unter P1451.4 einen Standard für ein elektronisches Datenblatt verabschiedet, die TEDS, die auf Chips in den Transducern gespeichert werden.

Der Begriff Transducer wird auch im Heimkinobereich benutzt. Bei dieser Umwandlung werden Tiefstöne, so

*Transducer für Druck,
Foto: DJ Instruments*

Wegmessung
path measurement



genannte subsonale Töne, in kinetische Energie umgesetzt. Diese kinetische Energie wird auf den Boden und die Wände übertragen und macht sich in Form von Erschütterungen und Vibrationen bemerkbar. Der Zuhörer nimmt diese Tiefstöne über den Körper auf, was das Tonerlebnis wesentlich verstärkt.

Es gibt verschiedene Messverfahren für die Weg-, Distanz-, Entfernung- oder Abstandsmessung. In diesem Zusammenhang sind die induktive und kapazitive Wegmessung zu nennen, die auf Laufzeiten basierende optische und frequenzmäßige oder auch das Potentiometerverfahren.

Zur induktiven Wegmessung werden Tauchankeraufnehmer verwendet. Sie bestehen aus einer Spule mit beweglichem Kern, auch Tauchanker genannt. Die Bewegung des zu messenden Objektes, z.B. ein bewegtes Maschinenteil, wird mittels eines

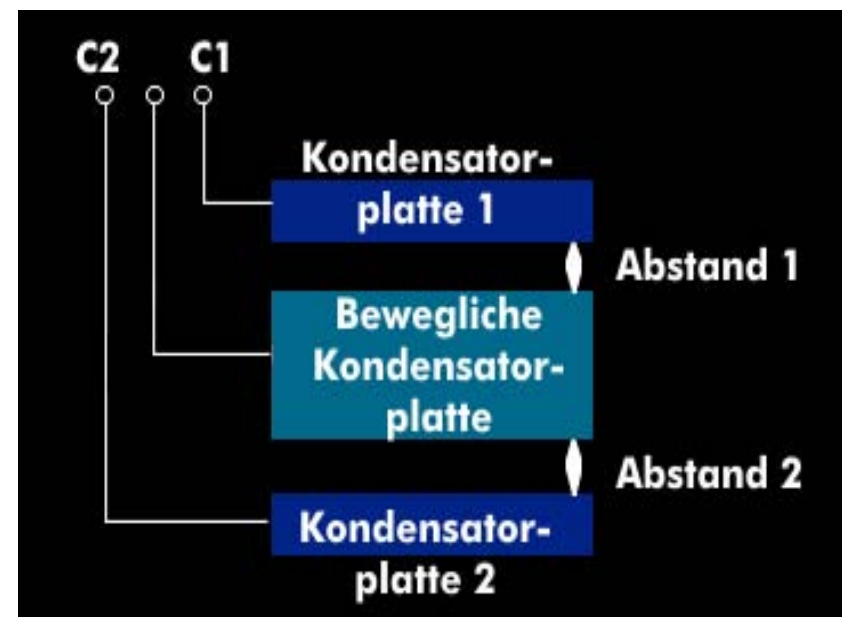
Verbindungsobjektes mechanisch mit dem Kern verbunden. Durch die Bewegung wird die Induktivität und somit die Reaktanz der Spule verändert und mit Hilfe einer elektronischen Schaltung z.B. einer Wechselstrombrücke ausgewertet.

Der Messbereich des induktiven Wegaufnehmers ist dann erschöpft, wenn der Eintauchpunkt erreicht ist, bei dem die Induktivität der Spule nicht mehr gesteigert werden kann. Ein großer Vorteil der induktiven Wegaufnehmer ist die Möglichkeit der berührungslosen Messung, bei dem das Messobjekt den Kern bildet, und die Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen. In der Praxis kommen häufig

Differenzialdrosseln zum Einsatz, die aus zwei symmetrisch nebeneinander gewickelten Spulen und einem Eisenkern bestehen und eine höhere Empfindlichkeit haben.

Durch Einsenken des magnetischen Kerns werden die Induktivitäten in den Spulen in entgegengesetzter Weise verändert. Die gegenseitige Kompensation der beiden Spulen sorgt für eine hohe Temperaturstabilität. Der Schaltungsaufwand zur Messwertausgabe ist auch hier relativ gering.

Induktive Wegaufnehmer werden vor allem zur Messung von langsamen und schnellen Bewegungen zwischen Maschinenteilen verwendet. Beispiele sind die Messung des Lagerspiels von Wellen oder die Messung der



*Kapazitiver Wegaufnehmer mit
Differenzialkondensator*

relativen Bewegung zwischen Rad und Karosserie eines Kraftfahrzeugs.

Kapazitive Wegaufnehmer messen den Weg durch Veränderung des Plattenabstandes oder der Plattenfläche eines Kondensators. Hierdurch verändert sich die Kapazität des Kondensators somit auch dessen Reaktanz.

Kapazitive Wegaufnehmer sind im Gegensatz zu induktiven extrem unempfindlich gegenüber der Leitfähigkeit und magnetischen Eigenschaften des Messobjekts. Die Messempfindlichkeit und der Messbereich können bei kapazitiven Wegmessungen durch die Verwendung eines Differenzialkondensators, das ist ein Kondensator mit beweglicher Mittelelektrode, verdoppelt werden. Ebenso verbessert sich hierdurch die Linearität. Der Differenzialkondensator wird in der Automatisierungstechnik für Präzisionsmessungen eingesetzt.

Das Potentiometerverfahren zur Wegmessung basiert auf der Widerstandsänderung eines bewegten Potentiometers. Bei diesem Verfahren wird über einen Hebel, der die zu messende Wegstrecke überträgt, der Schleifkontakt des Potentiometers verändert.

Die Ausgangsspannung am Schleifkontakt ist das Maß für die Position der verbundenen Einrichtung, z.B. der Lage eines Maschinenteils. Für Wegmessungen kommen Leitplastikpotentiometer zum Einsatz, deren Nutzlänge von 5 mm bis 4.000 mm reicht. Durch geeignete Abgleichverfahren werden Linearitäten zwischen 2 % und 0,05 % erreicht.

Durch Untersetzung und Getriebe, die mit einem Drehpotentiometer verbunden sind, können auf diese Weise auch Drehwinkel gemessen werden. Der Schaltungsaufwand für die Auswertung ist gering, es ist lediglich eine Gleichspannung erforderlich.

Die bei der Schleiferbewegung auftretende Reibung schränkt die Anwendbarkeit Potentiometeraufnehmern ein; es können nur relativ langsame Bewegungen gemessen werden.

XMR, X-magneto-resistive

Es gibt verschiedene Verfahren mit denen der Widerstandswert von leitenden Materialien unter Einfluss eines Magnetfelds beeinflusst werden kann. Diese Effekte, die als magneto-resistive Effekte bezeichnet werden, und die daraus entwickelten Verfahren, sind unter dem Oberbegriff X-magneto-resistive (XMR) zusammengefasst und werden in *Magnetfeldsensoren* eingesetzt.

Der *Hall-Effekt* ist einer der bekannteren magneto-resistiven Effekte, der in vielen *Sensoren* umgesetzt ist. Aus einigen weiteren Effekten wurden bereits Produkte entwickelt, davon zeugt der *GMR-Sensor*, der in Festplatten eingesetzt wird und mit dem die Speicherdichte um über 20 % erhöht wird. Weitere Effekte sind das Anisotropic Magneto-Resistive (*AMR*), Colossal Magneto-Resistive (*CMR*), Tunneling Magneto-Resistive (*TMR*), Colossale Magneto-Resistive (*CMR*) und das Extraordinary Magneto-Resistive (*EMR*).