

Technische Projektarbeit

Anwendungen von Sensoren

Prof. Dr. Thomas Rose

© 2010

Alle Rechte vorbehalten

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Bedeutung und Ziele der Lehrveranstaltung.....	1
1.2	Aufbau der Lehrveranstaltung	1
1.3	Übersicht über die Lerneinheit	2
2	Sensoren.....	3
2.1	Was ist ein Sensor?	4
2.2	Anwendungsbereiche von Sensoren.....	5
3	Temperaturmessung	7
3.1	Pt100 und ähnliche	7
3.2	Halbleitersensoren	9
3.3	Heiß- und Kaltleiter	11
3.4	Thermoelemente.....	12
3.5	Weitere Verfahren	13
4	Widerstandssensoren.....	14
4.1	Drucksensoren /Mikrophone	14
4.2	Potentiometer	14
4.3	Dehnungsmessstreifen.....	18
4.4	Anemometer	21
5	Kapazitive Sensoren.....	24
6	Induktive Sensoren	25
7	Piezoelektrische- Sensoren.....	27
8	Pyroelektrische Sensoren	33
9	Magnetfeld-Sensoren	34
10	Optische Sensoren.....	38
11	Moderne Herstellverfahren.....	41
11.1	Halbleitertechnik.....	45
11.2	Dickschichtverfahren.....	49
11.3	Dünnschichtverfahren	50
11.4	Hybridtechnik	51
12	Suchen und Verwalten von Literatur.....	51
13	Das Referat	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Sensoren für Wasch- und Spülmaschinen	5
Abbildung 2	Sensoren im Automobil (Bosch)	6
Abbildung 3	Aufbau von konventionellen Pt100-Sensoren	9
Abbildung 4	Pt100 in Dünnschichttechnik	9
Abbildung 5	Spreading Resistance Prinzip, Schnitt durch einen Si-Wafer ...	10
Abbildung 6	Symmetrischer Spreading-Resistance Aufbau	10
Abbildung 7	Temperaturabhängigkeit verschiedener Sensoren: Pt= Platin-Sensor; Si-Thermistor= Silizium-Sensor; PTC-Thermistor = PTC, NTC-Thermistor=NTC;	11
Abbildung 8	Prinzip der thermoelektrischen Messung.....	12
Abbildung 9	Bezeichnung der Thermopaare	13
Abbildung 10	Kohlemikrophon, ein Widerstands-Drucksensor.....	14
Abbildung 11	Potentiometer als lineare Positions- oder Winkelsensoren	15
Abbildung 12	Widerstandsschichten für Potentiometer mit nichtlinearen Kennlinien	15
Abbildung 13	Elektronisches Gaspedal mit Potentiometersensor (aus Wikipedia).....	16
Abbildung 14	Potentiometer mit 2 Widerstandsschichten	16
Abbildung 15	Tankfüllstandssensor; 1 Elektrische Anschlüsse; 2 Schleiferfeder; 3 Kontaktniet; 4 Widerstandsplatine; 5 Lagerstift; 6 Doppelkontakt; 7 Schwimmerhebel; 8 Schwimmer; 9 Boden des Kraftstoffbehälters.....	17
Abbildung 16	Drosselklappensensor; 1 Drosselklappenwelle; 2 Widerstandsbahn 1; 3 Widerstandsbahn 2; 4 Schleiferarm mit Schleifern, 5 elektrischer Anschluss.....	18
Abbildung 17	Dehnungsmessstreifen DMS (aus Wikipedia).....	18
Abbildung 18	Drehmomentsensor; 1 Anzeigegerät; σ Spannungen, M Drehmoment, U_0 Versorgungsspannung, $R_1...R_4$ Dehnmesswiderstände	19
Abbildung 19	Drucksensor von Bosch.....	20
Abbildung 20	Drucksensor von Bosch, aufgebaut auf einem hohlen Glaskörper mit Druckanschluss auf der Pin-Seite des Gehäuses	20
Abbildung 21	Hitzdrahtanemometer (aus Wikipedia)	21
Abbildung 22	Erste Generation von Hitzdrahtanemometern für die Luftmengenbestimmung beim Motor 1- Widerstand zur Temperaturkompensation; 2 Sensorring mit Hitzdraht, 3 Messwiderstand; Q_M Luftmassenstrom.....	22

Einleitung

Abbildung 23	Anemometer in Mikrotechnik, im inneren Bild ist der Chip zu sehen, der eine Heizzone und die beiden Temperatursensoren enthält23
Abbildung 24	Kapazitive Sensorprinzipien24
Abbildung 25	Prinzip eines kapazitiven Fingerabdrucksensors25
Abbildung 26	Kapazitiver Beschleunigungssensor25
Abbildung 27	Induktiver Sensor nach dem Wirbelstromprinzip (Abbildung der Firma Turck).....26
Abbildung 28	Drehzahlsensor der Firma AB Elektronik26
Abbildung 29	Quarzkristall27
Abbildung 30	Der Piezoeffekt beim Quarz (Reif 2010, S. 101)28
Abbildung 31	Elementarzelle des Bariumtitanats (aus Wikipedia), das Ti-Ion befindet sich real etwas außerhalb des Zentrums28
Abbildung 32	Polymerstruktur von PVDF, grün die negativen Fluor-Ionen, hell die positiven H-Ionen, dunkel die C-Ionen29
Abbildung 33	Kraftsensor von Kistler30
Abbildung 34	Sensor zur Bestimmung des Fahrzeuggewichts im laufenden Verkehr (Kistler)30
Abbildung 35	typische Messwerte des Sensors31
Abbildung 36	Klopfsensor von Bosch, 1 Piezokeramischer Ring, 2 Seismische Masse, 3 Gehäuse, 4 Schraube, 5 Kontaktierung, 6 elektrischer Anschluss, 7 Motorblock, V Vibrationen31
Abbildung 37	Piezoelektrischer Beschleunigungssensor, a im Ruhezustand, b bei Beschleunigung a, 1 Piezokeramisches Bimorph-Biegeelement, U_A Messspannung32
Abbildung 38	Piezoelektrischer Beschleunigungssensor mit zwei Biegeelementen (1) zur gleichzeitigen Messung in zwei Richtungen.....33
Abbildung 39	Typischer Aufbau pyroelektrischer Sensoren.....34
Abbildung 40	Typischer Aufbau eines Bewegungsmelders.....34
Abbildung 41	Aufbau zum Hall-Effekt.....35
Abbildung 42	Blockschaltbild eines integrierten Hall-Sensors36
Abbildung 43	Prinzip der Feldplatte37
Abbildung 44	Eigenschaften von Feldplatten37
Abbildung 45	Feldplattensensor mit 2 Feldplatten und Magnet in einem Gehäuse, gezeigt wird die Erkennung eines vorbeibewegten externen Magneten.....38
Abbildung 46	Drehzahlmessung mit Feldplatte38
Abbildung 47	Typische Diodenkennlinie, eingezeichnet ist auch die Temperaturabhängigkeit; der bei negativer Spannung entstehende Sperrstrom ist so klein, dass hier auf ein Einzeichnen verzichtet wurde39

Abbildung 48	Typische Kennlinie einer Photodiode, die eingezeichneten Arbeitsgeraden interessieren hier nicht	40
Abbildung 49	Empfindlichkeit einer typischen Photodiode.....	40
Abbildung 50	Regensensor: 1 Regentropfen; 2 Windschutzscheibe; 3 Umgebungslichtsensor;4 Photodiode, 5 in die Ferne gerichteter Lichtsensor; 6 Leuchtdiode	41
Abbildung 51	ein historischer 1-Bit Speicher (Relais) im Vergleich mit einem 16 MBit IC.....	42
Abbildung 52	ein Manometer aus einem alten Physikbuch, ein typische Beispiel für Feinwerktechnik.....	42
Abbildung 53	Schnitt durch Multilayer-Platine, man erkennt IC-Anschlüsse, Leiterbahnen und Durchkontaktierungen	43
Abbildung 54	Ausschnitt aus einer bestückten Platine, man sieht IC und Widerstände in surface mount technology	44
Abbildung 55	Chip im Gehäuse, die Verbindungsstreifen an den Außenanschlüssen werden nach Montage auf der Platine entfernt.....	44
Abbildung 56	Ablauf der Planartechnik zur lokalen Oberflächenveränderung durch Photolithographie.....	46
Abbildung 57	Chip im Gehäuse, noch nicht gebondet.....	47
Abbildung 58	Ausschnitt aus dem vorigen Bild.....	47
Abbildung 59	Prozessablauf in der Oberflächenmikromechanik	48
Abbildung 60	Strukturierung von Opferschichten (Uni Freiburg)	48
Abbildung 61	Spiegelarray zur digitalen Bildprojektion: a) Spiegelemente, b) abgelöstes Spiegelement und c) Detailansicht der Aufhängung.....	48
Abbildung 62	Ein Beschleunigungssensor, die schwere Masse in der Mitte hängt frei an den beiden linken Stegen.....	49
Abbildung 63	Aufbau auf einer Dickschichtschaltung, die schmalen, schwarzen Strukturen sind integrierte Widerstände.....	50
Abbildung 64	Aufbau eines Flachbildschirms mit Dünnschichttransistoren.....	50
Abbildung 65	Fenster des Programms Citavi mit bibliographischen Angaben zu einer Quelle.....	51
Abbildung 66	Citavi-Fenster mit Zitaten	51

1 Einleitung

1.1 Bedeutung und Ziele der Lehrveranstaltung

Heutige Technik ist ohne Sensoren undenkbar. Sie prägen die Produktion, das Automobil, den Haushalt, die Kommunikation, die Audio- und Videotechnik und die Spieltechnik. Dies hat nicht nur technische, sondern auch wirtschaftliche und gesellschaftliche Auswirkungen. Prüfpersonen werden durch Bildverarbeitungssysteme ersetzt, Fachkräfte durch sensorgesteuerte Roboter. Automobile können von unerfahrenen Personen sicherer betrieben werden. Sensoren in der Motor-Steuerung reduzieren den Kraftstoffverbrauch, Sensoren in Wasch- und Spülmaschinen den Verbrauch von Wasser, Strom und Reinigungsmitteln.

Wegen dieser großen Bedeutung ist es gerade an der Schnittstelle zwischen Technik und Wirtschaft wichtig, die Möglichkeiten eines Sensoreinsatzes abschätzen zu können.

Mit dieser Lehrveranstaltung sollen in der Lage versetzt werden, in ihrer späteren Tätigkeit für eine technische Problemstellung die am Markt befindlichen Sensoren auszuwählen und zu bewerten, daraus einen Lösungsvorschlag zu entwickeln und diesen zu präsentieren. Dazu sollen sie jetzt den Einsatz von Sensoren an einem konkreten Beispiel selbst studieren und die Ergebnisse vortragen. Durch die Vorträge Ihrer Kommilitoninnen und Kommilitonen erhalten sie einen größeren Überblick.

1.2 Aufbau der Lehrveranstaltung

Im ersten Teil der Lehrveranstaltung werden Sie mit einigen grundlegenden Sensoren und Sensorprinzipien vertraut gemacht.

In einem zweiten Teil werden Sie gemeinsam mit dem Lehrenden Themen suchen und festlegen, zu denen Sie mittels Studium von Fachliteratur, Patenten, Firmenschriften und Firmenunterlagen und eventuell durch Gespräche mit Experten die sensortechnischen Lösungen erarbeiten.

In einem dritten Teil werden Sie diese Ergebnisse in einer etwa 20-minütigen Präsentation in der Lehrveranstaltung vortragen.

Die Veranstaltung hat daher folgende drei Teile:

Vorbereitung

Vor der ersten Präsenz haben Sie die Lerneinheit durchgearbeitet.

1. Präsenz

In der ersten Präsenzveranstaltung werden offene Fragen zur Lerneinheit besprochen, die Vortragsthemen diskutiert und vergeben.

2. Präsenz

In der zweiten Präsenz werden die Referate gehalten.

Beim Studium der Unterlagen müssen Sie davon ausgehen, dass viele Informationen nur aus englischsprachigen Quellen gewonnen werden können.

Die Themen können aus allen Bereichen der Anwendung von Sensoren stammen.

Beispiele können sein:

- Übersicht über Sensoranwendungen im Automotive-Bereich
- Sensoren für die Motorsteuerung im Automobil
- Sensoren für den Komfort im Automobil
- Sensoren für die Sicherheit im Automobil
- Drehzahlsensoren für die Getriebesteuerung
- Sensoren für das Antiblockiersystem
- Ultraschall-Abstandssensoren für die Rückraumüberwachung
- Radarsensoren für die Vorderraumüberwachung

- Übersicht über Sensoranwendungen im Haushalt
- Sensoren in Wasch- und Spülmaschinen
- Sensoren in Herden und Backöfen
- Sensoren in Kleingeräten (Bügeleisen, Abzugshauben, Staubsaugern)
- Sensor für die Verkalkungserkennung in Spülmaschinen

- Übersicht über Sensoranwendungen in der Freizeit- und Spiele-Industrie
- Sensoren in Spielkonsolen
- Sensoren in Mobiltelefonen

Es sind also Übersichtsthemen über einen ganzen Bereich oder über Teilbereiche, aber auch Vorträge über spezielle Einzeltechnologien möglich.

In dieser Lerneinheit werden Ihnen einige grundlegende Sensorprinzipien und einige moderne Herstellverfahren vorgestellt. Dies soll eine Grundlage schaffen, damit Sie sich in die Vortragsthemen einarbeiten können.

1.3 Übersicht über die Lerneinheit

Die Lerneinheit ist in mehrere Teile gegliedert. Zu Beginn werden einige Sensorprinzipien behandelt. Sie lernen also an einigen Beispielen, wie Sensoren funktionieren, auf welchen physikalischen Grundlagen sie beruhen. Danach werden einige Herstellverfahren für Sensoren behandelt. Damit sind Sie in der Lage, moderne Sensoren, wie sie beispielsweise in der Automobilindustrie eingesetzt werden, zu verstehen. Allerdings werden die Anwendungen von Sensoren in dieser Lerneinheit nur in Ansätzen behandelt. Es ist ja das Ziel, dass Sie sich einen Anwendungsbereich für Ihre Präsentation selbst genauer anschauen sollen. Um Ihnen dabei eine Hilfe zu geben, ist noch ein kleines Kapitel über Literatursuche und -verwaltung angefügt.

2 Sensoren

Heutige Technik ohne Sensoren ist undenkbar.

Im Automobil messen sie

- Drehzahl oder Geschwindigkeit, um den Motor treibstoffsparend zu betreiben,
- Sauerstoffgehalt im Abgas, um den Motor umweltverträglicher zu betreiben,
- Temperatur des Fahrgastraums, um die Klimaanlage zu steuern,
- Schadstoffgehalt der Umgebungsluft, um die Frischluftzufuhr zu regulieren,
- Abstand und Geschwindigkeit zu vorausfahrenden Fahrzeugen, um die Fahrsicherheit zu erhöhen,
- die Lidschlaghäufigkeit von Fahrerinnen und Fahrern, um Sekundenschlaf vorzubeugen

und vieles mehr.

In Haushaltsgeräten wie Wasch- und Spülmaschinen werden Temperatur, Verschmutzungsgrad und Durchflussmenge des Wassers ermittelt. Sensoren ermitteln, ob Gläser einen Kalkschleier beim Spülen bekommen.

In der Automatisierungstechnik und in der Qualitätskontrolle werden Fertigungs- und Produkt-Kenngrößen gemessen.

Und, dies hat in den letzten Jahren enorm zugenommen, in der Kommunikations- und Unterhaltungsbranche haben Sensoren für geradezu revolutionär neue Möglichkeiten gesorgt. Sie messen, ob ein Laptop vom Tisch fällt, so dass die Festplatte gesichert werden kann. Sie bestimmen die Neigung eines Displays, damit automatisch zwischen Hoch- und Querdarstellung umgeschaltet werden kann. In den Fernbedienungen von Spielestationen ermitteln sie die momentanen Bewegungsrichtungen und Beschleunigungen, damit möglichst wirklichkeitsnah gespielt werden kann.

Entsprechendes gilt für die Videotechnik. Kostete vor 30 Jahren eine Röhrenkamera noch mehrere Tausend DM und wog einige Kilogramm, so gibt es heute Mobiltelefone unter 100 Gramm, die zwei Kameras enthalten.

Nach einer aktuellen Marktstudie erreichte der weltweite Sensormarkt im Jahr 2008 über 50 Mrd. US \$, im Jahr 2010 wird mit über 60 Mrd. \$ gerechnet. Dabei entfällt der Löwenanteil auf die Automobilsensorik.

Consulting IntechnoConsulting recently released market report, the global sensor market volume in 2008 to 50.6 billion U.S. dollars, estimated the global sensor market in 2010 reached more than 60 billion U.S. dollars. Worldwide, the fastest growing sensor market is still Car Market.¹

Wieso haben nun Sensoren eine derartig große Bedeutung erlangt?

Ein wesentlicher Grund ist die Weiterentwicklung der Fertigungstechnik. Im letzten Jahrhundert wurden Sensoren in sogenannter Feinwerktechnik hergestellt.

¹ The global sensor market in 2010 reached 60 billion U.S. \$, 24.07.2010, S. 1

Die eigentlichen Messwandler, beispielsweise elektrische Widerstände aus Platindraht zur Temperaturmessung, wurden aus dünnen Drähten gewickelt und in Glasgehäuse montiert. Es wurde geschweißt, gelötet. Diese Elemente wurden dann mit elektronischen Bausteinen und Schaltungen und mit Anzeigeelementen verbunden, um ein elektronisches Thermometer zu erhalten. Jeder Messwandler, jede Schaltung musste einzeln bearbeitet und gefügt werden. Heute kann man durch mikroelektronische Fertigungstechniken die Sensorelemente und die Elektronik, teilweise einschließlich eines Mikroprozessors, auf einem Chip unterbringen. Und diese Mikrofertigungsverfahren erlauben es auch noch, Tausende solcher Chips auf einer Halbleiterscheibe, einem sogenannten Wafer, gleichzeitig zu fabrizieren. Diese neuen Techniken arbeiten aber nur bei großen Stückzahlen wirtschaftlich da die Fixkosten bei Mikrofertigungsverfahren enorm hoch sind. Heute hat teilweise ein sich selbst verstärkender Kreislauf eingesetzt:

die Anwendungsfelder für Kamera-Chips oder hochintegrierte Sensoren werden größer => höhere Investitionen in Mikrofertigungstechniken werden rentabler => die Stückkosten für die Sensoren sinken => neue Anwendungsfelder werden gefunden =>...

Die Bedeutung von Sensoren für die künftige technologische Entwicklung kann also kaum überschätzt werden.

2.1 Was ist ein Sensor?

Üblicherweise wird ein Sensor folgendermaßen definiert:

Ein Sensor ist ein Bauteil, das physikalische, chemische biologische oder sonstige Messgrößen in eine elektrische Größe umwandelt.

Beispiele sind

- ein Thermowiderstand wie der Pt100, der eine Temperatur in einen elektrischen Widerstandswert wandelt
- ein Piezokristall, der einen mechanischen Druck in eine elektrische Ladung wandelt,
- eine Photodiode, die eine auftreffende Lichtintensität in einen elektrischen Strom wandelt.

Ein Quecksilberthermometer, das die Temperatur in die Länge eines Quecksilberfadens umwandelt, ist nach dieser Definition kein Sensor. Es ist ein Messwandler.

Wird ein Sensor mit einer Auswerteelektronik verbunden, so kann man von einem Sensorsystem sprechen. Allerdings wird die Unterscheidung zwischen Sensor und Sensorsystem immer unschärfer, da, wie schon erwähnt, heute Sensoren und signalverarbeitende Elektronik auf einem einzigen Halbleiterchip integriert werden können.

Da die Sensortechnik so ein großes Gebiet umfasst, steht ihre Gliederung vor folgendem Problem:

Man kann nach der Messgröße gliedern. Dann wird geschaut, mit welchen Sensoren, mit welchen grundlegenden Umwandlungsprinzipien lassen sich Temperaturen, Drücke, Abstände, Lichtintensitäten usw. messen.

Sensoren

Man kann aber auch nach dem zugrundeliegenden Wandlungsprinzip unterteilen. Also: welche Messgrößen lassen sich mit Widerstandssensoren, mit piezoelektrischen Sensoren, mit optischen Sensoren usw. erfassen.

Man kann aber auch nach dem Anwendungsfeld gliedern: Welche Sensoren werden im Automobil, im Haushalt, in der industriellen Fertigung usw. eingesetzt.

Ich werde, was vielleicht etwas ungeordnet erscheint, in den nächsten Kapiteln nach den ersten beiden Ordnungsprinzipien vorgehen. So werden im Kapitel „Temperaturmessungen“ unterschiedliche Sensoren und Prinzipien zur Temperaturmessung vorgestellt. Im Kapitel „Piezo- und Pyroelektrische Sensoren“ werden Piezo- und Pyroeffekt vorgestellt und dann verschiedene Messgrößen erläutert.

2.2 Anwendungsbereiche von Sensoren

Auf die Anwendungsbereiche werde ich hier nur kurz eingehen.

Die Abbildung 2 zeigt eine Darstellung der Firma Bosch, etwa aus dem Jahr 2006, mit den damaligen Einsatzfeldern von Sensoren im Automobil. In der Zwischenzeit sind noch weitere Felder dazugekommen.

Im Bereich der Haushaltstechnik schreibt die Firma emz-Hanauer auf ihrer Webseite:



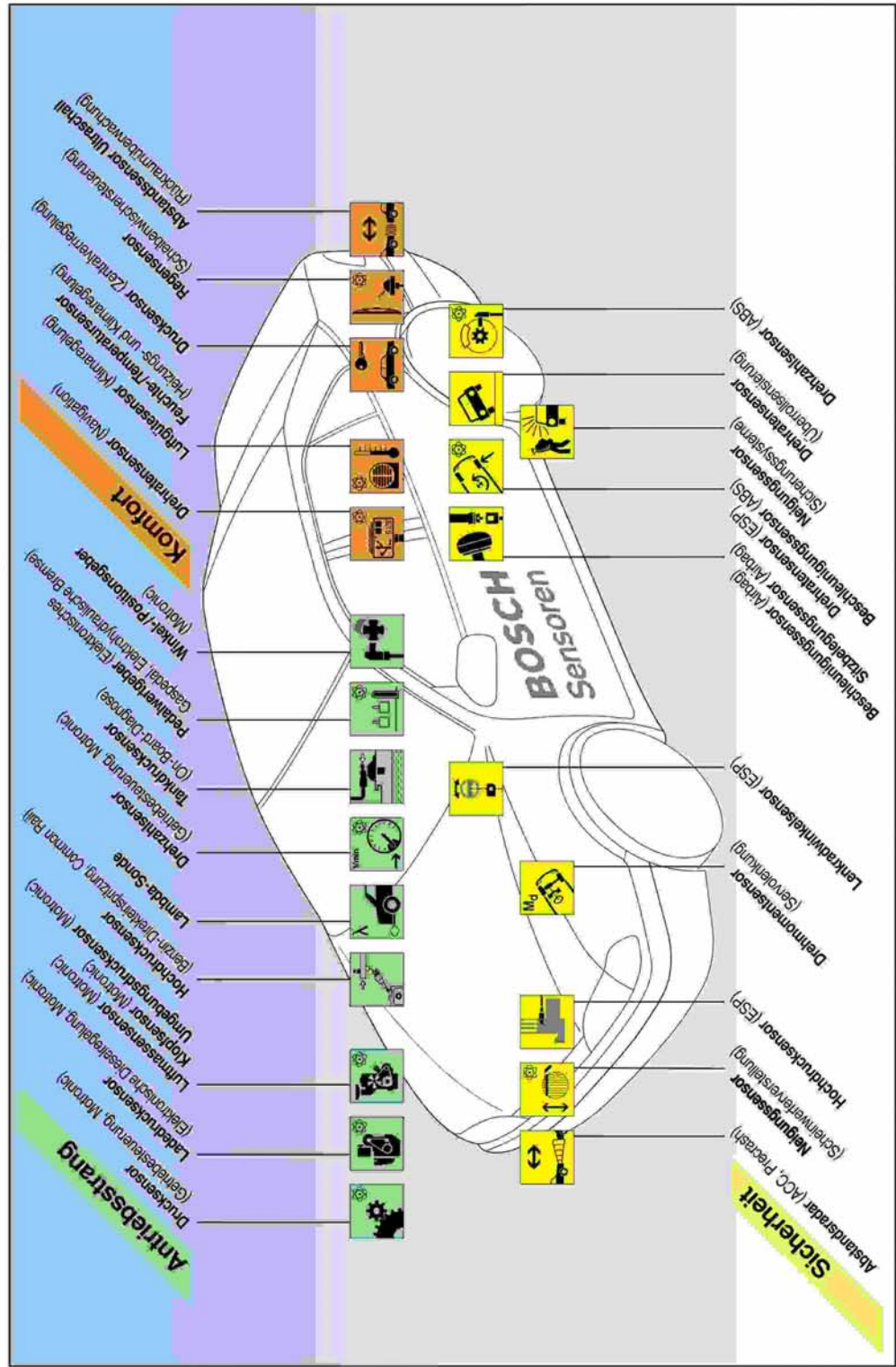
Optimum process control by sensors
for washing machines and dishwashers

- > Saves time, energy, water and detergent thanks to optimum control of the various process steps
- > improved washing result by detection of the washing substances, e.g. water turbidity
- > more gentle cleaning
better cleaning effect by machine for crystal glasses and hand wash
- > our sensors are upwardly compatible due to the pin-compatible plug-and-socket connectors and the installation geometry

» [Temperature sensor](#) » [Combination sensor](#)
» [Turbidity sensor](#) » [Position/ motion sensor](#)

Abbildung 1 Sensoren für Wasch- und Spülmaschinen

Bosch-Sensoren für Kraftfahrzeug - Anwendungen



© Alle Rechte bei Robert Bosch GmbH; auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen. Jede Verfügungsbefugnis, wie Kopier- und Weitergaberecht, bei uns

Temperaturmessung

Aber dies ist nur ein kleiner Teilbereich von Sensoranwendungen in Haus und Haushalt. (Dieses Gebiet wird übrigens auch als „home automation“ oder „domotics“ bezeichnet.) Hierzu zählen unter anderem:

- Heizung, Ventilation, Klimaanlage
- Beleuchtung
- Sicherheit
- Robotik im Haushalt
- Haushaltsgeräte

(Im Jahr 2007 wurden übrigens im Labor für Sensortechnik der FH Münster Diplomarbeiten durchgeführt, in denen eine Kochherdüberwachung entwickelt wurde. Hier wurde mit Sensoren eine Anwesenheitskontrolle in der Küche durchgeführt. Ist bei eingeschaltetem Herd die Küche längere Zeit leer, wird erst ein Warnnton ausgegeben, dann der Herd abgeschaltet. Ziel ist, leicht dementen Personen länger ein selbstständiges Leben in der eigenen Wohnung zu ermöglichen.)

3 Temperaturmessung

Temperatur ist wohl die am häufigsten gemessene Größe. Gleichzeitig hängt fast jedes Naturgesetz von der Temperatur ab. Daher gibt es eine sehr große Anzahl sowohl von Sensorprinzipien als auch von konkreten Bauformen. In dieser Lerneinheit beschränke ich mich auf Sensoren, deren Widerstand von der Temperatur abhängt (dazu gehören Pt100, Halbleitersensoren, Heiß- und Kaltleiter) und auf Thermoelemente, die eine temperaturabhängige Spannung liefern.

3.1 Pt100 und ähnliche

Der elektrische Widerstand von Metallen hängt bekanntermaßen von der Temperatur ab. In sehr guter Näherung gilt dabei für den Widerstand $R(T)$ bei einer Temperatur T :

$$R(T) = R_0(1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2)$$

wobei R_0 der Widerstandswert bei der Temperatur T_0 ist. Die beiden Größen α und β sind der lineare und der quadratische Temperaturkoeffizient. In vielen Fällen reicht die lineare Näherung, so dass gilt:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha(T - T_0))$$

Der lineare Koeffizient ist für einige Metalle in folgender Tabelle aufgeführt:

Reine Metalle	α in K^{-1}
Aluminium (99,5 %)	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Blei	$4,22 \cdot 10^{-3}$
Eisen (rein)	$6,57 \cdot 10^{-3}$
Gold	$3,98 \cdot 10^{-3}$
Kupfer (99,9 %)	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Nickel	$6,7 \cdot 10^{-3}$
Platin	$3,88 \cdot 10^{-3}$
Quecksilber	$0,9 \cdot 10^{-3}$
Silber	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Tantal	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Wolfram	$4,8 \cdot 10^{-3}$

Im Grunde könnte jedes Metall zum Bau eines Temperatursensors genutzt werden. Wenn man aber berücksichtigt, dass ein Sensor langzeitstabil und chemisch stabil sein soll und das Material leicht zu bearbeiten sein soll, dann bleiben nicht mehr viele Metalle übrig. In der Vergangenheit wurde meist Platin, trotz seines hohen Preises, gewählt. Es wurde ein dünner Draht zu einer Spule gewickelt, so dass der Sensorwiderstand bei 0°C gerade $100\ \Omega$ beträgt. Bei 100°C müsste der Sensor dann also den Widerstand $138,8\ \Omega$ haben.

Für Präzisionsmessungen mit Pt100-Sensoren wurde eine eigene DIN-Norm geschaffen, die DIN EN 60751. Hier werden die Widerstandswerte als Funktion der Temperatur in $0,1^\circ\text{C}$ Schritten angegeben. Bei $T=100^\circ\text{C}$ erwartet man $R=138,51\ \Omega$, bei $T=200^\circ\text{C}$ $R=175,86\ \Omega$. Man sieht also, dass hier die lineare Näherung schon zu kleinen Abweichungen führt.

Übung:

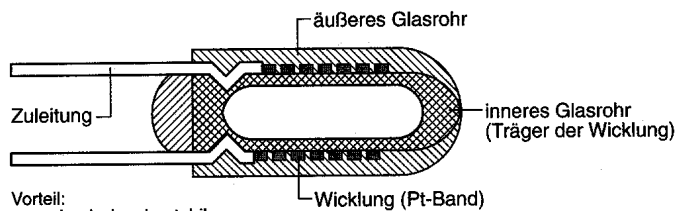
Welche Widerstandswerte erwarten Sie bei linearer Näherung bei 100 bzw. 200°C ?

Welche Temperatur berechnet man (fälschlicherweise), wenn der Pt100-Sensor der Wert $R=175,86\ \Omega$ zeigt und man mit linearer Näherung arbeitet?

In der Vergangenheit wurden Pt100 meist aus dünnem Draht gewickelt. Typische Aufbauformen zeigt die folgende Abbildung 3.

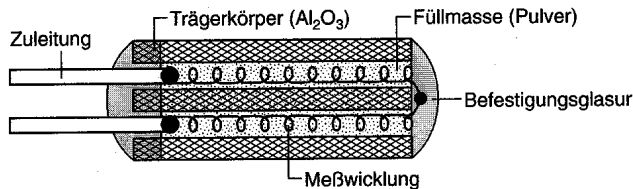
Heute werden solche Sensoren häufig in Dünnschichttechnik erstellt. Sie bestehen dann aus einem mäanderförmigen Leiter auf einem Keramiksubstrat. Die Schichtdicke beträgt typischerweise Bruchteile eines Mikrometers. Solche Sensoren können in großer Zahl gleichzeitig auf einem Substrat erzeugt werden, so dass die Herstellkosten gering sind. (Abbildung 4)

Temperaturmessung



Vorteil:
- mechanisch sehr stabil

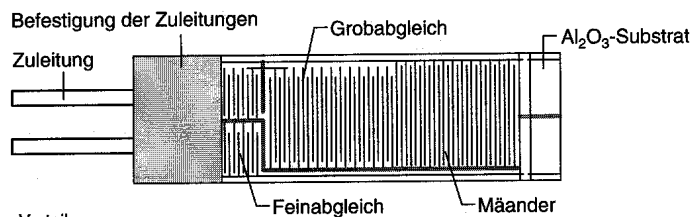
Nachteile:
- Wärmeausdehnung des Glases überträgt sich auf die Meßwicklung (Hysterese), daher Spezialgläser erforderlich
- evtl. parasitäre elektr. Leitfähigkeit des Glases bei hohen Temperaturen



Vorteil:
- freie Wärmeausdehnung des Pt-Drahtes (keine Hysterese)

Nachteile:
- geringere Vibrationsfestigkeit als in a)
- Bruchgefahr

Abbildung 3 Aufbau von konventionellen Pt100-Sensoren



Vorteil:
- Kostengünstig
- einfache Trimmung

Nachteile:
- Hysterese wegen Wärmeausdehnung des Substrats (wie a)
- bei Temperaturwechsel kann die Haftung der Dünnschicht auf dem Substrat schlechter werden

Abbildung 4 Pt100 in Dünnschichttechnik

Die Dünnschichttechnik macht auch weitere Metalle für die Temperaturmessung nutzbar. So wurden in den letzten Jahren verstärkt Sensoren aus Nickel auf den Markt gebracht, die Ni100-Sensoren. Sie sind preisgünstiger als Pt100, erfüllen aber nicht die gleichen Genauigkeitsanforderungen.

3.2 Halbleitersensoren

Elektrische Widerstände lassen sich auch aus halbleitendem Material fertigen, und diese sind ebenfalls temperaturabhängig. Solche Sensoren werden häufig in der „spreading resistance“ Technik hergestellt (Abbildung 5).

Eine Si-Scheibe mit einer Dicke von typischerweise einigen 100µm ist auf der Rückseite metallisiert, die Vorderseite ist mit einer Isolationsschicht belegt. In diesem Isolator befindet sich eine kleine Öffnung mit Durchmesser d , typischerweise einige µm groß. Diese Öffnung ist metallisiert. Nun wird der Widerstand zwischen dieser metallisierten Öffnung und der Rückseite gemessen. Er ist unabhängig von

der Dicke t der Si-Scheibe und hängt nur von d ab. Dieses merkwürdige Verhalten lässt sich anschaulich verstehen. Wird an der Widerstand eine Spannung angelegt, so gehen von der metallisierten Öffnung elektrische Feldlinien zur Rückseite. Diese sind in der Abbildung skizziert. Nimmt t zu, dann müssen die Elektronen einen längeren Weg zurücklegen, der Widerstand nimmt also zu. Andererseits können sich jetzt die Feldlinien, auf denen sich die Elektronen ja bewegen, weiter ausdehnen. Damit steht den Elektronen eine größere Querschnittsfläche zur Verfügung. Größerer Querschnitt bedeutet aber niedrigerer Widerstand. Eine genaue Rechnung zeigt, dass sich beide Effekte gerade aufheben. Der Widerstand wird unabhängig von t .

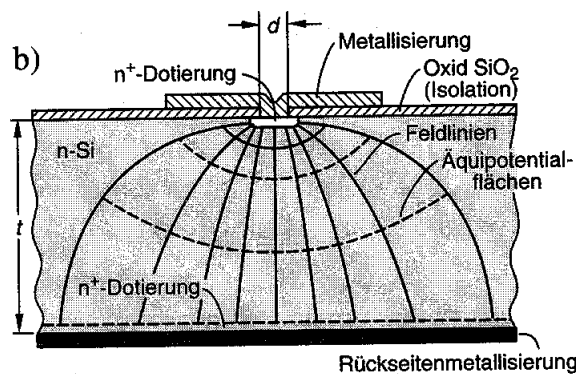


Abbildung 5 Spreading Resistance Prinzip, Schnitt durch einen Si-Wafer

Der Aufbau hat einen kleinen Nachteil: der Widerstand hängt ein wenig von der Polarität der angelegten Spannung ab. Die obere und die untere Metallisierung haben ja eine unterschiedliche Form. Dies führt beim Kontakt von Metall zum Halbleiter zu etwas unterschiedlichen Effekten. Meist werden diese Sensoren daher **symmetrischer** aufgebaut.

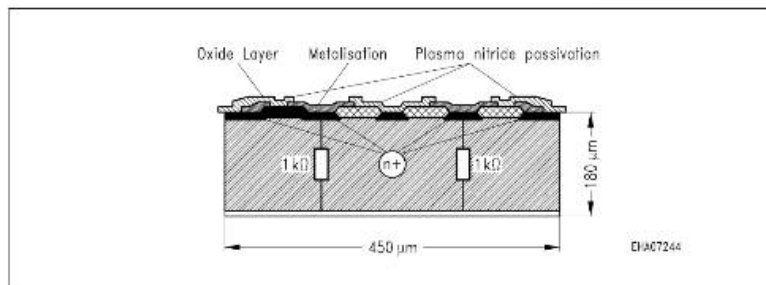
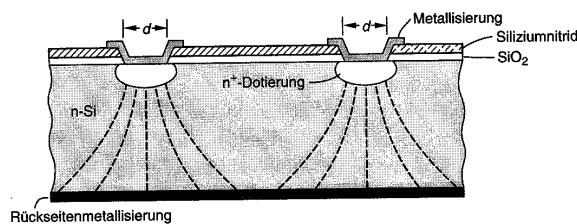


Figure 22 Schematic Cross Section through the Temperature Sensor KTY Chip

²Abbildung 6 Symmetrischer Spreading-Resistance Aufbau

² Infineon technologies o.J.

Temperaturmessung

Dies hat den weiteren Vorteil, dass jetzt beide Kontakte von der gleichen Seite aus angeschlossen werden können.

Diese Sensoren sind also im wesentlichen aus Silizium aufgebaut. Dieses Material dient aber auch zum Bau von integrierten Schaltungen, beispielsweise für analoge Verstärker oder digitale Schaltungen. Die Sensoren lassen sich also gut mit der weiteren Elektronik auf einem Chip integrieren.

3.3 Heiß- und Kaltleiter

Üblicherweise sind Keramiken aus nichtleitenden Materialien aufgebaut. Sie sollten also für sensorische Anwendungen ungeeignet sein. Allerdings gibt es einige oxidische Keramiken mit geringer Leitfähigkeit, die sehr stark temperaturabhängig ist. Die Leitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur zu, der Widerstand also ab. Sie werden als Heißleiter bezeichnet, auf Englisch als NTC (negative temperature coefficient). Ihr Widerstandswert ändert sich etwa zehnmal stärker mit der Temperatur als der von Metallen.

Eine besondere Gruppe von oxidischen Keramiken ändert bei einer bestimmten kritischen Temperatur ihre innere Struktur. Dies führt zu einem drastischen Anstieg des Widerstands in der Nähe dieser kritischen Temperatur. Da der Widerstand hier mit der Temperatur zunimmt, heißen sie Kaltleiter, englisch PTC (positive temperature coefficient).

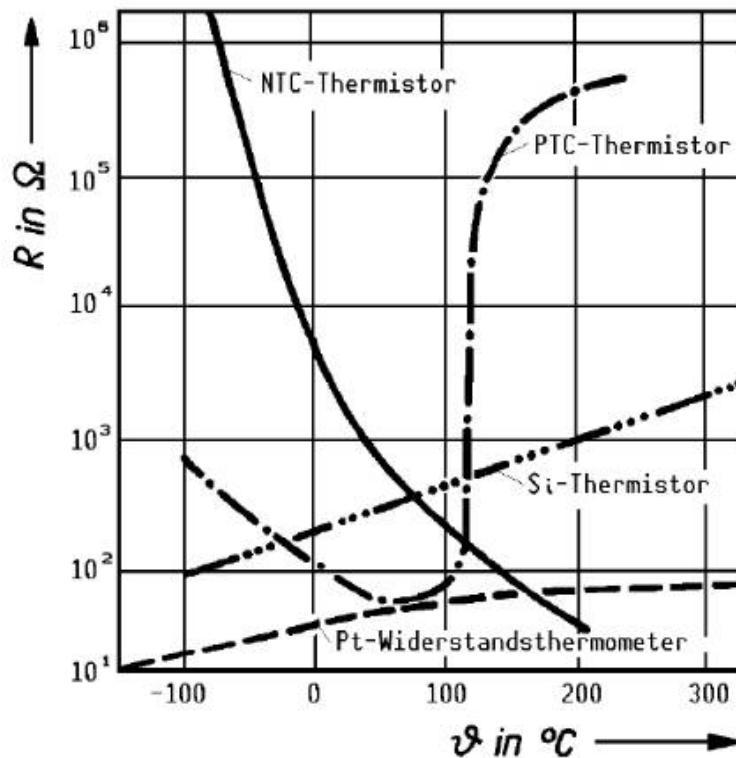


Abbildung 7 Temperaturabhängigkeit verschiedener Sensoren: Pt= Platin-Sensor; Si-Thermistor= Silizium-Sensor; PTC-Thermistor = PTC, NTC-Thermistor=NTC;³

³ Hesse, Schnell 2009, S. 238

3.4 Thermoelemente

Einen ganz anderen physikalischen Effekt nutzen wir bei den Thermolementen aus: den thermoelektrischen Effekt. Werden zwei elektrische Leiter miteinander verbunden, so können Elektronen vom einen Leiter in den anderen übertreten. Die Energie, die die Elektronen dazu benötigen, ist aber materialabhängig. Also werden aus dem Material mit der hohen Austrittsenergie wenig Elektronen übertreten, aus dem Material mit der niedrigen dagegen viele. Die beiden Stoffe laden sich auf. Werden die beiden Leiter an beiden Enden miteinander verbunden, entsteht ein Kreis.

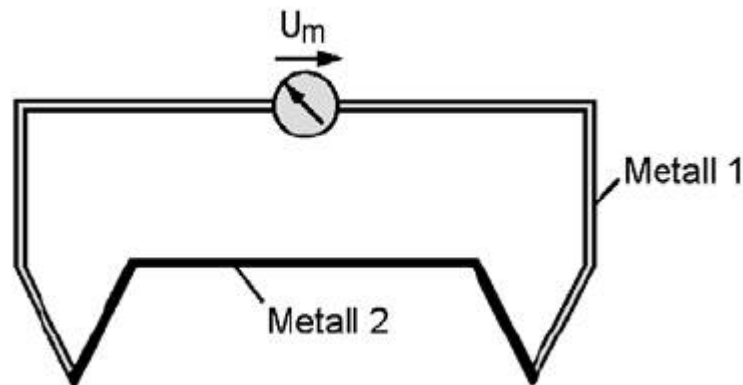


Abbildung 8 Prinzip der thermoelektrischen Messung⁴

Schaltet man in einen Leiter ein Voltmeter, wird aber die Spannung 0 gemessen, weil sich die Spannungen an beiden Verbindungspunkten gerade aufheben. Allerdings ist der Effekt temperaturabhängig: je höher die Temperatur, desto leichter treten die Elektronen über. Die gemessene Spannung hängt von den Temperaturen ab, und zwar in sehr guter Näherung linear von der Temperaturdifferenz. Und sie hängt ab von der Differenz zweier Materialkonstanten, der thermoelektrischen Koeffizienten der beiden Materialien.

Hat nun im obigen Bild die linke Verbindung die Temperatur T_1 und die rechte die Temperatur T_0 , und haben die Metalle 1 bzw. 2 die Koeffizienten α_1 und α_2 , dann gilt für die gemessene Spannung U :

$$U = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_1 - T_0)$$

Üblicherweise wird die Vergleichstemperatur $T_0 = 0^\circ\text{C}$ gewählt, dann erhält man T_1 direkt in Grad Celsius.

Die gebräuchlichsten Paarungen sind einer Norm zusammengefasst worden und werden mit Buchstaben bezeichnet:

⁴ Hesse, Schnell 2009, S. 244

3 Thermopaar-Kennzeichnung durch Buchstaben

Die folgenden Kennbuchstaben sind für die Kombinationen von Thermopaaren festgelegt:

Buchstabe	Thermopaar
R	Platin-13 % Rhodium/Platin
S	Platin-10 % Rhodium/Platin
B	Platin-30 % Rhodium/Platin-6 % Rhodium
J	Eisen/Kupfer-Nickel
T	Kupfer/Kupfer-Nickel
E	Nickel-Chrom/Kupfer-Nickel
K	Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium
N	Nickel-Chrom-Silizium/Nickel-Silizium

Werden edle oder unedle Thermopaare in der vorstehenden Weise gekennzeichnet, so steht der positive Schenkel an erster Stelle.

Abbildung 9 Bezeichnung der Thermopaare ⁵

Sie unterscheiden sich in der Temperaturabhängigkeit und in der maximal möglichen Messtemperatur. So kann der Typ T bis maximal 600°C benutzt werden, der Typ B bis 1800°C. Dabei liefert Typ T beispielsweise bei 100°C die Thermospannung 4,277 mV, Typ B nur 0,033mV.

Es ist oft unpraktisch, dass Thermoelemente nur Temperaturdifferenzen (T_1-T_0) messen können. Die Vergleichstemperatur muss ja entweder auf einem bekannten Wert gehalten werden, beispielsweise 0°C, oder sie muss mit einem weiteren Sensor gemessen werden.

Eine elegante Alternative bieten heute integrierte Schaltungen, die die Signale von Thermoelementen weiterverarbeiten.

So bietet die Firma Maxim (www.maxim-ic.com) den Chip MAX6675 an, der die Thermospannung eines Typ K Elements misst. Auf dem Chip befindet sich ein weiterer Sensor, der die Umgebungstemperatur misst. In der weiteren Signalverarbeitung auf dem Chip wird dies dann berücksichtigt und am Ende ein digitales Ausgangssignal erzeugt.

3.5 Weitere Verfahren

Die Kennlinien von Dioden und Transistoren sind temperaturabhängig. Also können diese Bauteile als Temperatursensoren verwendet werden. Dabei bietet es sich an, diese Halbleiterbauelemente mit Verstärkern und anderen weiteren analogen und/oder digitalen Schaltungen auf einem Chip zu integrieren. Solche Sensoren werden unter anderem von den Firmen Analog Device (www.analog.com) und Maxim (www.maxim-ic.com) angeboten. So liefert der Sensor DS60 von Maxim eine Ausgangsspannung, die linear von der Temperatur abhängt mit 6,25 mV / °C. Es gibt Varianten mit digitalen Ausgangssignalen oder solche, die eine temperaturabhängige Ausgangsfrequenz liefern.

⁵ Norm DIN EN 60584-1, S. 3

Eine eigene, große Gruppe von Temperatursensoren beruhen auf optischen Verfahren. So gibt es Stoffe, deren Farbe von der Temperatur abhängt. Bei anderen Materialien ändert sich die Intensität einer Fluoreszenzstrahlung mit der Temperatur. Aber auf diese optischen Verfahren wird hier nicht weiter eingegangen.

In einem späteren Kapitel wird allerdings noch die pyroelektrische Temperaturmessung behandelt werden.

4 Widerstandssensoren

Der elektrische Widerstand eines Bauteils kann durch eine Vielzahl von Effekten beeinflusst werden. Die Temperaturabhängigkeit wurde ja schon behandelt.

4.1 Drucksensoren /Mikrophone

Eine Anwendung aus dem vorletzten Jahrhundert zeigt die nächste Abbildung: ein Kohlemikrophon. Eine Kapsel enthält dicht gepackte Kohlekörner. Treffen Schallwellen auf, werden die Körner komprimiert und der elektrische Widerstand ändert sich. Bis in die Mitte des letzten Jahrhunderts waren Telefone mit diesen Mikrofonen ausgerüstet.

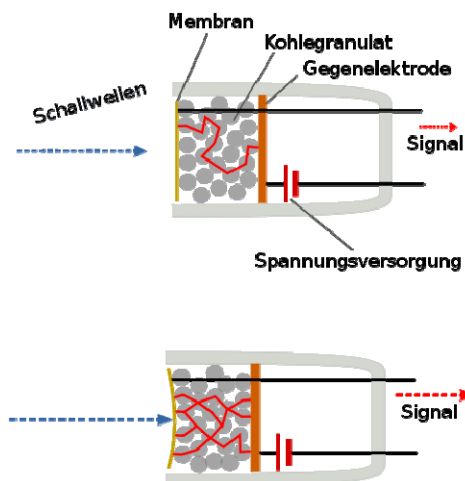


Abbildung 10 Kohlemikrophon, ein Widerstands-Drucksensor

Das Grundprinzip wird heute noch in einfachen Drucksensoren verwendet. Die Kohlekörner werden in eine Gummimischung eingebettet, die dann zu kleinen Scheiben verarbeitet und mit Elektroden versehen werden. Wird diese Gummischeibe zusammengepresst, ändert sich der Widerstand. Solche Sensoren werden beispielsweise zur Kollisionserkennung in mobilen Robotern verwendet.

4.2 Potentiometer

Eine weitere Anwendung in der Sensorik finden einstellbare Widerstände, die Potentiometer. Bei diesen wird ein Schleifer über eine Widerstandsbahn oder –wicklung geführt, der Widerstandswert hängt also von der Schleiferposition ab.

Widerstandssensoren

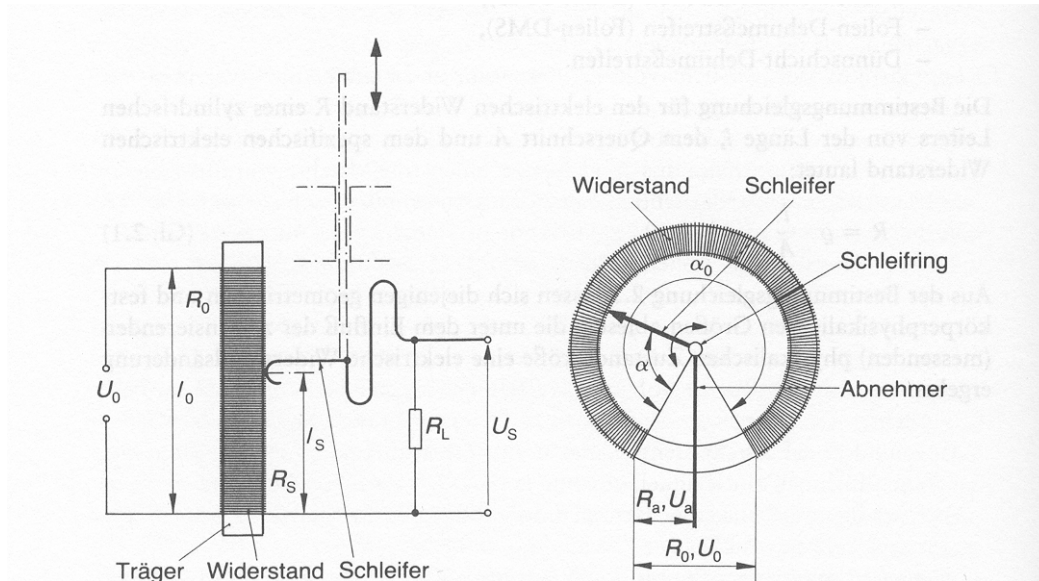


Abbildung 11 Potentiometer als lineare Positions- oder Winkelsensoren

Je nach Bauform können lineare Positionen oder Winkel gemessen werden.

Heute werden die Widerstandsschichten oft in Dickschichttechnik auf einem Keramiksubstrat aufgebracht. Dann kann durch die Form der Widerstandsschicht die Kennlinie des Sensors, also der Zusammenhang von Winkelposition und Widerstand, in weiten Bereichen eingestellt werden.

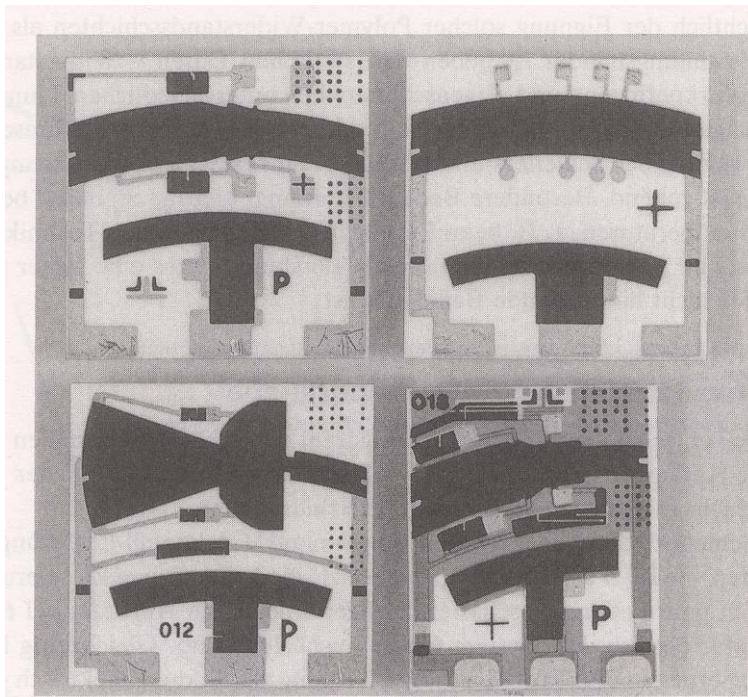


Abbildung 12 Widerstandsschichten für Potentiometer mit nichtlinearen Kennlinien

Solche Positions- oder Winkelsensoren werden unter anderem im Kraftfahrzeug häufig eingesetzt. Im elektronischen Brems- oder Gaspedal oder bei der Bestimmung der Drosselklappenöffnung kommen sie zum Einsatz.



Abbildung 13 Elektronisches Gaspedal mit Potentiometersensor (aus Wikipedia)

Aus Sicherheitsgründen werden gelegentlich 2 Widerstandsschichten verwendet.

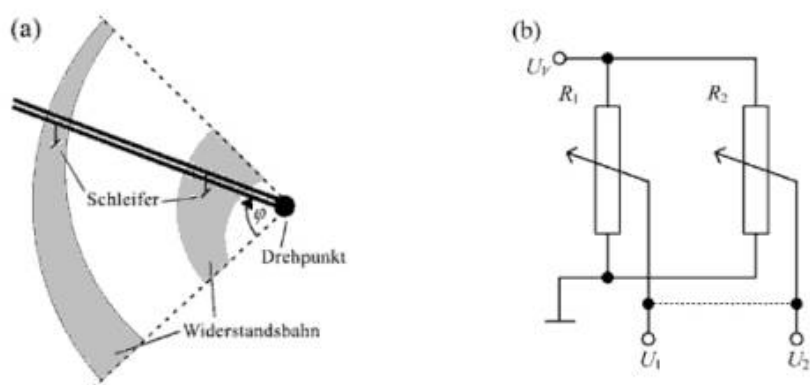


Abbildung 14 Potentiometer mit 2 Widerstandsschichten ⁶

Manche Hersteller setzen statt der, verschleißanfälligeren, Potentiometer berührungsloses Winkelsensoren ein.

⁶ Reif 2007, S. 100

Widerstandssensoren

Die nächsten Abbildungen zeigen einen Füllstandssensor und einen Drosselklappensensor.

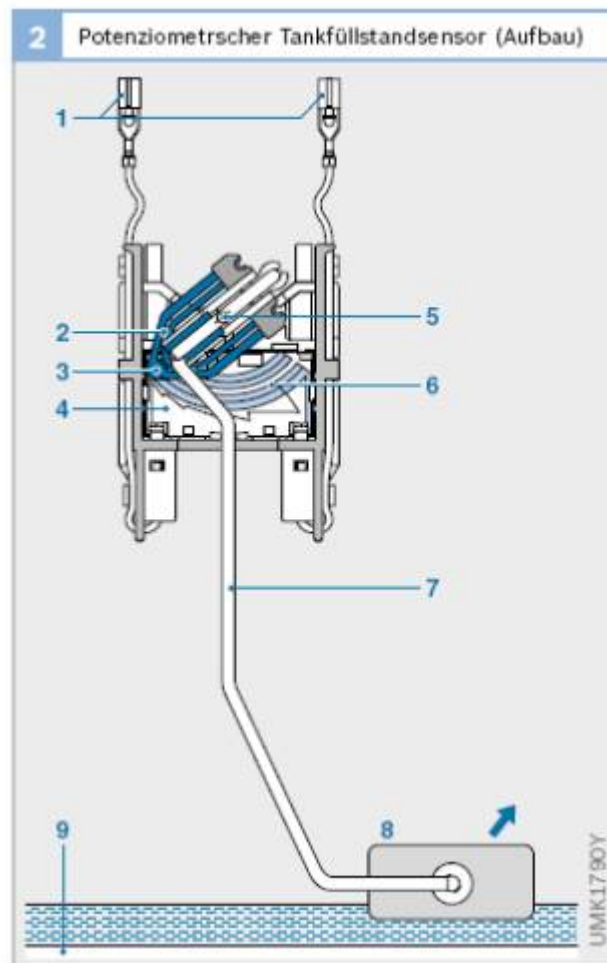


Abbildung 15 Tankfüllstandssensor; 1 Elektrische Anschlüsse; 2 Schleiferfeder; 3 Kontaktniet; 4 Widerstandsplatine; 5 Lagerstift; 6 Doppelkontakt; 7 Schwimmerhebel; 8 Schwimmer; 9 Boden des Kraftstoffbehälters⁷

⁷ Reif 2010, S. 36

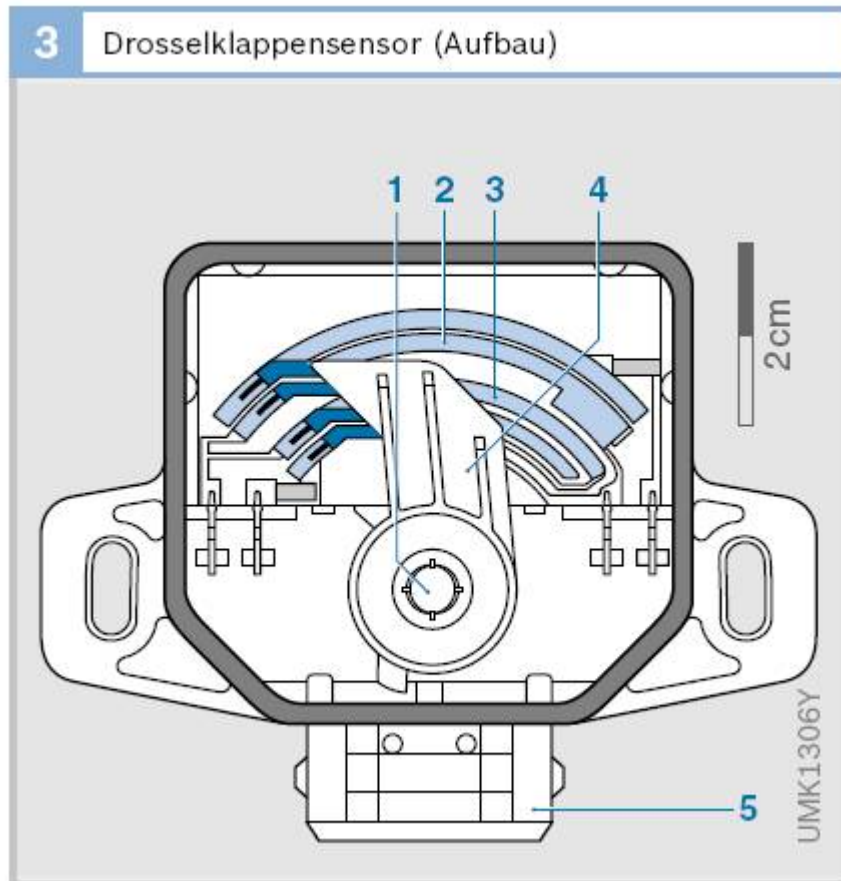


Abbildung 16 Drosselklappensensor; 1 Drosselklappenwelle; 2 Widerstandsbahn 1; 3 Widerstandsbahn 2; 4 Schleiferarm mit Schleifern, 5 elektrischer Anschluss⁸

4.3 Dehnungsmessstreifen

Bekanntlich hat ein Quader mit Fläche A und Länge l aus einem Material mit spezifischen Widerstand ρ den Widerstand R mit

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Wird dieser Quader durch Zug verformt, so wächst l und A wird kleiner. Also wächst der Widerstand. Gleichzeitig ändert sich bei manchen Materialien auch ρ . Dieses Phänomen wird in Dehnungsmessstreifen ausgenutzt.

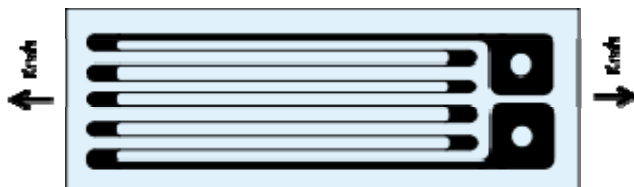


Abbildung 17 Dehnungsmessstreifen DMS (aus Wikipedia)

⁸ Reif 2010, S. 37

Widerstandssensoren

Sie werden meist als Widerstandsmäander in Folien eingebaut und haben vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Werden sie auf Werkstücke mit bekannten elastischen Eigenschaften aufgebracht, lassen sich Kräfte messen. Auf Wellen aufgebracht erlauben sie Torsionsmessungen, bei bekannten elastischen Eigenschaften der Welle auch Drehmomentmessungen. (Abbildung 18)

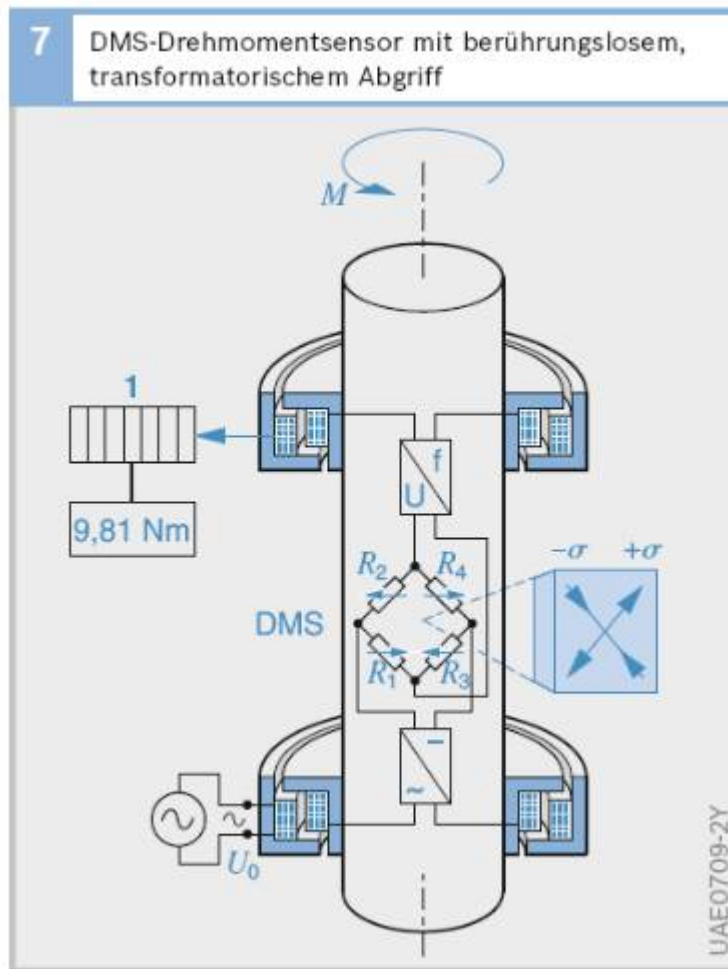


Abbildung 18 Drehmomentsensor; 1 Anzeigegerät; σ Spannungen, M Drehmoment, U_0 Versorgungsspannung, $R_1 \dots R_4$ Dehnmesswiderstände⁹

DMS werden auch zur Messung der Verformung von Membranen in Druckmessdosen verwendet, also zur Druckmessung.

Dehnmessstreifen können auch in Halbleitertechnik in Silizium erzeugt werden. Dies ergibt zusammen mit der zugehörigen Elektronik komplette Sensorsysteme auf einem IC.

⁹ Reif 2010, S. 89

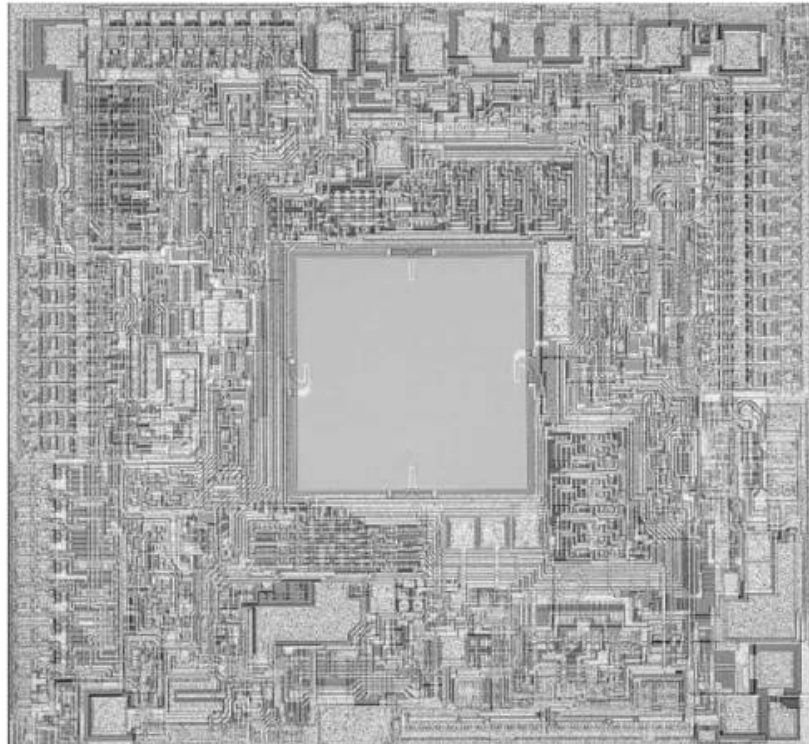


Abbildung 19 Drucksensor von Bosch¹⁰

So zeigt Abbildung 19 einen integrierten Drucksensor von Bosch. Klar zu erkennen ist in der Mitte die Membran. Vier hier nicht erkennbare Messwiderstände (Dehnungsmessstreifen) sind an den Seiten der Membran untergebracht und als Vollbrücke verschaltet. Die weiteren Strukturen sind die Elektronik zu Signalverarbeitung.

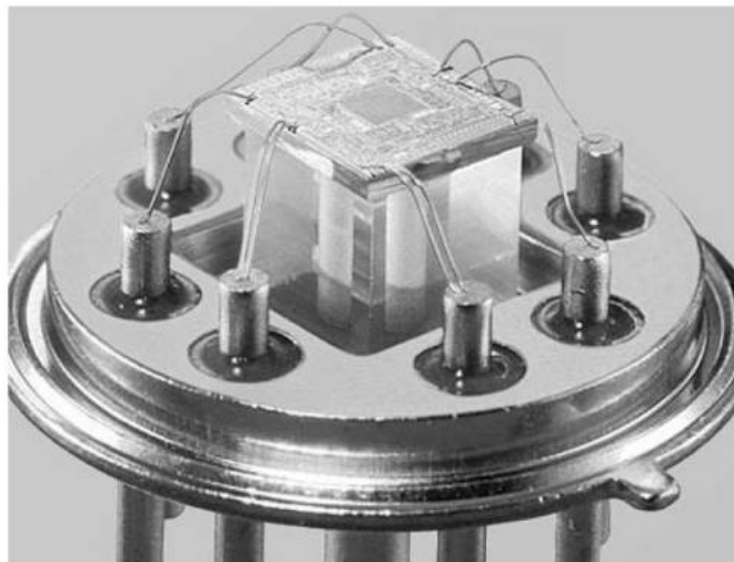


Abbildung 20 Drucksensor von Bosch, aufgebaut auf einem hohlen Glaskörper mit Druckanschluss auf der Pin-Seite des Gehäuses¹¹

¹⁰ Hilleringmann 2006, S. 138

¹¹ Hilleringmann 2006, S. 165

4.4 Anemometer

Zur Bestimmung von Luftmengen, die beispielsweise im Automotor angesaugt werden, werden Anemometer verwendet. Genaugenommen messen sie die Geschwindigkeit der vorbeifließenden Luft. Ist aber die Geometrie des Rohres bekannt, in dem die Luft fließt, kann aus der Geschwindigkeit auf die Luftmenge geschlossen werden.

Die Luftgeschwindigkeit kann mit einem erwärmten Draht gemessen werden (Abbildung 21). Der Widerstand des Drahtes kann ja über Strom und Spannung bestimmt werden. Gleichzeitig erzeugen Strom und Spannung eine elektrische Leistung, die den Draht erwärmt. Wird im einfachsten Fall der Draht von einem konstanten Strom durchflossen, so stellt sich eine bestimmte Temperatur und damit eine bestimmte Spannung ein. Bewegt sich nun Luft über den Draht, wird er gekühlt, und zwar umso mehr, je schneller die Luft ist. Bei einer bestimmten Wärmeleistung im Draht (Produkt aus Spannung und Strom) hängt also die Temperatur und damit der Widerstand (Quotient aus Spannung und Strom) von der Luftgeschwindigkeit ab.

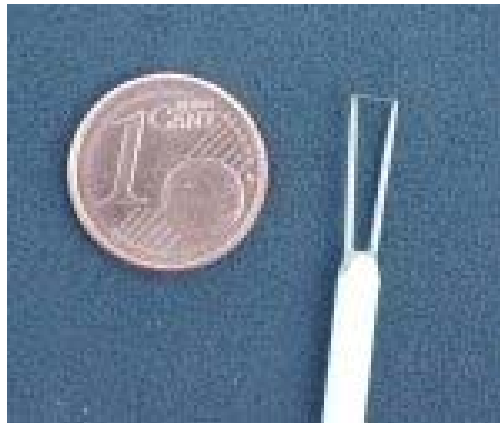


Abbildung 21 Hitzdrahtanemometer (aus Wikipedia)

Ein Anemometer zum Einsatz im KFZ zeigt Abbildung 22). Allerdings kann bei Verwendung eines einzigen Drahtes nicht die Richtung des Luftstromes ermittelt werden. Beim Betrieb eines KFZ-Motors ist dies aber wichtig. Daher wurde dieses einfache Anemometer weiterentwickelt. Die zweite Generation bestand aus drei Drähten, die parallel angeordnet waren und hintereinander im Luftstrom lagen. Der mittlere Draht wird erhitzt, die beiden anderen dienen als Temperatursensoren. Ohne Luftstrom erwärmt der mittlere Draht beide Temperatursensoren gleich. Bewegt sich die Luft in eine Richtung, so wird ein Sensor abgekühlt, der andere noch stärker erwärmt. So lassen sich sowohl Geschwindigkeit als auch Richtung des Luftstromes bestimmen. Der Sensoraufbau mit Drähten zeigte aber Schwächen bei der Langzeitstabilität.

Die nächste Generation wurde daraufhin in Dickschichttechnik aufgebaut, bei der die Heizleitung und die beiden Temperatursensoren in Siebdrucktechnik auf ein Keramiksubstrat aufgebracht wurden.

Aktuell wird das System vollständig in Mikrosystemtechnik auf einem Silizium-Chip integriert.

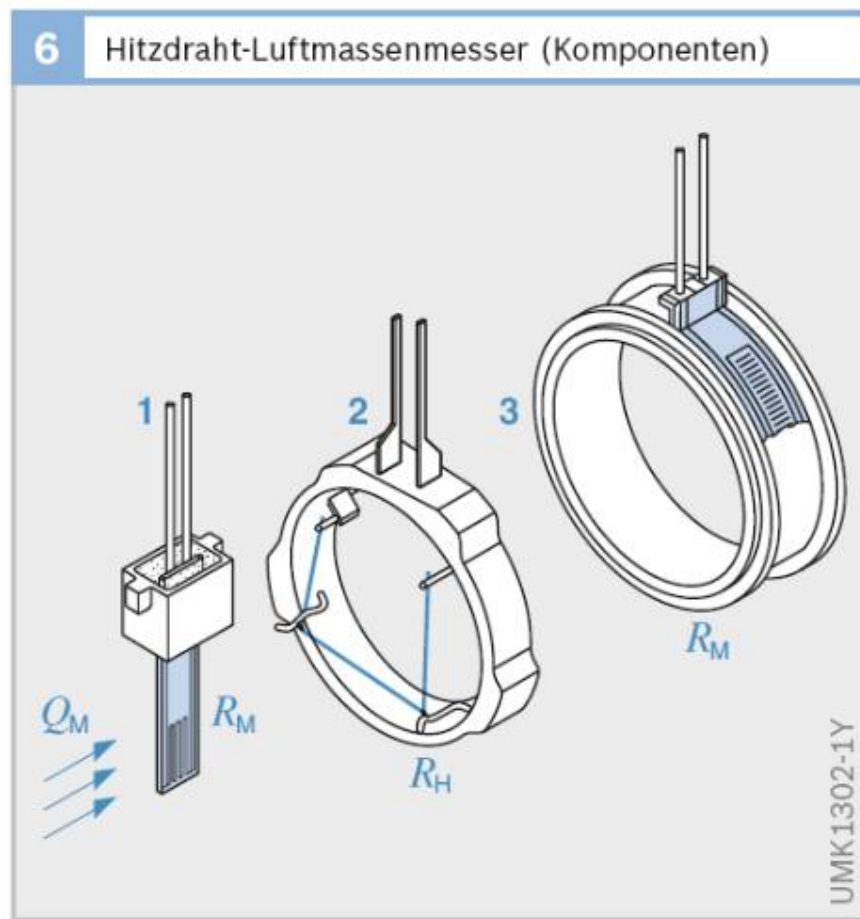


Abbildung 22 Erste Generation von Hitzdrahtanemometern für die Luftmengenbestimmung beim Motor
 1- Widerstand zur Temperaturkompensation; 2 Sensorring mit Hitzdraht, 3 Messwiderstand; Q_M Luftmassenstrom¹²

In Abbildung 23 ist die spätere Version dieses Luftmengensensors in Mikrotechnik zu sehen. Heizzone und Temperatursensoren sind auf einem Chip untergebracht.

¹² Reif 2010, S. 96

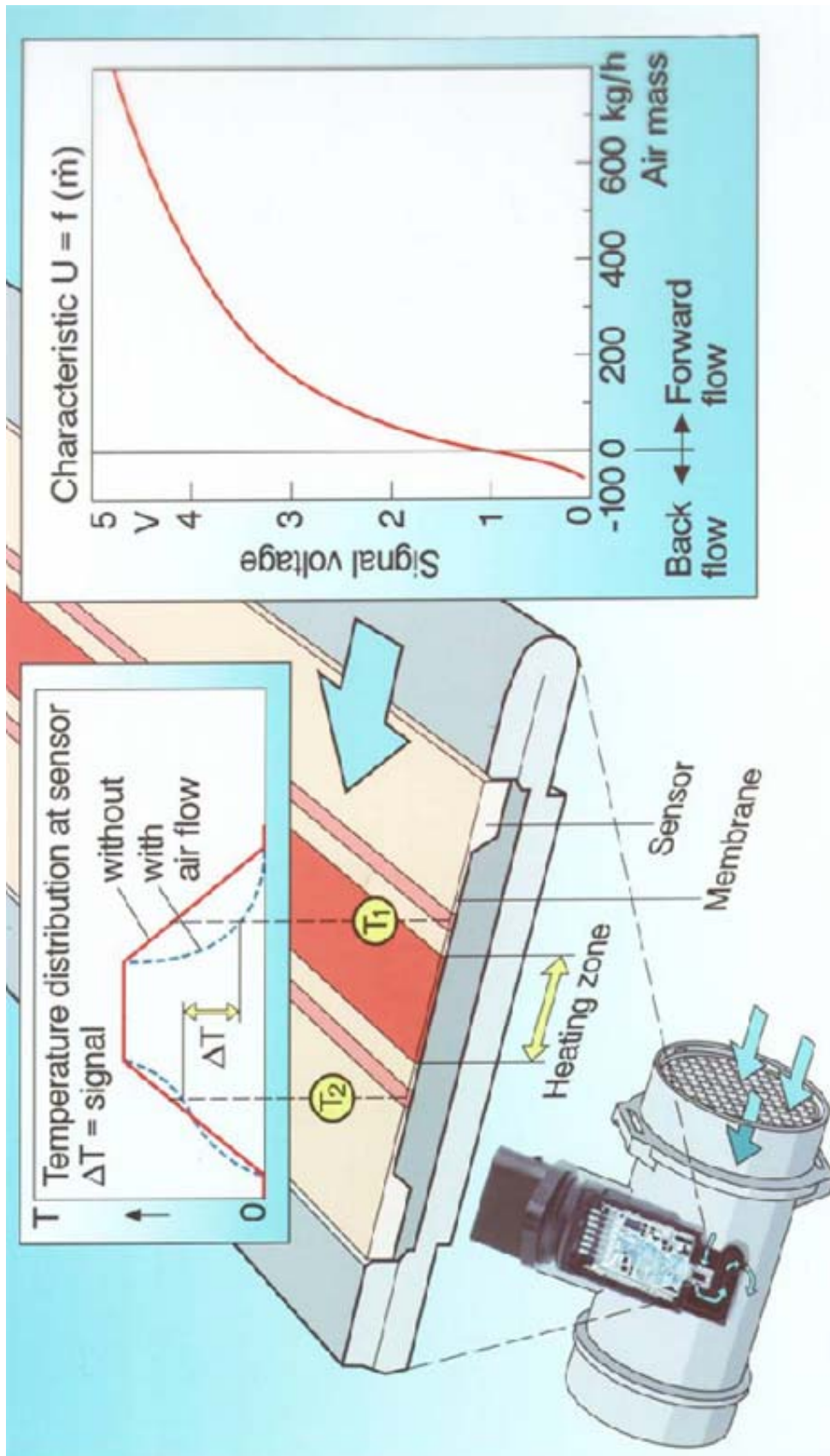


Abbildung 23 Anemometer in Mikrotechnik, im inneren Bild ist der Chip zu sehen, der eine Heizzone und die beiden Temperatursensoren enthält

5 Kapazitive Sensoren

Ein typischer Kondensator besteht aus 2 leitenden Platten mit Fläche A im Abstand d . Dann ist seine Kapazität C gegeben durch

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Dabei ist ϵ_r die Dielektrizitätszahl des Mediums zwischen den Platten und $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

Wird der Abstand der Platten geändert oder werden sie gegeneinander verschoben, ändert sich C . Man erhält einen Positionssensor. Verwendet man die Membran in einer Druckmessdose als eine der beiden Elektroden, erhält man einen Drucksensor.

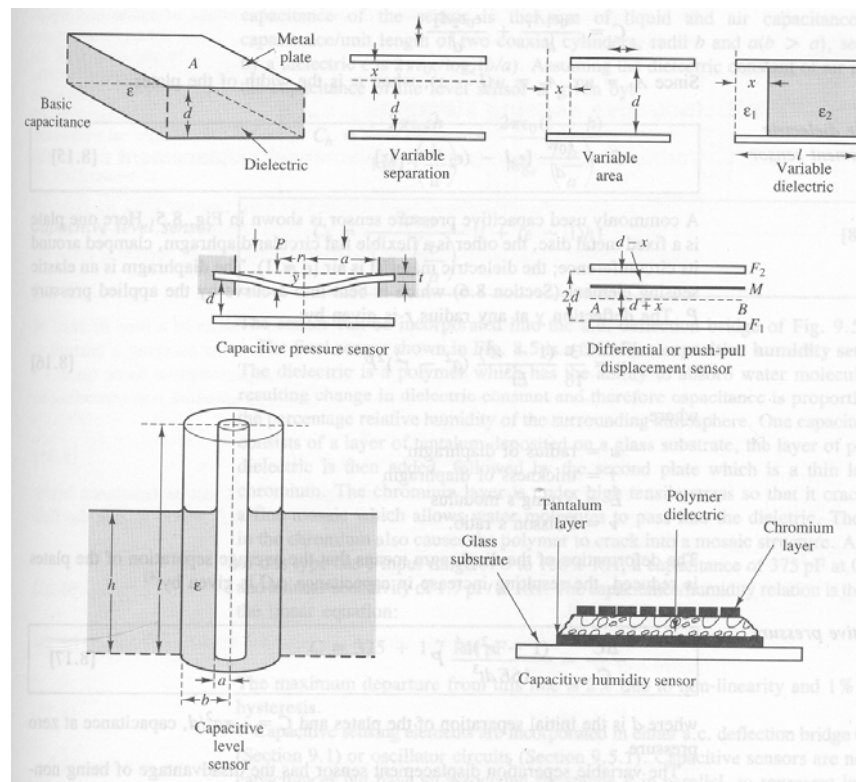


Abbildung 24 Kapazitive Sensorprinzipien

Verwendet man eine hygroskopische, also feuchtigkeitsanziehende, Schicht als Dielektrikum und eine poröse Elektrode, so wird die Dielektrizitätskonstante und damit die Kapazität feuchteempfindlich, man erhält einen Feuchtesensor.

Inzwischen werden in Mikrotechnik auch planare Kondensatoren erzeugt, in denen die beiden Elektroden nebeneinander auf einem Substrat angeordnet sind. Nähert sich dieser Struktur ein Material, ändert sich die Kapazität. Dies ist erst einmal ein Abstandssensor. Werden solche Strukturen aber in der Größe von einigen $10\mu\text{m}$ in großer Zahl aufgebracht, kann damit beispielsweise die Hautstruktur eines Fingers abgetastet werden. Man erhält einen Fingerabdrucksensor. Ein Beispiel zeigt folgende Abbildung.

Induktive Sensoren

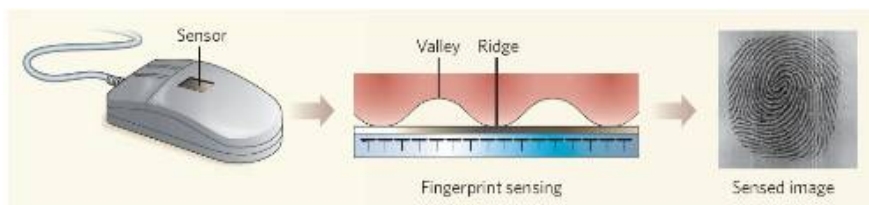


Figure 1 | A capacitive fingerprint sensor. When a user places a finger against a silicon chip containing an array of microcapacitor plates, a small electric charge arises in the insulating air gap, the magnitude of which depends on the distance between the finger and the plates. The capacitance values of different plates, converted into pixel intensities, form a digital image of the ridges and valleys of the fingerprint. Such fingerprint-sensing chips cost only about US\$5, and are compact enough to be embedded in mobile phones, key fobs and hand-held computers.

Abbildung 25 Prinzip eines kapazitiven Fingerabdrucksensors¹³

Dabei wird entweder die Kapazität zwischen 2 benachbarten Elektroden gemessen. Oder, dazu muss der Finger an einer Stelle mit einer weiteren Elektrode Kontakt haben, die Kapazität zwischen Finger und einer Elektrode.

Die Messung von Kapazitäten kann noch zu anderen sensorischen Zwecken ausgenutzt werden. So zeigt Abbildung 26 einen Beschleunigungssensor. Die seismische Masse bewegt sich nach den Newtonschen Gesetzen abhängig von der Beschleunigung. Die Auslenkung dieser Masse ändert den Abstand zur Rückseite, also die Kapazität zwischen seismischer Masse und Rückseite.

Kapazitiver Beschleunigungssensor

Kapazitive Auslesung

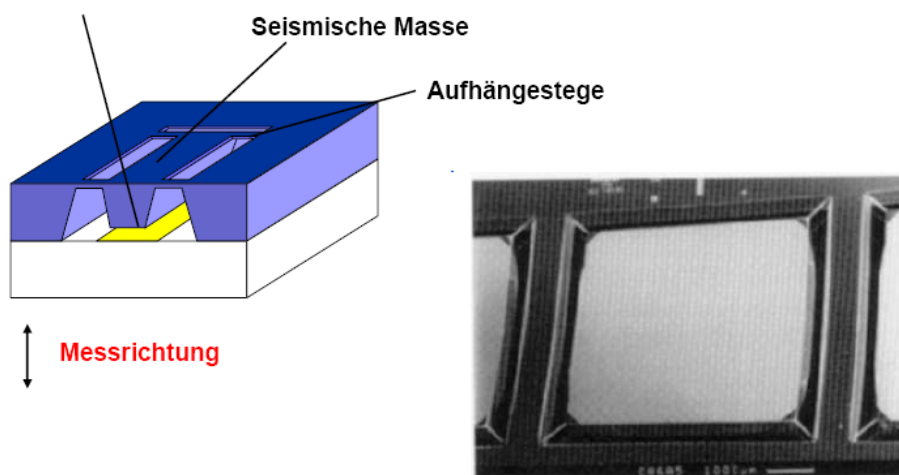


Abbildung 26 Kapazitiver Beschleunigungssensor

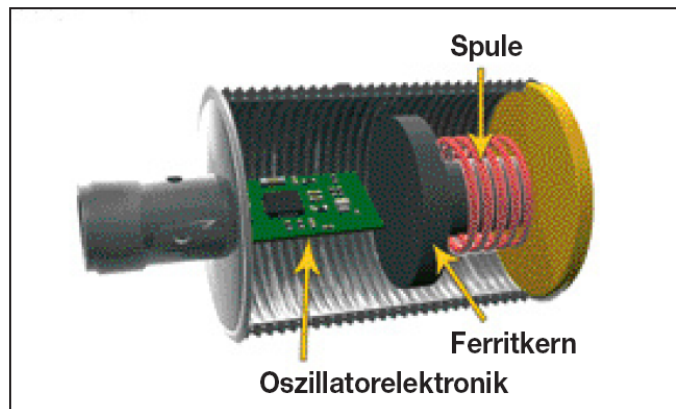
6 Induktive Sensoren

Induktive Sensoren sind im Wesentlichen Spulen mit einem Ferrit- oder Magnetkern. Die arbeiten nach zwei unterschiedlichen Prinzipien: sie nutzen Wirbelströme aus oder sie benutzen das Induktionsgesetz.

Sensoren nach dem Wirbelstromprinzip sind Spulen mit einem Ferritkern. Sie werden an einen hochfrequenten Oszillator angeschlossen, so dass die Spule ein entsprechendes hochfrequentes elektromagnetisches Feld erzeugt. Nähert sich ein metallischer Gegenstand diesem Sensor, werden Wirbelströme in ihm erzeugt.

¹³ Jain 2007, S. 40

Die dazu nötige Energie wird der Spule entzogen, die Schwingung wird schwächer. Je näher der Gegenstand kommt, desto stärker wird die Schwingung gedämpft, eine Abstandsmessung wird möglich. Allerdings hängt die Größe der Wirbelströme auch vom spezifischen Widerstand des Materials ab, die Abstandsmessung ist also materialabhängig.



Aufbau eines klassischen induktiven Sensors mit Ferritkern

Abbildung 27 Induktiver Sensor nach dem Wirbelstromprinzip (Abbildung der Firma Turck)

Solche Sensoren werden häufig nicht zur genauen Abstandsmessung eingesetzt, sondern zur Feststellung von Vorhandensein. Wird er beispielsweise vor ein Zahnrad montiert, kann man feststellen, ob vor dem Sensor ein Zahn ist oder nicht. Bewegt sich das Zahnrad, kann die Drehzahl ermittelt werden.

Bei Sensoren nach dem Induktionsgesetz wird die Spule mit einem Magnetkern versehen. Bewegt sich jetzt ein ferromagnetisches Material vorbei, ändert sich das Magnetfeld und eine Spannung wird induziert. Auch solche Sensoren werden zur Drehzahlmessung benutzt.



Abbildung 28 Drehzahlsensor der Firma AB Elektronik¹⁴

¹⁴ Reif 2007, S. 108

Dieser Sensor hat eine Induktivität von 530 mH bei einem Spulenwiderstand von 1 kOhm. Bewegt sich der Zahn eines Zahnrades vorbei, werden typischerweise einige 100 mV induziert.

7 Piezelektrische- Sensoren

Der Piezoeffekt wurde historisch an einem für die Materialklasse untypischen Vertreter entdeckt, dem Quarz. Wird auf eine Quarzscheibe, die in der richtigen Weise aus einem Kristall herausgeschnitten wurde, eine Kraft ausgeübt, so entsteht auf den Oberflächen eine elektrische Ladung, eine Spannung wird also messbar.

Die Abbildung 29 zeigt ein Bild eines Quarzkristalls, aus dem in verschiedenen Richtungen Scheiben herausgeschnitten werden können. Für den Piezoeffekt wird der AT-Schnitt bevorzugt. Quarz hat die chemische Summenformel SiO_2 , wobei die Sauerstoffionen negativ und die Siliziumatome positiv geladen sind. Dann sieht eine Elementarzelle in dieser Scheibe wie in der nächsten Abbildung 30 aus. In a) ist die regelmäßige sechseckige Anordnung der Ionen gezeigt. Die Schwerpunkte der negativen und positiven Ladungen liegen genau in der Mitte der Struktur. In b) wird die Scheibe zusammengepresst, die Ionen werden verschoben, der Schwerpunkt der positiven Ladung geht etwas nach oben, der der negativen nach unten. Die Anordnung wird oben negativ, unten positiv. Es entsteht ein elektrischer Dipol, der sich als Oberflächenladung äußert, die als Spannung gemessen werden kann. Wird andererseits, wie in c), eine elektrische Spannung angelegt, wird die Scheibe etwas verformt. Dies ist der inverse Piezoeffekt.

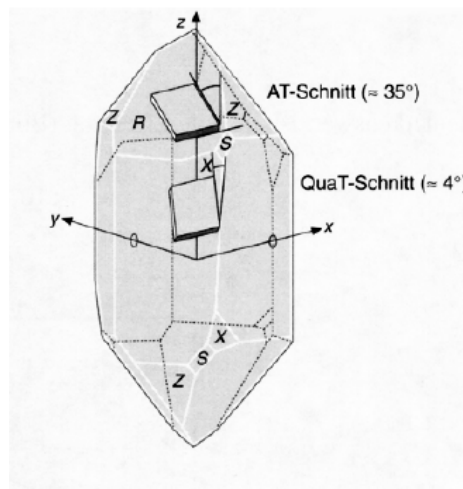


Abbildung 29 Quarzkristall

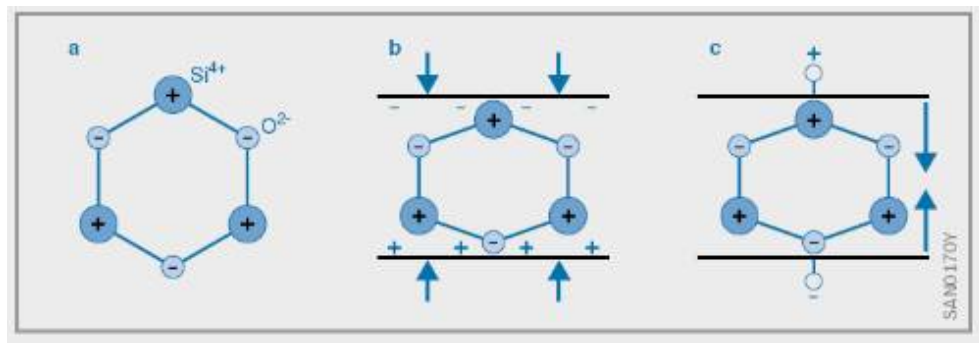


Abbildung 30 Der Piezoeffekt beim Quarz (Reif 2010, S. 101)

Beim direkten Piezoeffekt ist die entstehende Ladung Q direkt proportional der aufgewandten Kraft F , die Proportionalitätskonstante ist die piezoelektrische Konstante des Sensormaterials, bei Quarz beträgt sie $d=2,3 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$.

Ein typischerer Vertreter piezoelektrischer Materialien ist das Bariumtitanat (BaTiO_3), dessen Elementarzelle die Abbildung 31 zeigt. In dieser kubischen Elementarzelle befinden sich also die zweimal positiv geladenen Ba-Ionen an den Ecken und die zweimal negativ geladenen O-Ionen in den Flächenmitten. Man könnte wegen des bisher symmetrischen Aufbaus vermuten, dass das vierfach positiv geladene Ti-Ion in der Zellenmitte sitzt. Das ist allerdings bei Temperaturen unterhalb von etwa 120°C , der Curie-Temperatur des Bariumtitanats, nicht der Fall. Da ist es energetisch günstiger, wenn es zu einer der 6 Seiten verschoben ist. Damit sind die positiven und negativen Ladungsschwerpunkte nicht mehr an der gleichen Stelle, die Zelle zeigt ein elektrisches Dipolmoment. Wird auf die Zelle eine Kraft ausgeübt, ändert sich die geometrische Anordnung der Ionen etwas, das Dipolmoment ändert sich. Es entstehen ein piezoelektrischer Effekt.

Erst oberhalb von 120°C kann sich das Ti-Ion im ganzen Inneren der Zelle bewegen, das Dipolmoment wird Null.

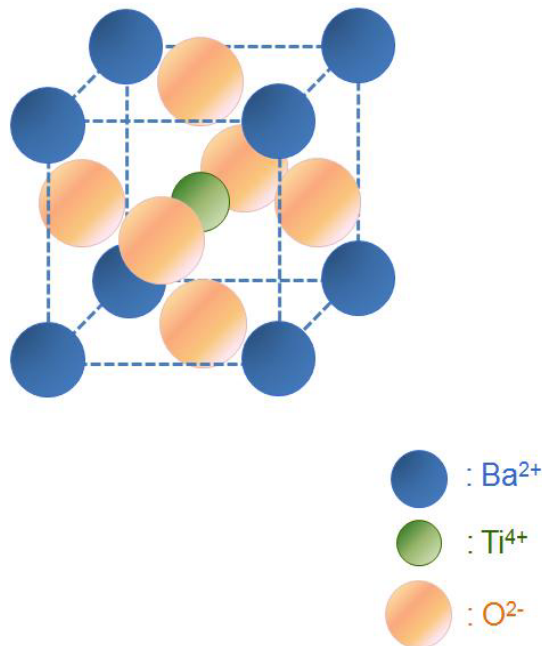


Abbildung 31 Elementarzelle des Bariumtitanats (aus Wikipedia), das Ti-Ion befindet sich real etwas außerhalb des Zentrums

Piezoelektrische- Sensoren

Betrachtet man nun einen ganzen Kristall, dann sind die Ti-Ionen in den Zellen nicht alle in die gleiche Richtung verschoben, die Dipolmomente der Zellen heben sich gegenseitig auf. Für eine technische Anwendung müssen die Ti-Ionen in den Zellen in die gleiche Richtung ausgerichtet werden. Dies geschieht durch einen Polarisierungsvorgang. Dazu wird der Kristall über 120°C erwärmt und dann eine hohe elektrische Spannung angelegt. Dadurch werden die Ti-Ionen alle in die gleiche Richtung gezogen. Wird der Kristall abgekühlt, befinden sich die Ti-Ionen alle auf der gleichen Seite in ihren Zellen. Dann wird die Spannung abgeschaltet, der Kristall zeigt ein globales Dipolmoment, eine Oberflächenladung. Diese Oberflächenladung kann aber nur im Ultrahochvakuum gemessen werden, weil sich die in normaler Atmosphäreluft befindlichen Ionen sofort auf die Oberflächen setzen und die Oberflächenladung neutralisieren. Wird jetzt allerdings eine Kraft ausgeübt, dann wird dieser zusätzliche piezoelektrische Effekt messbar.

Da nun die Ti-Ionen sowieso durch den Polarisierungsvorgang ausgerichtet werden, muss das Bariumtitanat nicht mehr als Kristall vorliegen. Man kann auch daraus eine Keramik herstellen, die ebenfalls polarisiert werden kann. Diese piezoelektrischen Keramiken haben viele Vorteile gegenüber Kristallen: ihre Herstellung ist billiger, da keine Einkristalle benötigt werden, und man kann praktisch beliebige Formen erzeugen. Ein Nachteil ist die Curietemperatur. Wird die Keramik wieder über die Curietemperatur erwärmt, können sich die Ti-Ionen wieder in der ganzen Zelle bewegen und nehmen beim Abkühlen wieder zufällig eine der 6 möglichen Seiten ein, die globale Polarisation ist verschwunden.

Neben Kristallen und Keramiken gibt es noch eine weitere piezoelektrische Materialklasse, nämlich Polymere, deren einziger Vertreter das PVDF (Polyvinylidenfluorid, Summenformel $C_2H_2F_2$) ist. Es lässt sich in Folien nutzen oder auch als Isolation in Koaxialkabeln.

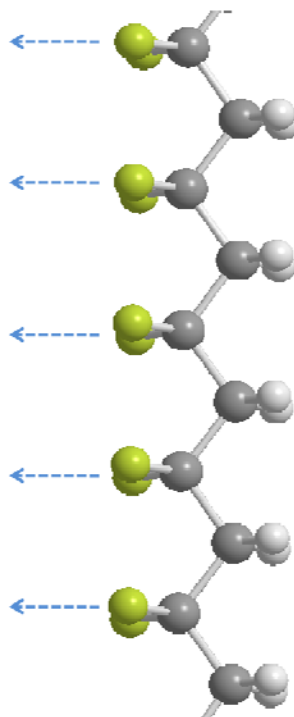


Abbildung 32 Polymerstruktur von PVDF, grün die negativen Fluor-Ionen, hell die positiven H-Ionen, dunkel die C-Ionen

Abbildung 32 lässt erkennen, dass eine PVDF Molekülkette auf der Seite der F-Ionen eher negativ, auf der der H-Ionen eher positiv geladen ist, also ein elektrisches Dipolmoment hat.

Piezoelektrische Sensoren finden breite Anwendung.

So stellt die Firma Kistler (www.kistler.com) beispielsweise Sensoren für Kraft, Beschleunigung, Druck und Drehmoment her.



Abbildung 33 Kraftsensor von Kistler

Eine speziell Anwendung ist die Messung von Fahrzeuggewichten auf der Straße im laufenden Verkehr.

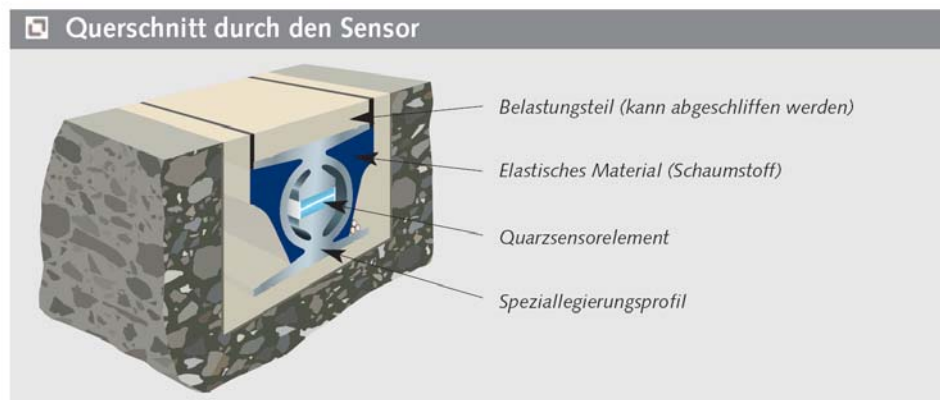


Abbildung 34 Sensor zur Bestimmung des Fahrzeuggewichts im laufenden Verkehr (Kistler)

Beispielhafte Messwerte zeigt die folgende Abbildung.



Abbildung 35 typische Messwerte des Sensors

Sensoren zur Erkennung von fehlerhaften Zündungen im Motor, Klopfensoren, werden von Bosch mit piezelektrischen Keramikringen gebaut (Abbildung 36)

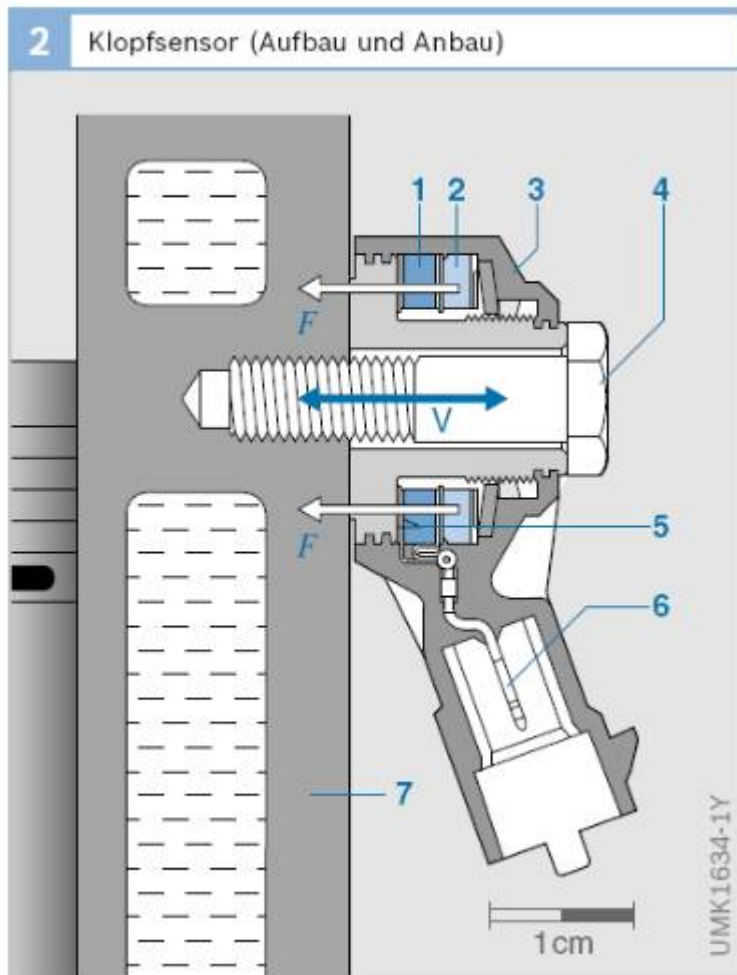


Abbildung 36 Klopfsensor von Bosch, 1 Piezokeramischer Ring, 2 Seismische Masse, 3 Gehäuse, 4 Schraube, 5 Kontaktierung, 6 elektrischer Anschluss, 7 Motorblock, V Vibrationen¹⁵

¹⁵ Reif 2010, S. 149

Die Sensorkeramik ist über das Gehäuse mit dem vibrierenden, eventuell klopfenden Motorblock verbunden. Auf der Keramik ist eine ringförmige schwere Masse, also einfach ein schwerer Ring aufgebracht. Schwingt der Motor, dann schwingt auch die Keramik und die darauf befindliche Masse m . Entsprechend den Newton'schen Gesetzen führt die schwingende, also beschleunigte Masse zu einer Kraft auf der Keramik, damit zu einer elektrischen Spannung.

Auch Beschleunigungssensoren lassen sich piezoelektrisch aufbauen. Ein Prinzip zeigt Abbildung 37. Zwei gegensätzlich polarisierte Piezokeramiken sind zu einem Biegeelement zusammengeklebt. Die Spannung wird an den Außenseiten abgegriffen. Im Ruhezustand ist die Spannung 0. Bei Beschleunigung verformt sich der Balken, eine Keramik wird gestreckt, die andere gestaucht, eine Ausgangsspannung entsteht. Den realen Aufbau mit Gehäuse zeigt Abbildung 38.

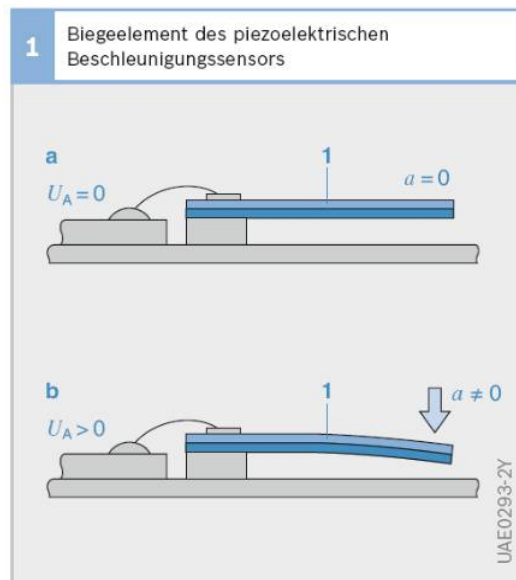


Abbildung 37 Piezoelektrischer Beschleunigungssensor, a im Ruhezustand, b bei Beschleunigung a , 1 Piezokeramisches Bimorph-Biegeelement, U_A Messspannung¹⁶

¹⁶ Reif 2010, S. 153

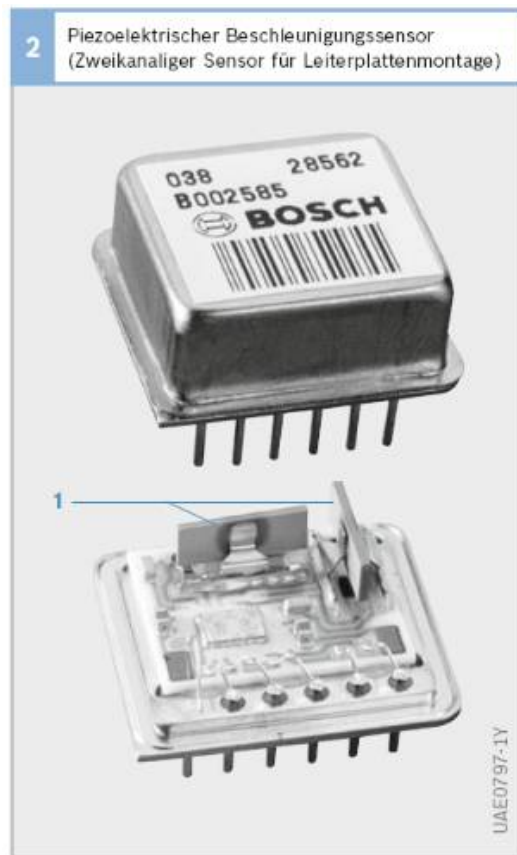


Abbildung 38 Piezoelektrischer Beschleunigungssensor mit zwei Biegeelementen (1) zur gleichzeitigen Messung in zwei Richtungen¹⁷

Sensoren aus PVDF-Folien können leicht mit großen Flächen hergestellt werden. Bringt man auf dieser Folie dann viele Elektroden auf, lassen sich Drücke und Kräfte orts aufgelöst messen. Eine Anwendung findet man in einigen elektronischen Dartscheiben, um das Auftreffen der Darts zu registrieren. Wird PVDF als Isolator in ein Koaxialkabel eingebracht, entsteht ein entsprechend langer Drucksensor. Einige Flughäfen haben solche Kabel in die Start- und Landebahn integriert, um die Bewegung von Flugzeugen zu kontrollieren. Auch eine Anwendung in der Sicherheitstechnik als „intelligenter Zaun“ wird diskutiert.

8 Pyroelektrische Sensoren

Betrachtet man ein Material wie Bariumtitanat bei verschiedenen Temperaturen, dann schwingt das innere Ti-Ion verschieden weit, damit ändert sich auch das Dipolmoment und die Oberflächenladung wird temperaturabhängig. Dies nennt man pyroelektrischen Effekt, die Erzeugung von Ladung bzw. Spannung durch unterschiedliche Temperaturen. Die meisten piezoelektrischen Stoffe einschließlich PVDF sind auch pyroelektrisch. Die Ausnahme ist der Quarz.

¹⁷ Reif 2010, S. 153

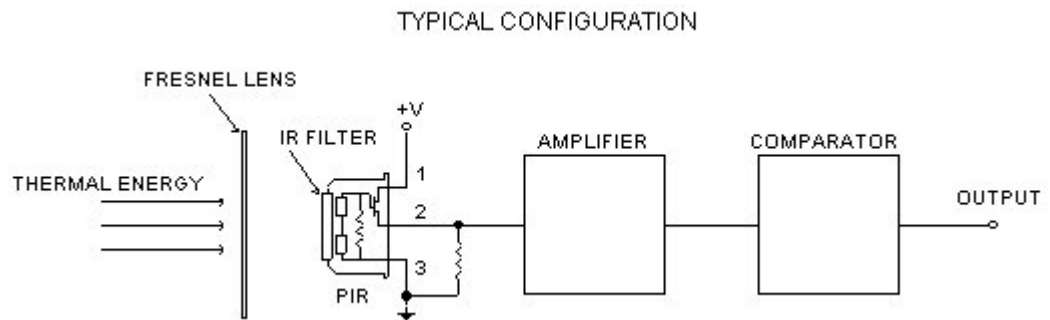


Abbildung 39 Typischer Aufbau pyroelektrischer Sensoren

Eine typische Anwendung finden diese Sensoren in der berührungslosen Temperaturmessung. Die Wärmestrahlung eines Messobjektes, beispielsweise eines vorübergehenden Menschen, wird über eine infrarotdurchlässige Linse auf den pyroelektrischen Sensor fokussiert. Dieser erwärmt sich dadurch. Oft werden zwei Sensoren in einer Brückenschaltung verwendet, wobei der eine Sensor der Strahlung ausgesetzt und der andere abgedunkelt ist. Die Ausgangsspannung wird verstärkt und, bei einer Anwesenheitskontrolle, mit einem Schwellenwert verglichen, wodurch dann eine Aktion ausgelöst werden kann (Licht einschalten, Alarm geben...). Auf diese Weise funktionieren viele Bewegungsmelder.

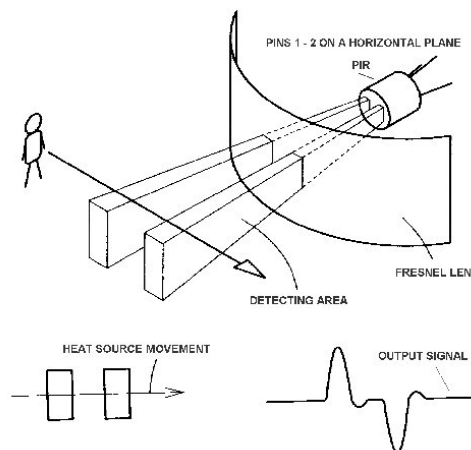


Abbildung 40 Typischer Aufbau eines Bewegungsmelders

9 Magnetfeld-Sensoren

Eine Art von Magnetfeldsensoren haben wir schon behandelt: die induktiven Sensoren. Sie können aber nur zeitlich veränderliche Felder messen. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Herstellung von Spulen inzwischen sehr aufwendig ist verglichen mit Mikrostrukturtechniken. Beide Nachteile werden von Halbleitersensoren, die beispielsweise nach dem Hall-Effekt arbeiten, überwunden.

Dabei werden Magnetfeld-Sensoren in der industriellen Praxis kaum eingesetzt, um irgendwelche natürlichen Magnetfelder zu vermessen. Oft werden sie benutzt, um die Position oder das Vorhandensein von Magneten zu erkennen. So gibt es Joy-Sticks, in denen ein Magnet über einen Sensor geführt wird. Sehr oft werden die Sensoren mit Magneten in einem gemeinsamen Gehäuse eingebaut. Befinden sich dann eisenhaltige, ferromagnetische Teile in der Umgebung, wird das Magnetfeld geändert. Dies wird beispielsweise zur Erkennung von Zahnradzähnen für Drehzahlmessungen ausgenutzt.

Der Ihnen sicher bekannte Hall-Effekt soll hier noch einmal kurz erläutert werden.

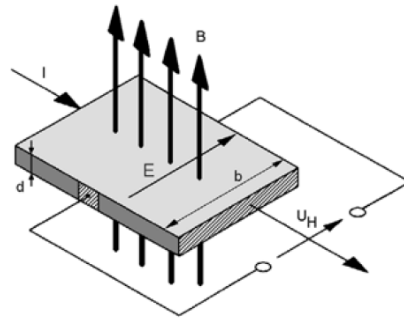


Abbildung 41 Aufbau zum Hall-Effekt

Eine leitende Platte wird (im Bild) von links oben nach rechts unten von einem Strom I durchflossen. Wird der Strom durch Elektronen hervorgerufen, bewegen diese sich also von rechts unten nach links oben. Senkrecht zur Platte herrscht ein Magnetfeld B . Dann wirkt auf die Elektronen die magnetische Lorentzkraft F_L mit

$$\vec{F}_L = e \left(\vec{v} \times \vec{B} \right)$$

Dabei ist v die Geschwindigkeit der Elektronen und e deren Ladung. Mit der Rechten-Hand-Regel kann man zeigen, dass das Kreuzprodukt dann ein Vektor ist, der von links unten nach rechts oben zeigt. Da die Elektronenladung negativ ist, werden, zeigt der Kraftvektor auf die Elektronen von rechts oben nach links unten, die Elektronen werden nach links unten abgelenkt. Sie sammeln sich also an der Seite links unten. Entsprechend wird die Seite rechts oben weniger Elektronen erhalten. So baut sich ein elektrisches Feld auf, das von links unten (negativ) nach rechts oben (positiv) zeigt. Dies stößt die Elektronen, die durch die magnetische Kraft abgelenkt werden, aber wieder zurück. Im Endeffekt sammeln sich links unten soviel Elektronen an, dass deren E -Feld ausreicht, um die Elektronen soweit abzustößen, dass sie sich wieder geradlinig durch den Kristall bewegen. Damit entsteht von links unten nach rechts oben ein E -Feld, damit eine Spannung U_H , die vom durchfließenden Strom I und vom Magnetfeld B abhängt. Es gilt

$$U_H = \frac{1}{ne} \frac{IB}{d}$$

Dabei ist n die Anzahl von Ladungen pro Volumen und e deren Ladung, d ist die Dicke der Platte.

Die Hall-Spannung hängt also linear von B ab. Sie ist umgekehrt proportional zur Ladungsträgerdichte n . Deshalb ist der Hall-Effekt in metallischen Leitern vergleichsweise klein. Große Hall-Spannungen erreicht man bei Halbleitern, wie Silizium, mit relativ geringer Dotierung. Für eine hohe Messgenauigkeit ist es notwendig, dass der Strom I konstant gehalten wird und U_H genau gemessen wird. Konstantstromquellen und Spannungsverstärker lassen sich dann mit Hall-Sensoren in einem IC integrieren.

Ein Beispiel ist ein im Jahr 2010 auf den Markt gekommener IC von Analog Device, der AD22151

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

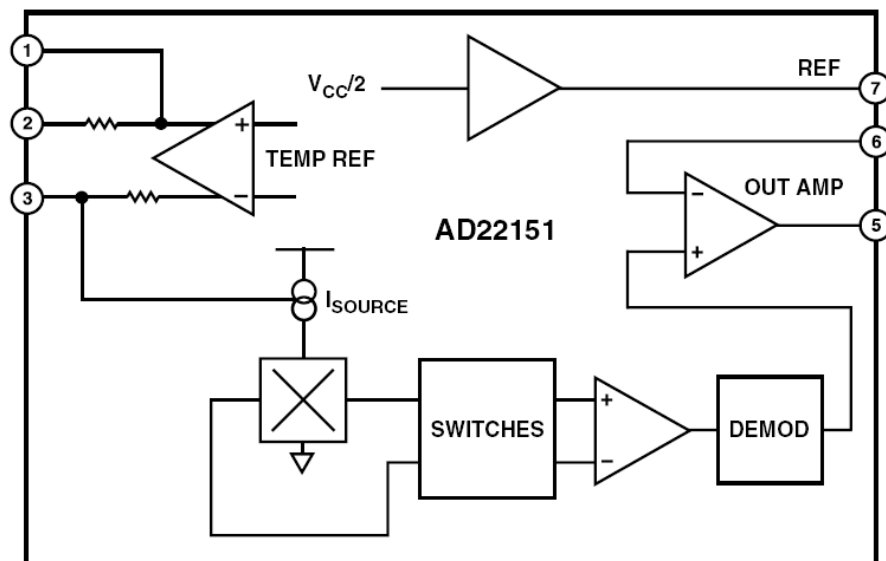


Abbildung 42 Blockschaltbild eines integrierten Hall-Sensors

Man sieht links unten das Quadrat mit Diagonal-Linien, das Hall-Element. Es wird von oben nach unten von einem konstanten Strom der Stromquelle I_{SOURCE} durchflossen. Die Hallspannung wird auf zwei hintereinandergeschaltete Verstärker gegeben. Die Blöcke „SWITCHES“ und „DEMODO“ sind eine Spezialität der Signalverarbeitung, die uns hier nicht interessieren muss. Auf dem IC befindet sich ein Temperatursensor TEMP REF, der über einen Verstärker die Stromquelle so ansteuert, dass die Hall-Spannung nicht von der Temperatur abhängt. Der Chip befindet sich in einem kleinen 8-poligen Standard IC-Gehäuse.

Hall-Sensoren benötigen eine, wie man oben sieht, recht umfangreiche Elektronik. Daher hat man versucht, weitere Sensoren mit einfacherer Anschaltung zu entwickeln. Ein Ergebnis ist die Feldplatte.

Stellen wir uns in Abbildung 41 vor, statt mit einem (sehr hochohmigen) Voltmeter wären die beiden Seiten über einen Kurzschluss miteinander verbunden. Dann könnte sich die Ladungsträger an der Seite nicht ansammeln, sie würden einfach über die Kurzschlussleitung zur anderen Seite transportiert. Sie würden also einen längeren Weg zurücklegen, der Widerstand für den Strom würde größer.

Eine prinzipielle Ausführung zeigt die nächste Abbildung.

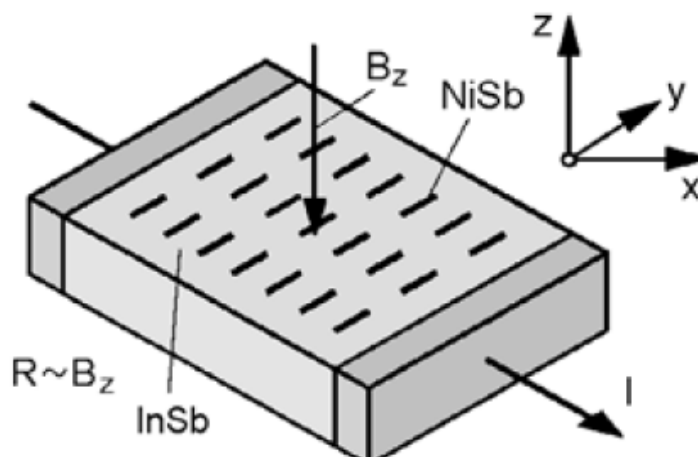


Abbildung 43 Prinzip der Feldplatte

Das Hall-Element besteht hier aus dem schlecht leitenden Halbleiter Indium-Antimonid (InSb). Der Kurzschluss von links unten nach rechts oben wird durch viele kleine metallische Nadeln aus Nickel-Antimonid (NiSb) hervorgerufen. Der Kurzschluss ist zwar nicht vollständig, reicht für die Anwendung aber völlig aus.

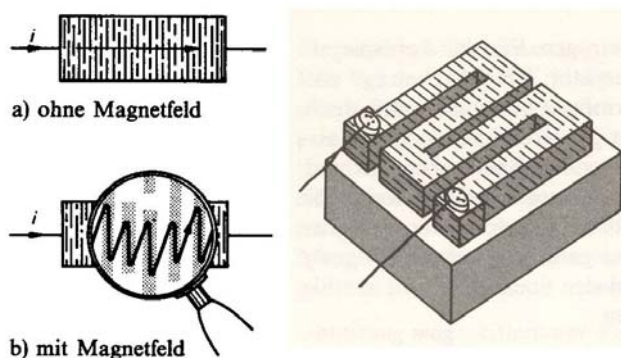


Abbildung 44 Eigenschaften von Feldplatten

In Abbildung 44 wird dieser Aufbau links oben nochmals gezeigt. Herrscht ein Magnetfeld, werden die Elektronen im InSb abgelenkt, in den gut leitenden NiSb-Nadeln bewegen sie sich dann etwas unvorhersagbar. Der Widerstand von links nach rechts wird durch den Weg im schlecht leitenden InSb bestimmt. Widerstand und Weg hängen dann vom Magnetfeld ab. In der Mitte ist skizziert, wie das Sensormaterial mäanderförmig aufgetragen wird. In Abbildung 45 wird ein typischer Systemaufbau gezeigt. Das Sensorgehäuse enthält 2 Magnete und 2 Feldplatten (dies sind die dicken Striche links und rechts von der Mitte). Die Feldplatten werden von den Feldern der jeweiligen Magnete durchflossen und haben dadurch einen bestimmten Widerstandswert. Befindet sich der externe Magnet an der eingezeichneten Stelle, dann durchlaufen dessen Feldlinien die linke Feldplatte in entgegengesetzter Richtung wie die des internen Magnetes, der Widerstand dieser Feldplatte sinkt. Umgekehrt ist es, wenn der Magnet rechts steht: externe und interne Feldlinien haben die gleiche Richtung, der Widerstand steigt. Die Bewegung des externen Magneten kann so einfach erkannt werden.

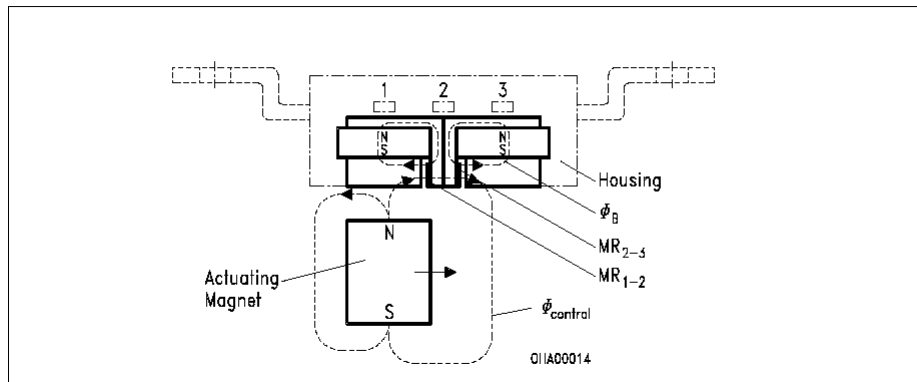


Abbildung 45 Feldplattensensor mit 2 Feldplatten und Magnet in einem Gehäuse, gezeigt wird die Erkennung eines vorbeibewegten externen Magneten

Es gibt inzwischen weitere Methoden, um magnetfeldabhängige Widerstände zu erzeugen, die auch schon industriell eingesetzt werden. Stichworte sind: Giant Magnetic Resistance (GMR) Sensoren sowie Anisotrop Magnetic Resistance (AMR) Sensoren. Diese werden aber hier nicht weiter behandelt.

Die folgende Abbildung zeigt eine Anwendungen von Magnetsensoren zur Drehzahlmessung.

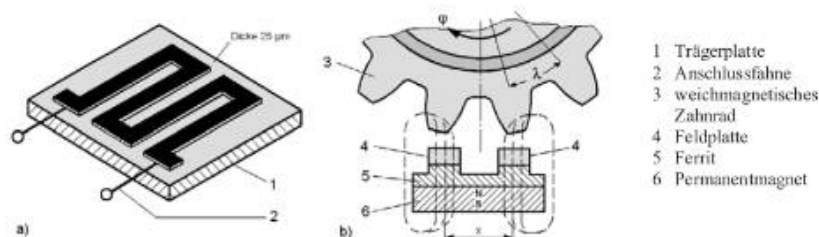


Abbildung 46 Drehzahlmessung mit Feldplatte¹⁸

10 Optische Sensoren

Sensoren zur Detektion von Licht werden heute in aller Regel aus halbleitendem Material aufgebaut. In reinem Silizium, als einem typischen Halbleiter, sind ,bei tiefen Temperaturen, alle Elektronen, die an der Bindung zu den nächsten Atomen teilhaben könnten, auch in die Bindung einbezogen. Daher gibt es keine freien Elektronen, der Halbleiter ist ein Nichtleiter. Bei höheren Temperaturen, was höherer thermischer Energie entspricht, können einige Elektronen aus einer Bindung herausgelöst werden. Es entsteht ein freies (negatives) Elektron. Und es entsteht eine Fehlstelle in einer Bindung, die sich ebenfalls wie ein freies, jetzt positives, Teilchen bewegen kann. Dieses positive, bewegliche „Pseudoteilchen“ wird gemeinhin als Loch bezeichnet. Je höher die Temperatur, desto mehr Elektronen und Löcher gibt es im Halbleiter. Der Halbleiter leitet.

¹⁸ Hesse, Schnell 2009, S. 51

Optische Sensoren

Um die Leitfähigkeit definiert zu erhöhen, werden dem Halbleiter andere Elemente zugesetzt, die entweder freie Elektronen liefern. Oder aber Elektronen wieder binden, und so freie Löcher schaffen. Diesen Vorgang nennt man dotieren. Ein Halbleiter mit zusätzlichen Elektronen heißt n-dotiert, einer mit zusätzlichen Löchern p-dotiert.

Bringt man einen n- und einen p-dotierten Bereich zusammen, so entsteht eine Diode. Diese leitet den Strom im Wesentlichen nur in einer Richtung. Legt man positive Spannung an den p-Bereich und negative an den n-Bereich, so leitet die Diode sehr gut. Es können sehr große Ströme fließen, wobei an der Diode typisch, bei Silizium, etwa 0,7 Volt herrschen. Dreht man aber die angelegte Spannung um, so leitet die Diode sehr schlecht, sie sperrt. Es fließt auch bei hohen Spannungen nur der Sperrstrom, der im Bereich Mikroampere oder kleiner ist.

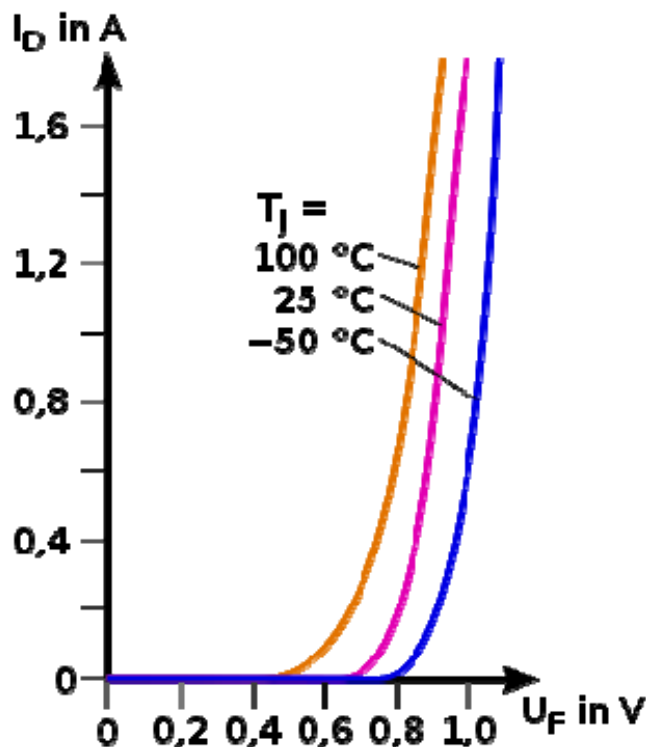


Abbildung 47 Typische Diodenkennlinie, eingezeichnet ist auch die Temperaturabhängigkeit; der bei negativer Spannung entstehende Sperrstrom ist so klein, dass hier auf ein Einzeichnen verzichtet wurde

Wieso sind diese Halbleiter lichtempfindlich?

Betrachten wir einen undotierten Halbleiter bei Raumtemperatur. Er enthält relativ wenig freie Elektronen und Löcher, sein Widerstand ist sehr hoch. Fällt Licht auf diesen Halbleiter, so kann es ein Elektron aus der Bindung lösen, ein Elektron und ein Loch werden freigesetzt. Die Leitfähigkeit steigt, der Widerstand sinkt. Dies geschieht aber nur, wenn die Energie des Lichtes groß genug ist. Licht kann ja als Korpuskel aufgefasst werden, als Photon. Jedes Photon hat eine Energie E , die direkt mit seiner Wellenlänge λ zusammenhängt. Und zwar ist die Energie umgekehrt proportional zur Wellenlänge. Die Photonenenergie muss nun größer sein als die Energie, mit der ein Elektron gebunden ist. Die Bindungsenergie beträgt bei Silizium 1,1 Elektronenvolt (eV), dies entspricht einer Wellenlänge von etwa $1,1 \mu\text{m}$. Licht mit Wellenlänge kleiner $1,1 \mu\text{m}$ hat also

genügend Energie, um in Silizium Ladungen zu erzeugen. Solches Licht erhöht also die Leitfähigkeit, es vermindert den Widerstand. Damit erhält man einen Photowiderstand, dessen Widerstand bei Beleuchtung abnimmt.

Die meisten Photowiderstände werden allerdings nicht aus Si, sondern aus Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Cadmium-Selenid (CdSe) hergestellt. Die zeigen wesentlich größere Empfindlichkeit als Silizium.

Photowiderstände sind sehr empfindlich und einfach zu verwenden. Allerdings reagieren sie recht langsam auf Intensitätsänderungen. Die kürzesten Reaktionszeiten sind etwa 1 Millisekunde.

Photodioden können dagegen wesentlich sein. Wie funktionieren sie? Fällt Licht in die Kontaktzone von n- und p-Bereich, so werden dort, wie eben beschrieben, Elektronen und Löcher erzeugt. Diese führen zu einem zusätzlichen Strom durch die Diode, wobei eine genauere Betrachtung zeigt, dass er die gleiche Richtung hat wie der Sperrstrom. Durch Lichteinfall wird also der Sperrstrom der Diode erhöht.

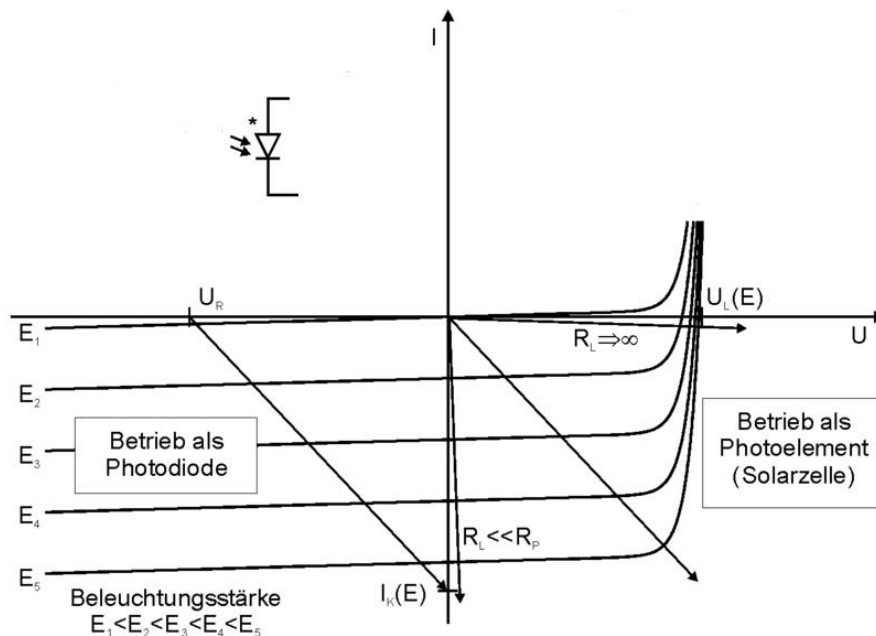


Abbildung 48 Typische Kennlinie einer Photodiode, die eingezeichneten Arbeitsgeraden interessieren hier nicht

Den Zusammenhang zwischen der auftreffenden Lichtleistung und dem dadurch erzeugten Photostrom zeigt Abbildung 49.

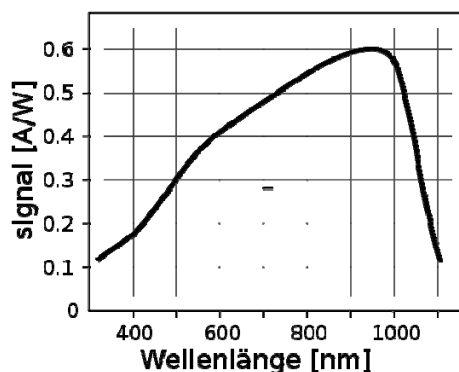


Abbildung 49 Empfindlichkeit einer typischen Photodiode

Moderne Herstellverfahren

Näherungsweise kann man annehmen, dass eine Lichtleistung von 1 Watt, die auf den Sensor auftrifft, einen Strom von 0,5 A hervorruft.

Photodioden werden beispielsweise im Regensensor zur Steuerung der Scheibenwischer eingesetzt.

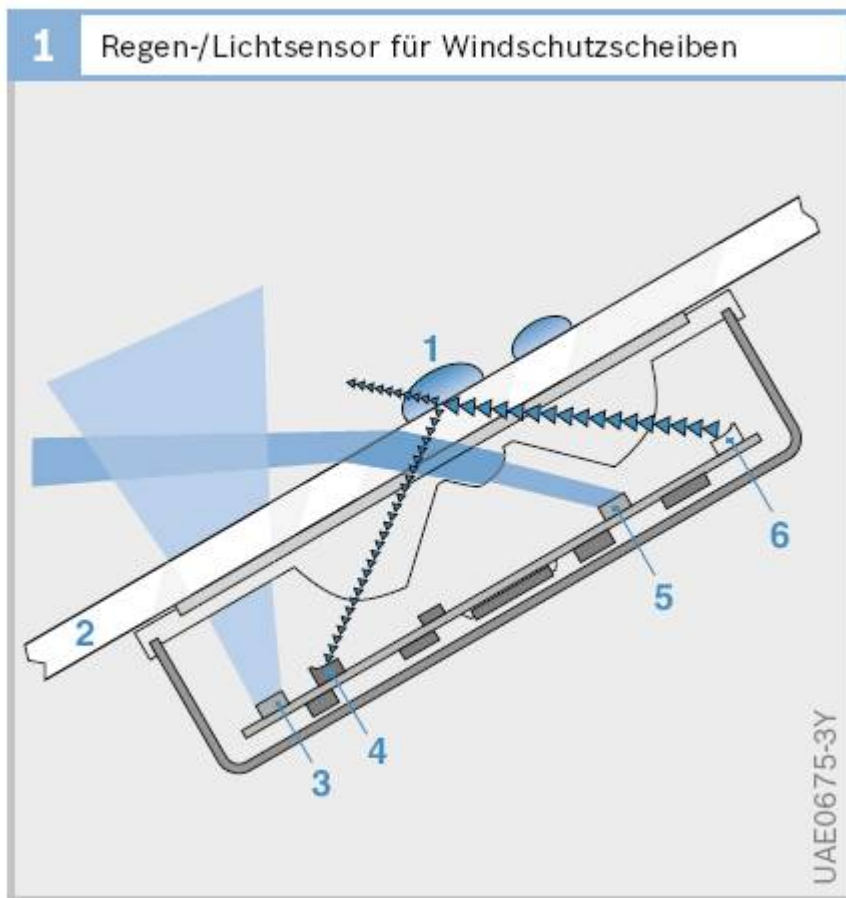


Abbildung 50 Regensensor: 1 Regentropfen; 2 Windschutzscheibe; 3 Umgebungslichtsensor; 4 Photodiode, 5 in die Ferne gerichteter Lichtsensor; 6 Leuchtdiode¹⁹

Die Leuchtdiode 6 sendet Licht, meist Infrarot, aus, das an der Außenseite der Scheibe total reflektiert wird und dann auf die Photodiode 4 fällt. Befindet sich ein Tropfen auf der Scheibe, wird das Licht nicht mehr total reflektiert, sondern kann nach außen gelangen. Die Lichtintensität in der Photodiode nimmt ab. Die anderen Sensoren, 3 und 5, werden für weitere Aufgaben wie das Einschalten der Scheinwerfer bei Dunkelheit benutzt.

11 Moderne Herstellverfahren

Es wurde ja schon darauf hingewiesen, dass die explosionsartige Verbreitung von Sensortechnik in den letzten Jahre auch auf die moderne Fertigungstechnik zurückzuführen ist. So zeigt die nächste Abbildung 51 ein Relais, also einen 1 Bit Speicher aus der Vor-Halbleiterzeit und einen 16 MB Speicherchip mit, natürlich, 16 Millionen Speicherzellen.

¹⁹ Reif 2010, S. 158

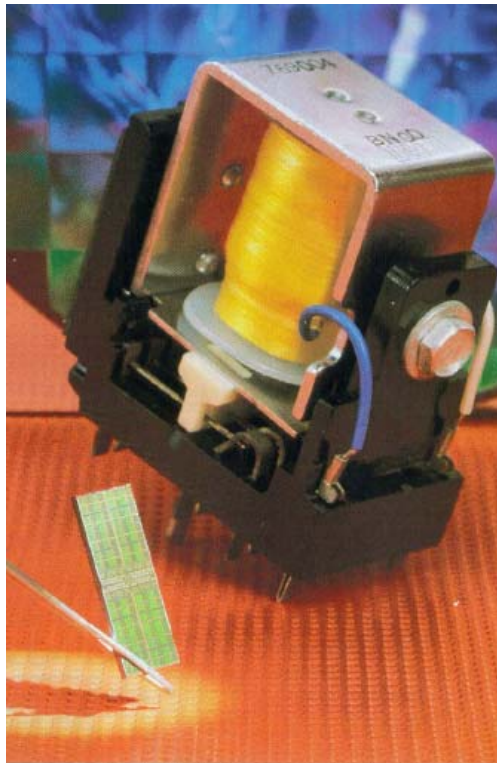
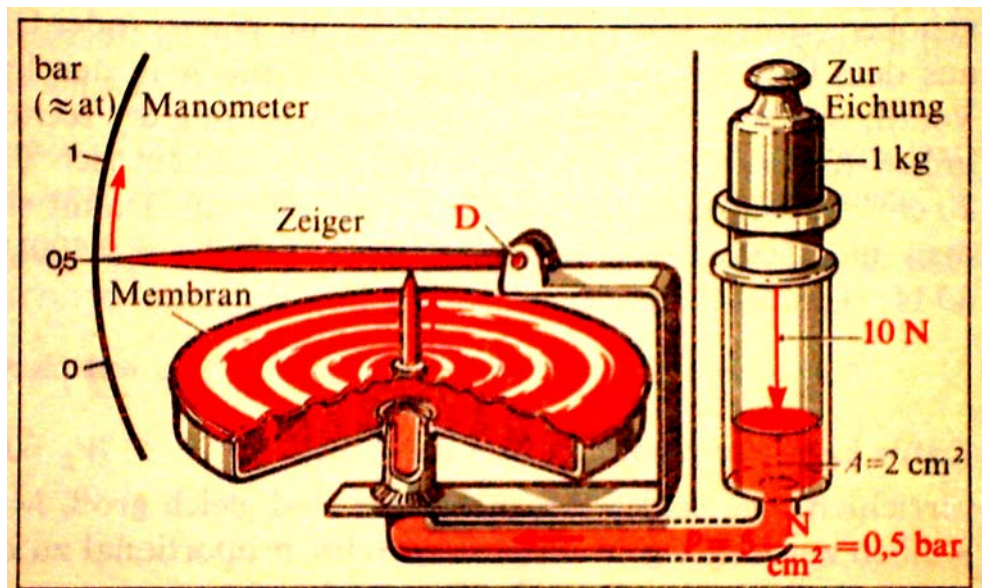


Abbildung 51 ein historischer 1-Bit Speicher (Relais) im Vergleich mit einem 16 MBit IC

Dabei muss man berücksichtigen, dass die Integrationsdichte inzwischen noch weiter angestiegen ist.



85.1 Membranmanometer, Aufbau und Eichung

Abbildung 52 ein Manometer aus einem alten Physikbuch, ein typische Beispiel für Feinwerktechnik

Abbildung 52 zeigt ein altes Druckmessinstrument. Dies vergleiche man mit dem integrierten Drucksensor von Bosch in Abbildung 19.

Moderne Herstellverfahren

Bemerkenswert an diesen Vergleichen ist nicht nur der Größen- und Leistungsunterschied. Besonders wichtig ist, dass die alten Systeme immer einzeln gebaut werden mussten, auch wenn es möglicherweise Serien- oder Massenfertigung war. Die neuen Systeme werden dagegen mit Techniken, die der Mikroelektronik entstammen, hergestellt. Dabei werden immer viele tausend Systeme parallel auf einem Substrat bearbeitet, so dass die Kostenreduktion enorm ist.

In diesem Kapitel sollen Sie nun mit einigen Grundlagen dieser Fertigungstechniken bekannt gemacht werden.

Dabei erreicht man die größte Integrationsdichte, also die kleinsten Strukturen, mit den Techniken, mit denen auch elektronische integrierte Schaltungen auf Halbleitern hergestellt werden. Diese mikroelektronische Halbleitertechnik für die Elektronik wurde weiterentwickelt, um auch mechanische, inzwischen auch optische Strukturen auf dem Halbleiter unterzubringen. Dies nennt man dann Mikrostrukturtechnik.

Die Halbleiterbauteile müssen mit weiteren Bauteilen und der Umgebung verbunden werden. Dazu werden sie in ein Gehäuse eingebaut, das dann auf eine Leiterplatte oder Platine gelötet wird. Diese bestehen aus einem Kunststoff und enthalten Kupferbahnen zur Verbindung der Bauteile. Wegen der Vielzahl der Leiterbahnen müssen die Leitungen in mehreren Ebenen untergebracht werden, es entstehen Multilayer-Platinen, heute gelegentlich mit bis zu 20 Ebenen.

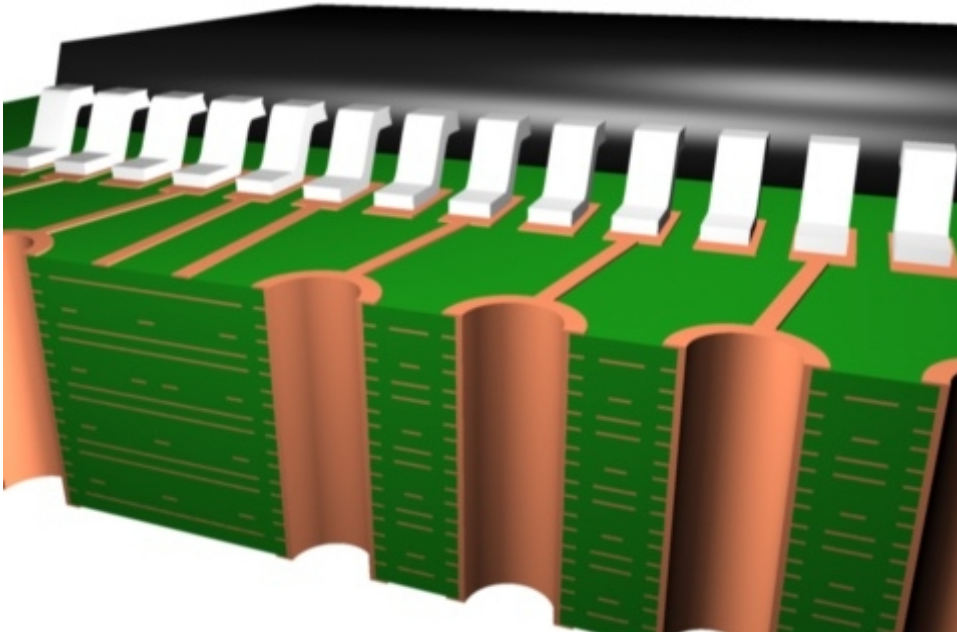


Abbildung 53 Schnitt durch Multilayer-Platine, man erkennt IC-Anschlüsse, Leiterbahnen und Durchkontaktierungen

Einen Ausschnitt aus einer bestückten Platine zeigt Abbildung 54.

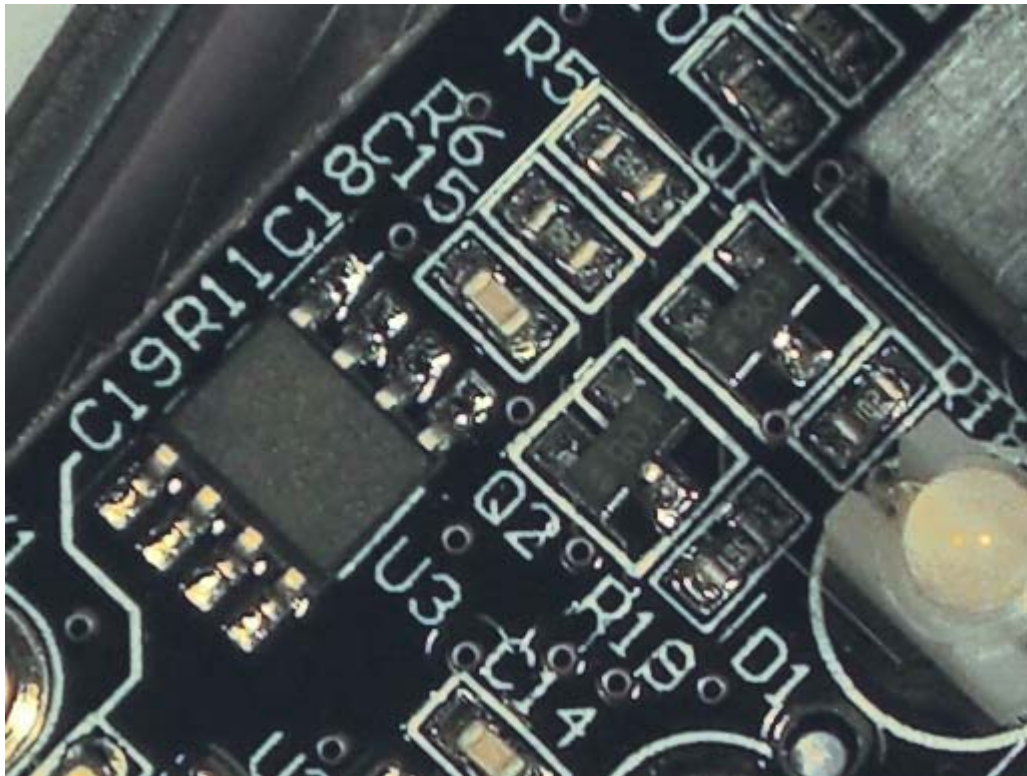


Abbildung 54 Ausschnitt aus einer bestückten Platine, man sieht IC und Widerstände in surface mount technology

Abbildung 55 zeigt einen IC im Gehäuse. Man erkennt, dass das Gehäuse auf der Platine wesentlich mehr Platz einnimmt als der IC.

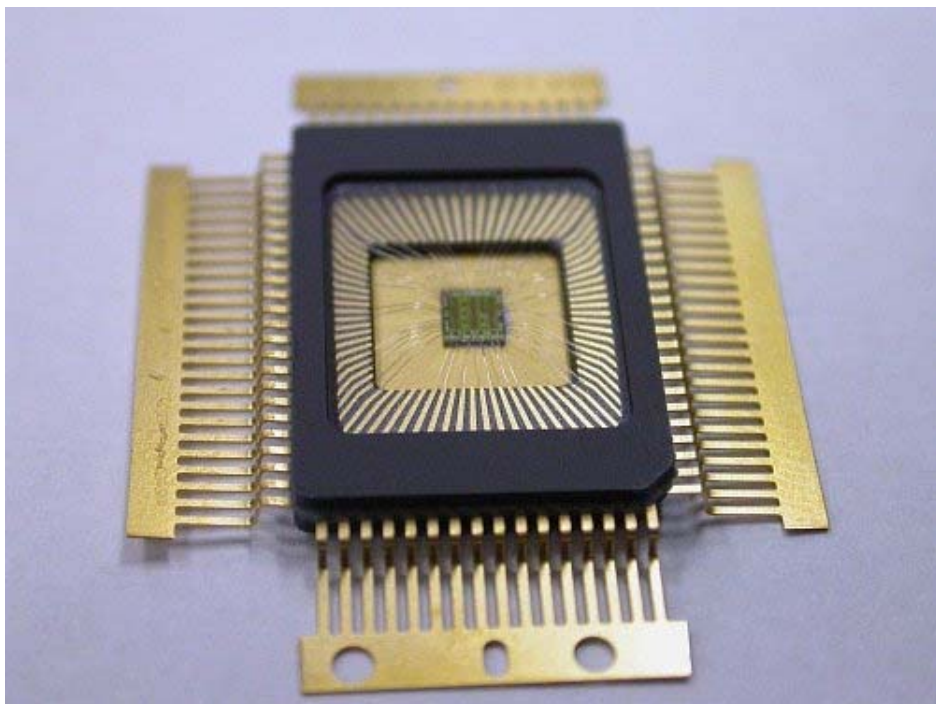


Abbildung 55 Chip im Gehäuse, die Verbindungsstreifen an den Außenanschlüssen werden nach Montage auf der Platine entfernt

Damit ist die Integrationsdichte auf dem IC zwar riesig. Bei der Montage auf der Platine wird aber viel Fläche verschwendet. Ein Grund für diese Verschwendung ist die unterschiedliche Strukturgröße, die auf ICs und Platinen realisiert werden

Moderne Herstellverfahren

kann. Die Anschlüsse auf dem IC sind einige 10µm auseinander, auf einer Platine werden meist Raster von 1/40'', also 0,635mm, noch gut beherrscht. (In der Elektronikindustrie werden oft amerikanische Zoll-Maße verwendet.) Das IC-Gehäuse muss über diesen Graben die Brücken bauen.

Um die Integrationsdichte auf Baugruppen-Ebene zu erhöhen, wurden zwei Techniken entwickelt: die Dickschichttechnik und die Dünnschichttechnik.

Die Dickschichttechnik ist eine Drucktechnik. Wie bei einer Lithographie werden leitfähige Pasten über ein strukturiertes Sieb auf ein Keramik-Substrat gedruckt und dann bei hoher Temperatur eingebrannt. Darauf werden dann die ungehäuteten Chips aufgebracht. Strukturen von etwa 100 µm können so erreicht werden. Werden Pasten mit geringer Leitfähigkeit verwendet, können auch Widerstände erzeugt werden. Mit sensorisch aktiven Pasten können auch Sensoren direkt aufgebracht werden. Durch Wiederholung der Arbeitsschritte „Bedrucken“ und „Erhitzen“ können mehrere Schichten übereinander erzeugt werden. Die Schichtdicken sind im Bereich mehrerer Mikrometer bis etwa 100 µm. Dies ist relativ dick, daher der Name der Technik. Dickschichtschaltungen sind dadurch stabil und werden oft in rauen Umgebungen eingesetzt.

Die Dünnschichttechnik ist eine Aufdampftechnik. Im Vakuum wird auf ein Substrat eine dünne metallische Schicht aufgedampft, deren Dicke meist kleiner als 1 µm ist. Diese Schicht wird dann photolithographisch strukturiert. Strukturen im Mikrometerbereich sind möglich. Mehrere Lagen können ebenfalls erzeugt werden. Die Integrationsdichte ist deutlich höher als bei der Dickschichttechnik, allerdings auch die Kosten.

11.1 Halbleitertechnik

Mikroelektronische Verfahren

Ausgangsmaterial ist meist eine hochreine Siliziumscheibe, der Wafer. Industriell werden Wafer mit 300mm Durchmesser verwendet, die nächste Generation wird 450mm Durchmesser haben. (Frage: Wieviel ICs mit einer Fläche von 20mm² können heute bzw. künftig auf einem Wafer untergebracht werden?) Da Bauelemente wie Dioden und Transistoren aus unterschiedliche dotiertem Silizium bestehen, muss der Wafer an vielen Stellen unterschiedlich dotiert werden. Dann müssen elektrische Verbindungen und Isolationen erzeugt werden.

Der Wafer soll immer im Ganzen bearbeitet werden, andererseits müssen viele kleine Strukturen erzeugt werden. Dieser scheinbare Widerspruch wird durch die Verwendung von Masken gelöst. Diese werden einmal hergestellt und können dann für viele Wafer verwendet werden.

Den grundsätzlichen Ablauf dieses Maskenverfahrens zeigt Abbildung 56. Das Substrat, hier also der Si-Wafer, wird vollständig mit einem Metall oder einem Isolator beschichtet. Diese Beschichtung kann beispielsweise durch Aufdampfen im Hochvakuum erfolgen. Eine Oxidschicht kann auch erzeugt werden, wenn der Wafer bei hoher Temperatur in einer feuchten Atmosphäre gebracht wird. Dann oxidiert das Silizium.

Diese Schicht soll nun strukturiert werden. Dazu wird auf die gesamte Oberfläche ein Photolack aufgetragen. Dann wird die Oberfläche durch eine Maske mit parallelem Licht beleuchtet, der Photolack also belichtet. [Die Maske selbst besteht meistens aus einer Quarzplatte mit einer Chromschicht. Die Chromschicht

wird dann mit einem Elektronenstrahl oder einem Laser strukturiert. Auch eine Photolackbeschichtung und anschließende Belichtung ist möglich.]

Der belichtete Photolack wird dann entwickelt. Die unbelichteten Flächen werden fest, die belichteten werden im Flüssigbad aufgelöst. Jetzt ist die Beschichtung an den belichteten Stellen freigelegt und kann dort in einem Ätzbad aufgelöst werden. Dann wird der ausgehärtete Photolack entfernt und die Beschichtung ist strukturiert worden. Dieser Prozess heißt Photolithographie.

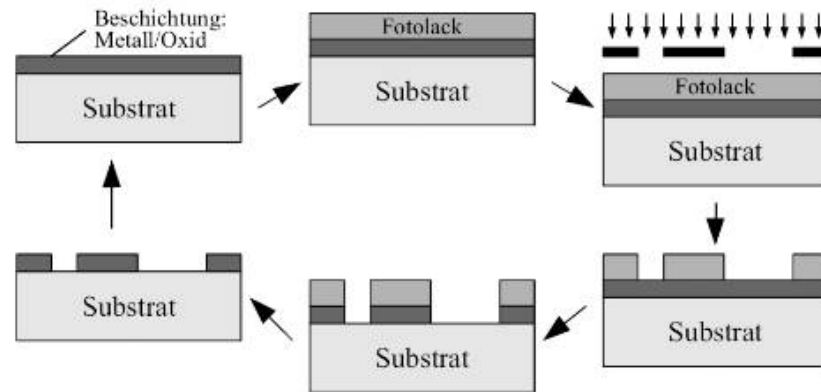


Abbildung 56 Ablauf der Planartechnik zur lokalen Oberflächenveränderung durch Photolithographie²⁰

Auf diese Weise kann auch im ersten Schritt nur mit einer Photolackbeschichtung eine Lackstruktur auf dem Wafer erzeugt werden, durch deren offene Stellen die Dotierungsatome in das Silizium eingebracht werden können.

Für diese Dotierung gibt es viele Möglichkeiten. Beispielsweise können die Dotierungsatome in einem Beschleuniger auf hohe Energie gebracht werden und dann in den Si-Wafer im Hochvakuum implantiert werden.

Sind so die dotierten Stellen erzeugt worden, werden die leitenden und die isolierenden Schichten aufgebracht und strukturiert.

Danach wird der Wafer zersägt und in die einzelnen ICs zerlegt, die dann in ihre Gehäuse eingesetzt werden. Die IC-Anschlüsse werden durch Drahtbonden mit den Anschlüssen im Gehäuse verbunden und das Gehäuse wird verschlossen.

Sehr instruktive und schöne Bilder sind (jedenfalls im September 2010) unter <http://www.halbleiter.org/bilder/> zu finden.

²⁰ Hilleringmann 2006, S. 16

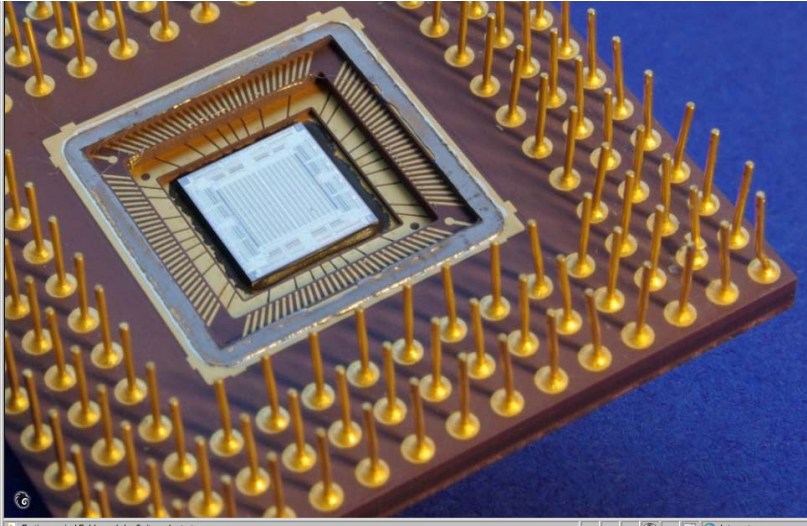


Abbildung 57 Chip im Gehäuse, noch nicht gebondet

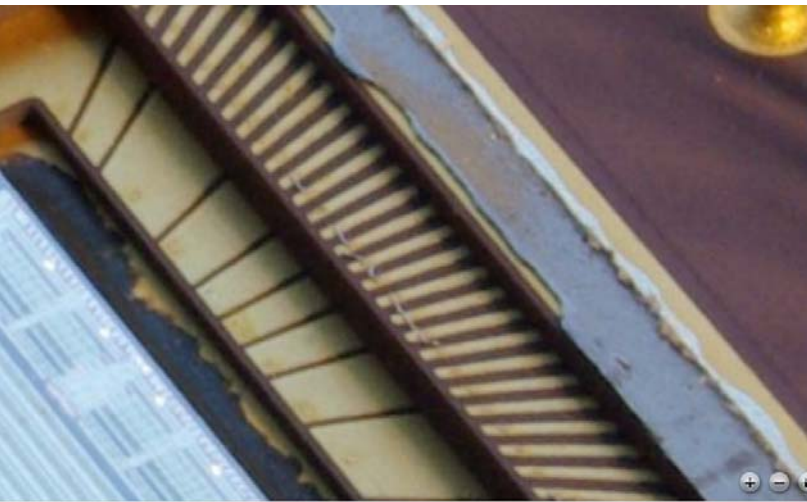


Abbildung 58 Ausschnitt aus dem vorigen Bild

Mikrostrukturtechnik

In der Mikrostrukturtechnik müssen neben den elektrischen Bauteilen auch noch mechanische und sensorische Strukturen auf dem Chip untergebracht werden. So werden für Drucksensoren dünne Membranen über einem freien Raum benötigt, für Beschleunigungssensoren müssen frei schwingende Balken erzeugt werden.

Dies erreicht man unter anderem durch sogenannte Opferschichten. Diese werden photolithographisch strukturiert, wie oben beschrieben. Dann wird eine weitere Schicht auf diese Opferschicht aufgebracht. Dann wird die Opferschicht weggeätzt: ein Hohlraum ist entstanden.

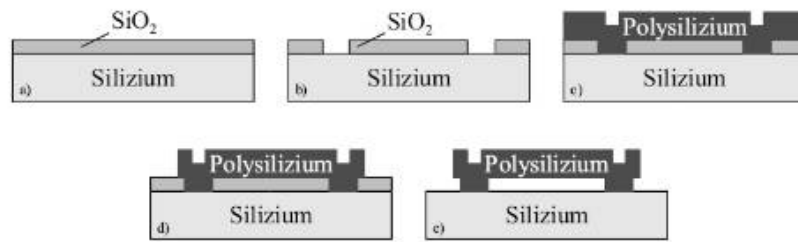


Bild 3.14: Prozessablauf in der Oberflächenmikromechanik: a) Abscheiden eines Opferoxidfilms, b) Strukturierung des Oxids, c) Abscheiden des polykristallinen Siliziums, d) Ätzen des Polysiliziums, und e) freitragende Siliziumbrücke durch Entfernen des Opferoxides

Abbildung 59 Prozessablauf in der Oberflächenmikromechanik ²¹

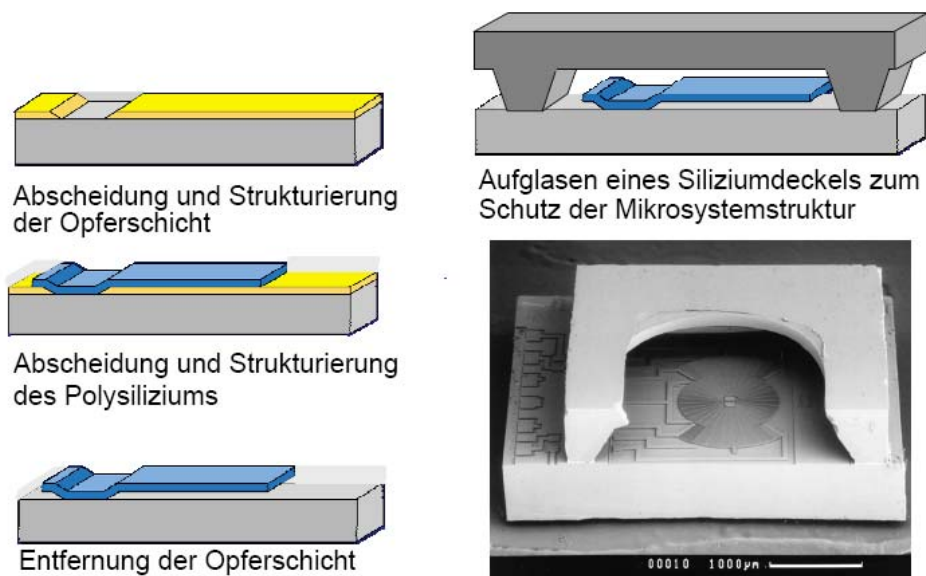


Abbildung 60 Strukturierung von Opferschichten (Uni Freiburg)

Die nächsten Abbildungen zeigen einige Anwendungsbeispiele.

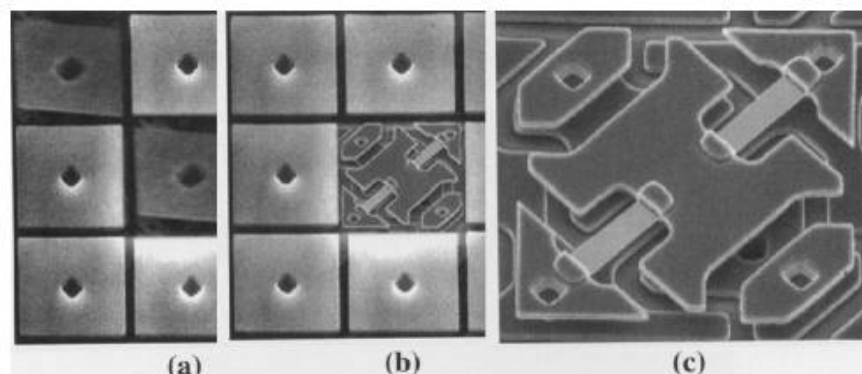


Abbildung 61 Spiegelarray zur digitalen Bildprojektion: a) Spiegelelemente, b) abgelöstes Spiegelelement und c) Detailansicht der Aufhängung²²

²¹ Hilleringmann 2006, S. 92

Moderne Herstellverfahren

In Abbildung 61 ist die Grundlage von der Mikro-Spiegel-Arrays gezeigt, die in vielen Beamer eingesetzt werden. Spiegel von etwa $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$ sind an zwei Balken befestigt. Wird zwischen Elektroden auf der Rückseite und dem Spiegel eine Spannung angelegt, so kippt er aus seiner Ruhelage. Auftreffendes Licht wird dann in eine andere Richtung reflektiert.

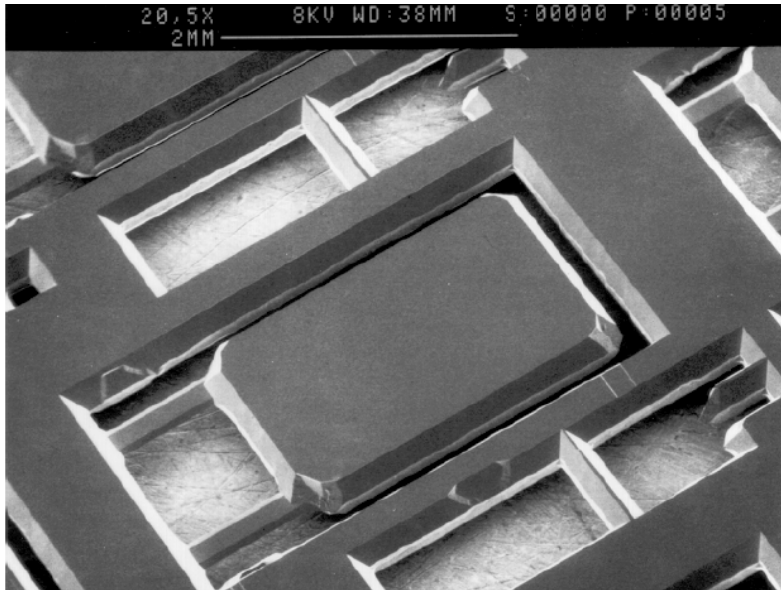


Abbildung 62 Ein Beschleunigungssensor, die schwere Masse in der Mitte hängt frei an den beiden linken Stegen

11.2 Dickschichtverfahren

Bei der Dickschichttechnik werden Leiterbahnen und Widerstände als Pasten in einem Siebdruckverfahren auf ein Substrat gedruckt und dann bei hohen Temperaturen eingebrannt. Auch Isolationsschichten können aufgebracht werden, so dass mehrlagige Schaltungen möglich sind. Auf die Schaltung werden dann weitere Bauteile wie ICs oder Kondensatoren gelötet.

²² Hilleringmann 2006, S. 197

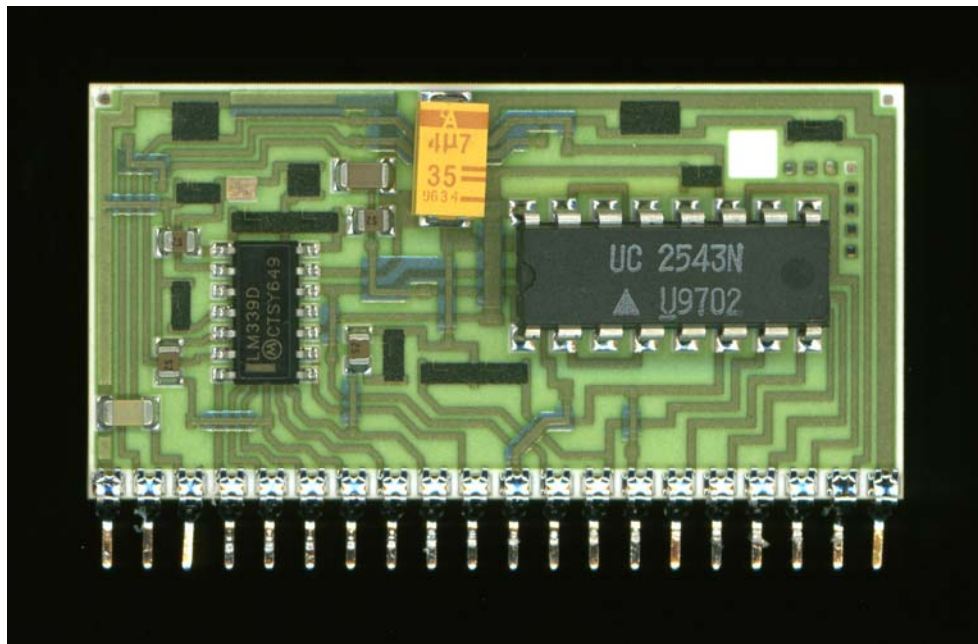


Abbildung 63 Aufbau auf einer Dickschichtschaltung, die schmalen, schwarzen Strukturen sind integrierte Widerstände

Die ICs können durchaus ohne Gehäuse aufgebracht werden, das steigert die Integrationsdichte. Sind mehrere ungehäuste Chips auf einem Keramiksubstrat, spricht man auch von einem Multi-Chip-Modul.

11.3 Dünnschichtschaltungen

In der Dünnschichttechnik werden, ähnlich wie in der Halbleitertechnik, dünne, leitende und isolierende, Schichten auf ein Keramik- oder Glassubstrat durch Aufdampfen oder ähnliche Verfahren aufgebracht und dann photolithographisch strukturiert.

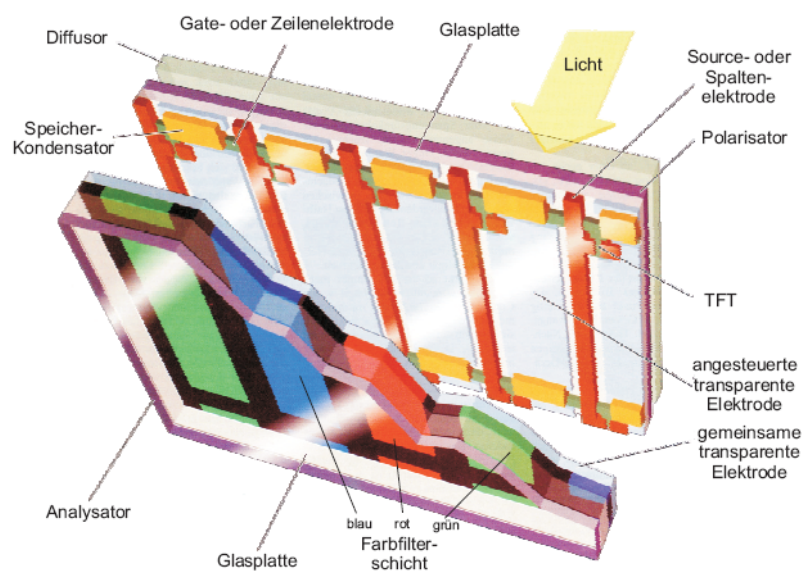


Abbildung 64 Aufbau eines Flachbildschirms mit Dünnschichttransistoren

Die wohl am weitesten verbreitete Anwendung der elektronischen Dünnschichttechnik sind die heutigen LCD-Displays, die TFT's enthalten. TFT heißt thin film transistor. Auf einer Innenseite der Displays befindet sich für jede

Suchen und Verwalten von Literatur

Bildzelle, für jedes Pixel, ein eigener Transistor, der in Dünnschichttechnik aufgebracht wurde. Mit diesem Transistor wird die Zelle angesteuert.

Der Laptop, an dem diese Lerneinheit geschrieben wurde, hat einen Bildschirm mit etwa 30cm Breite und 1366 Pixel. Als Farbbildschirm ist aber jedes Farbpixel aus drei Pixeln mit den Farben Rot, Grün und Blau zusammengesetzt, die beispielsweise nebeneinander angeordnet sind. Also enthält die Bildschirmbreite etwa 4000 einfarbige Pixel. Ein solches Pixel ist dann $300\text{mm}/4000 = 75\mu\text{m}$ breit. Der Transistor nimmt nur einen Bruchteil davon ein.

11.4 Hybridtechnik

Ein Ziel der Fertigungstechnik von Sensoren ist es, immer mehr Funktionen auf immer kleinerem Raum unterzubringen. Dazu ist die Integration auf einem Chip am Besten geeignet. Andererseits gibt es Sensoren, die sich nicht, oder nur mit Schwierigkeiten oder zu hohen Kosten, auf Silizium realisieren lassen. Dann wendet man oft die Hybridtechnik an. Dabei werden mehrere Bauteile auf einem Substrat untergebracht. Im Grunde ist daher diese Hybridtechnik nichts anderes als eine Anwendung der Dickschicht- oder Dünnschichttechnik.

Ein gutes Beispiel ist der Beschleunigungssensor in Abbildung 38. Die piezoelektrischen Biegeelemente bilden das Messelement. Diese sind zusammen mit den Elektronikbausteinen auf einem Substrat aufgebaut.

12 Suchen und Verwalten von Literatur

Es hat sich inzwischen eingebürgert, Informationen im Internet zu suchen. Das ist nicht ohne Risiko. Insbesondere wenn man auf die Verlässlichkeit von Informationen angewiesen ist. Bei den meisten Quellen im Internet weiß man nicht, welche Qualifikation der Autorenschaft zu Grunde liegt. Stammt die Information von einer fachlich sehr gut ausgewiesenen Person? Oder von Schülerinnen und Schülern, die ein Referat zusammengetragen haben? Man weiß auch nicht, welche Interessen hinter der Autorenschaft möglicherweise stehen. Stammt die Information über ein besonders gepriesenes Produkt vom Hersteller? Versucht jemand eventuell, eine mit der eigenen Technologie konkurrierende Technik zu diskreditieren? Selbst Wikipedia ist von diesen Problemen nicht frei. So hört man, dass Einträge über hohe Firmenmanager von der eigenen Presseabteilung geschrieben wurden. Gelegentlich kann man feststellen, dass ein Sachverhalt in der deutschen und der englischen Ausgabe völlig anders dargestellt wird. Insofern sind Internet im Allgemeinen und Wikipedia im Besonderen zwar geeignet, sich einmal in ein Gebiet einzulesen oder um vielleicht Hinweise auf gute Quellen zu bekommen. Auch lassen sich oft schöne und informative Abbildungen finden. (Was in dieser Lerneinheit auch ausgenutzt wurde.) Aber allein die Tatsache, dass etwas im Internet steht, ist kein Zeichen für die Verlässlichkeit einer Information.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Also müssen die herkömmlichen und bekannten Methoden der Literatursuche weiter angewendet werden.

Dazu gehört als erstes die Suche in den Datenbanken, die über die Fachbibliotheken und Hochschulbibliotheken zur Verfügung gestellt werden.

Eine Internet-gestützte Möglichkeit ist die Verwendung von Suchmaschinen. Besonders vorteilhaft sind zwei Möglichkeiten von Google: die Google-Buchsuche und Scholar-Google. Viele Bücher sind von Google ganz oder teilweise digitalisiert worden, so dass man oft Inhalte aus Büchern direkt erhalten kann, ohne Zeitverzögerung durch den konventionellen Leihverkehr. Scholar-Google ist eine Suchmaschine, die nur in wissenschaftlichen Veröffentlichungen sucht. Zu finden ist sie unter „scholar.google.com“ oder „scholar.google.de“. Die Suchergebnisse umfassen zwar gelegentlich auch nichtwissenschaftliche Veröffentlichungen, auch werden nicht alle Artikel gefunden, die in wissenschaftlichen Bibliotheksdatenbanken gefunden werden, aber es ist sicher eine einfach zu handhabende und wirksame Ergänzung für die herkömmliche Suche.

Patente

Patentrecherchen lassen sich über das Internet sehr einfach, kostenlos und offiziell beim Patentamt durchführen. Die entsprechende URL ist <http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/>.

Die Seite bietet unterschiedliche Suchmöglichkeiten, wahrscheinlich kommen Sie mit der Einsteiger-Recherche am Besten zurecht. Man kann nach Stichworten, Gebieten, Erfindern und vielem mehr die Suche durchführen. Die ermittelten Patente können als pdf-Datei gespeichert werden.

Verwendung eines Literaturverwaltungsprogramms

Wie sammeln und ordnen Sie die Informationen, die Sie der Literatur entnommen haben? Im letzten Jahrhundert wurde dafür der Zettelkasten verwendet. Heute gibt es dafür Literaturverwaltungsprogramme. Solch ein Programm legt eine Datenbank an, in der die Quellen, also die Bücher, Artikel usw., mit ihren bibliographischen Angaben wie Titel, Autor, Verlag usw. gespeichert werden. Zu jeder Quelle kann man dann Zitate eingeben, und zwar Text- und Bildzitate. So ersetzt diese Datenbank den Zettelkasten.

Zusätzlich lassen sich dann die Zitate in das eigene Schriftstück durch einen einfachen Befehl einfügen. Dabei wird neben dem Zitat auch der entsprechende Verweis eingefügt, wahlweise als Fußnote, Endnote oder im Text. Nach Abschluss der Arbeit an seinem Dokument erstellt das Programm dann auch noch automatisch die Literaturliste.

Die Programme bieten auch Unterstützung bei der Recherche in Datenbanken (internet-gestützt) und bei der Planung und Strukturierung der eigenen Arbeit. Aber zu Beginn werden Sie diese Möglichkeiten vermutlich weniger nutzen.

Welches Programm soll man benutzen? Darauf kann hier keine fundierte Antwort gegeben werden. Ich selbst habe vor einiger Zeit eher zufällig mit dem Programm von Citavi begonnen und komme damit gut zurecht. Es gibt eine kostenlose Version, in der maximal 100 Quellen in einer Datenbank gespeichert werden können. Für die meisten Arbeiten im Studium sollte dies ausreichen, denn es lassen sich beliebig viele Datenbanken für unterschiedliche Themen anlegen.

Das Programm kann man von folgender URL herunterladen:

<http://www.citavi.com/>

Möchte man eine neue Quelle aufnehmen, so kann man den Typ der Quelle auswählen, also Zeitschriftenartikel, Buch, Internetquelle usw. Ist die Quelle ein Buch, so erscheint ein Fenster, in das man die bibliographischen Angaben des Buches einträgt. Am einfachsten ist es, wenn man die ISBN-Nummer kennt und

Suchen und Verwalten von Literatur

einträgt. Dann werden die anderen Angaben über das Internet gesucht und automatisch eingefügt. Für eine hier verwendete Quelle sieht das Fenster dann folgendermaßen aus:

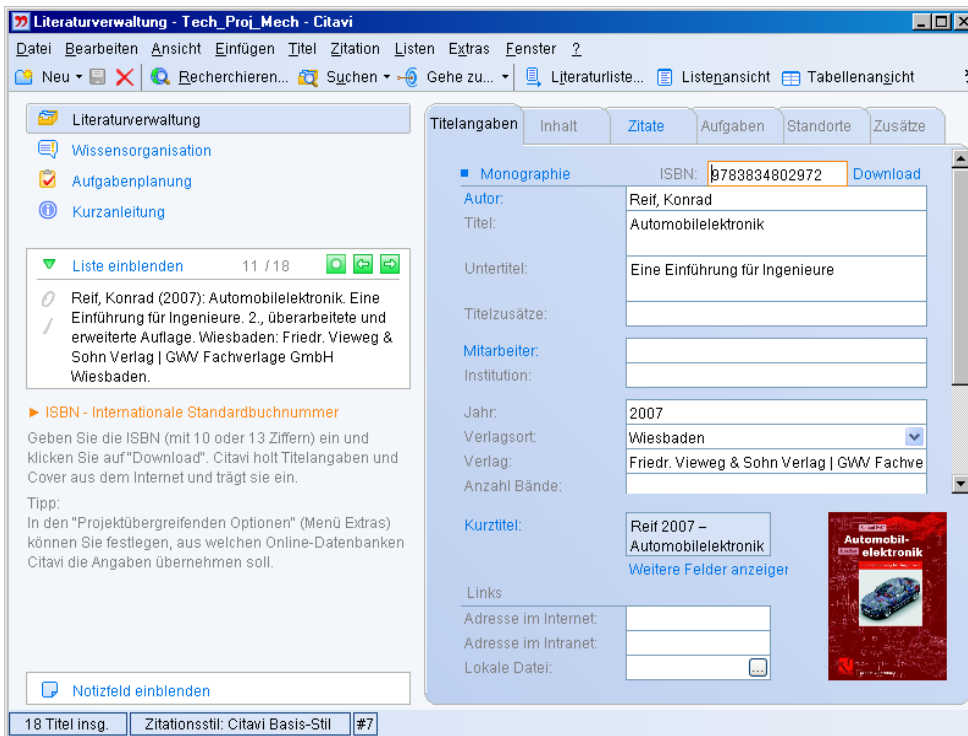


Abbildung 65 Fenster des Programms Citavi mit bibliographischen Angaben zu einer Quelle

Unter dem hier erkennbaren Reiter „Zitate“ lassen sich dann die Zitate einfügen.

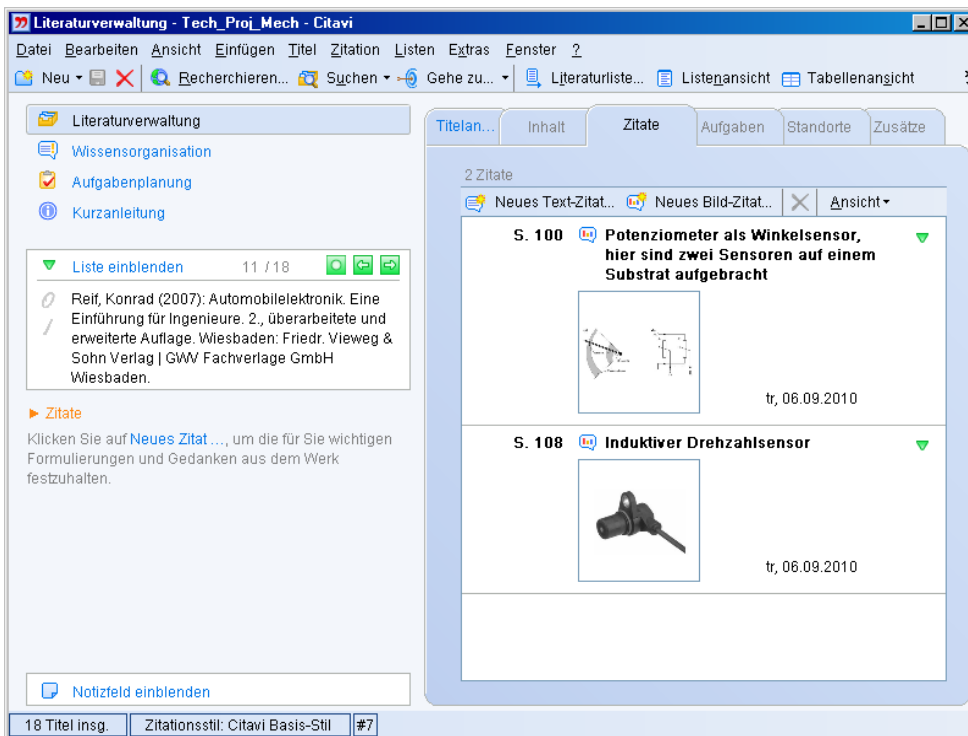


Abbildung 66 Citavi-Fenster mit Zitaten

Unter dem Menüpunkt „Zitation“ kann man dann das ausgewählte Zitat an der Stelle im eigenen Word-Dokument einfügen, an der der Cursor steht. Dabei wird das Zitat direkt vollständig in das Dokument eingefügt, der Verweis aber nur mit einem Platzhalter.

Ist das Dokument erstellt und gespeichert, kann man unter dem Menü „Zitation“ den Unterpunkt „Publikation formatieren“ aufrufen. Dann werden im Dokument alle Platzhalter durch korrekt formatierte Verweise ersetzt und das Literaturverzeichnis wird am Schluss des Dokuments angelegt.

Tipp: Diese Formatierung sollte mit Word-doc Dokumenten funktionieren, macht aber gelegentlich Probleme. Sicherer ist es, das Dokument vor der Formatierung im rtf-Format abzuspeichern und dann zu formatieren. Danach kann es wieder mit Word in das übliche doc-Format umgewandelt werden.

13 Das Referat

Ziel Ihres Vortrages ist es, innerhalb von 20 Minuten das Thema korrekt und verständlich darzustellen. Die Verständlichkeit orientiert sich an der Hörerschaft. Dies sind Ihre Kommilitoninnen und Kommilitonen. Sie können also alles, was in dieser Ausarbeitung behandelt wurde, als bekannt voraussetzen.

Für die Präsentation stehen Rechner und Beamer zur Verfügung. Um technische Schwierigkeiten zu vermeiden, bringen Sie die Präsentation auf einem USB-Stick mit. Wenn Sie keine Powerpoint-Format verwenden, speichern Sie die Präsentation zusätzlich in einem pdf-Format ab.

Bei der Gestaltung der Seiten berücksichtigen Sie bitte Folgendes:

Die räumliche Auflösung von Beamern ist etwa zehnmal schlechter als die von Druckern. Kleine Details oder Schriftarten werden daher oft unleserlich.

Die Leuchtstärke von Beamern ist wesentlich geringer als die von Tageslicht-Projektoren. Kontraste werden daher oft schlecht wiedergegeben. Arbeiten Sie also möglichst NICHT mit vielen farbigen Hintergründen. Dunkelgrüne Schrift auf hellgrünem Hintergrund ist meist nicht erkennbar.

Literaturverzeichnis

The global sensor market in 2010 reached 60 billion U.S. \$ (2010). Online verfügbar unter <http://www.articlefield.com/39348/the-global-sensor-market-in-2010-reached-60-billion-u-s-dollars-more-automoti/>, zuletzt aktualisiert am 24.07.2010, zuletzt geprüft am 06.09.2010.

Norm, DIN EN 60584-1, Oktober 1996: Thermopaare.

Hesse, Stefan; Schnell, Gerhard (2009): Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion - Ausführung - Anwendung. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.

Hilleringmann, Ulrich (2006): Mikrosystemtechnik. Prozessschritte, Technologien, Anwendungen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.

Infineon technologies (o.J.): Datenblatt KTY-Sensoren.

Jain, Anil K. (2007): Biometric recognition. In: nature, H. 449, S. 38–40. Online verfügbar unter http://www.sas.el.utwente.nl/open/courses/intro_biometrics/Jain07.pdf.

Reif, Konrad (2007): Automobilelektronik. Eine Einführung für Ingenieure. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.

Reif, Konrad (2010): Sensoren im Kraftfahrzeug. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.