

12 Sensoren

12.1 Grundlagen

12.1.1 Prinzip und Motivation

Ein Sensor (lat.: sensus, Sinn) wandelt eine physikalische Größe (z.B. Kraft oder Temperatur) mit Hilfe eines physikalischen Effektes in ein weiterverarbeitbares elektrisches Signal (z.B. elektrischer Widerstand, Spannung oder Strom) um. Innerhalb des Sensors kann man verschiedene Stufen unterscheiden: die Signalaufnahme, die Umwandlung und die Verstärkung.

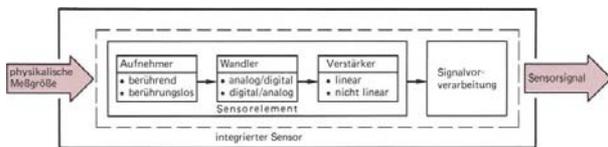


Abbildung 12.1: Die wichtigsten Komponenten eines Sensors.

Die Digitalisierung der Elektronik führt auch hier dazu, dass zunehmend die Sensorelemente bereits mit einer Signalverarbeitung kombiniert werden. Dabei werden häufig unterschiedliche Signalaufnehmer kombiniert und gemeinsam weiterverarbeitet. Dies erlaubt u.a. die Erzeugung von Signalen, die von Umgebungseinflüssen, wie z.B. Temperaturdifferenzen oder Spannungsschwankungen unabhängig sind.

Präzisionsmessungen von wichtigen physikalischen Größen, wie z.B. der Lichtgeschwindigkeit oder des elektrischen Dipolmoments, können als eigenes Forschungsgebiet betrachtet werden. Hier ist der entscheidende Ansatzpunkt häufig derjenige, ein Messgerät zu konstruieren, welches die gewünschte Größe mit höchster Präzision in eine andere, leichter zu messende Größe umwandelt, ohne dabei zusätzliche Störsignale zuzulassen.

Während wir uns hier primär mit Sensoren beschäf-

tigen, welche in physikalischen Experimenten eingesetzt werden, ist das Gebiet sehr viel größer: Sensoren werden in allen Bereichen der Industrie, wie auch zunehmend in Gegenständen des täglichen Bedarfs eingesetzt. So werden z.B. in einem modernen Mobiltelefon neben berührungsempfindlichen Bildschirmen Beschleunigungssensoren, Annäherungssensoren, Umgebungslichtsensoren und Feuchtigkeitssensoren verwendet. Die Automatisierung vieler Prozesse in Industrie basiert darauf, dass die Maschinen und Roboter mit Hilfe von Sensoren Informationen über die zu verarbeitenden Gegenstände erhalten.

In vielen Fällen hängt die Ausgangsgröße (also z.B. die erzeugte Spannung) nicht nur von einem Parameter (z.B. eine Temperatur) ab, sondern auch von weiteren, wie z.B. Druck, Magnetfeld etc. Um solche störenden Einflüsse zu reduzieren, verwendet man deshalb häufig spezielle Anordnungen, wie z.B. eine Differenzmessung, bei der die störenden Einflüsse eliminiert werden.

12.1.2 Klassifizierung

Sensoren wandeln bestimmte Größen in andere, einfacher zu messende Größen um. Die interessierende Größe kann elektrisch sein, aber auch optisch, mechanisch (Kraft, Beschleunigung), thermodynamisch (z.B. Temperatur), akustisch, chemisch ... Diese werden meist in elektrische oder optische Größen umgewandelt.

Im Rahmen dieser Einführung können nur einige grundsätzliche Überlegungen angestellt werden. Wir gehen zunächst auf elektrische Messgrößen ein und geben anschließend einen kurzen Überblick über weitere Arten von Sensoren.

12.2 Elektrische Größen

12.2.1 Strom

Geräte für die Messung von Strom gehören zu den ältesten Sensoren.

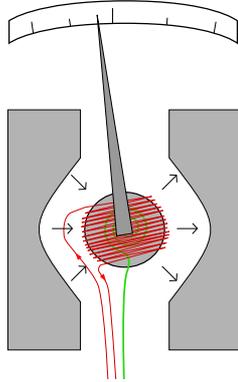
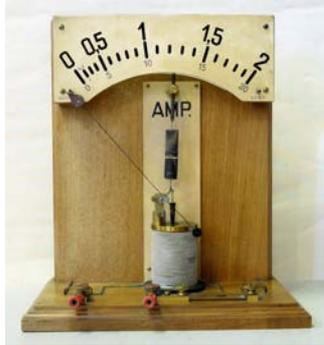


Abbildung 12.2: Drehspulinstrument als Stromsensor.

In diesem Beispiel wird der Strom durch eine Spule in einem Magnetfeld geleitet. Dadurch wird der Strom in eine Rotation umgewandelt, welche detektiert wird.

Bei heutigen Strom-Messgeräten wird der Strom meist in eine Spannung umgewandelt, welche anschließend detektiert wird.

12.2.2 Ladung

Ladungen zu messen ist eine relativ schwierige Aufgabe. Es ist zwar heute möglich, einzelne Elementarladungen zu messen, allerdings nur unter idealen Bedingungen bei tiefen Temperaturen. Typische Aufgaben beinhalten z.B. die Messung der Ladung auf einem Kondensator. Eine solche Konfiguration besitzt eine Energie

$$E = \int V dQ = \frac{1}{C} \int Q dQ = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CV^2}{2}.$$

Als einfaches Beispiel nehmen wir $C=1$ pF und $V = 1$ V. Dann beträgt die gespeicherte Energie $0.5 \cdot 10^{-12}$ J.

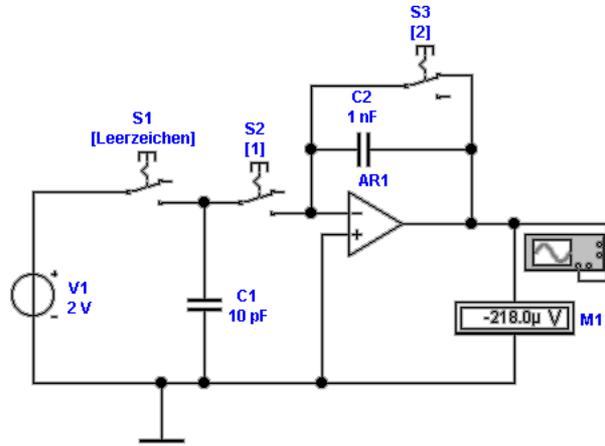


Abbildung 12.3: Messung der Ladung auf C_1 mit Hilfe eines Integrators.

Abb. 12.3 zeigt, wie die Ladungen auf einem Kondensator mit Hilfe eines Integrators gemessen werden kann: Wird der Kondensator an den OP angeschlossen, so steigt der Ausgang auf den Maximalwert und er bleibt dort, but die gesamte Ladung des Kondensators C_1 auf C_2 umgeladen wurde. Somit kann die Ladung aus der Länge des Spannungspulses bestimmt werden.

12.2.3 Impedanz

In Kapitel 3.2.2 hatten wir die Messung von Impedanzen über Brückenschaltungen diskutiert. Dies ist grundsätzlich für reelle wie auch komplexe Impedanzen möglich.

Bei reaktiven Impedanzen (L , C) gibt es weitere Möglichkeiten. So kann man sie über

- die Zeitkonstante beim Ein- und Ausschalten
- die Resonanzfrequenz von Schwingkreisen
- Phasenverschiebungen von harmonischen Signalen
- uvm

bestimmen.

12.3 Andere Größen

12.3.1 Zeit und Frequenz

Frequenz und Zeitmessungen werden auf die Bestimmung einer Periodendauer, beziehungsweise auf die Zählung von Pulsen eines stabilen Generators zurückgeführt. Zeit und damit auch Frequenz ist die am genauesten bestimmbare physikalische Größe.

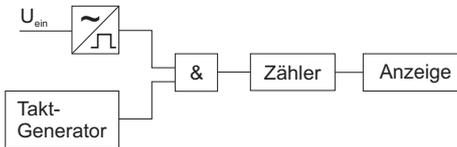


Abbildung 12.4: Messung von Zeit und Frequenz mit einem Zähler.

Ist die Zählung fehlerlos (meist eine gute Annahme), so ist die Präzision der Messung nur durch die Stabilität des Taktgenerators beschränkt. Diese ist mittlerweile extrem hoch: Frequenzstandards halten die Taktrate bis auf 10^{-15} stabil.

Neben der Stabilität ist dabei die Frequenz des Taktgenerators wichtig: je höher dies ist, desto höher ist die Auflösung bei der Messung einer einzelnen Periode. Eine höhere Präzision kann man auch durch Messung von mehreren Perioden erhalten, allerdings wächst dabei auch die Messzeit.

12.3.2 Ort und Länge

Abstandsmessungen umfassen einen Bereich von 44 Größenordnungen. Dieser beginnt bei $\approx 10^{-18}$ m, der Größe von Elementarteilchen, und reicht bis zu kosmologischen Distanzen von $\approx 10^{26}$ m. Auf diesen unterschiedlichen Größenskalen werden sehr unterschiedliche Messverfahren eingesetzt.

Von den vielen physikalischen Verfahren betrachten wir hier als Beispiel ein kapazitives Messverfahren. Hier wird ein Abstand zwischen zwei Flächen über die Kondensatorgleichung

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

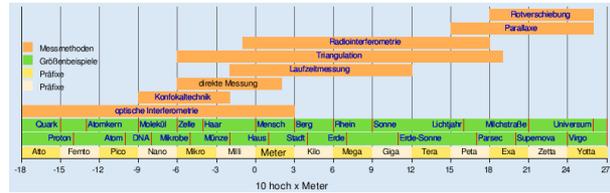


Abbildung 12.5: Distanzmessverfahren auf unterschiedlichen Größenskalen.

in eine Kapazität umgewandelt. Diese kann anschließend, wie oben besprochen, z.B. über die Verschiebung der Resonanzfrequenz eines Schwingkreises gemessen werden.

Alternativ kann man eine Position in eine Induktivität umwandeln, indem man einen Eisenstab in eine Spule hineinschiebt. Dies kann auch zu einer Differenzmessung erweitert werden, indem man die Differenz der Spannungen in zwei Spulen an unterschiedlichen Orten misst.

Andere Möglichkeiten der Längenmessungen umfassen akustische und optische Sensoren. Die präzise Messungen im Bereich von mm bis km verwenden optische Interferometrie. Hier werden Längen mit optischen Wellenlängen verglichen und in Lichtintensitäten umgewandelt.

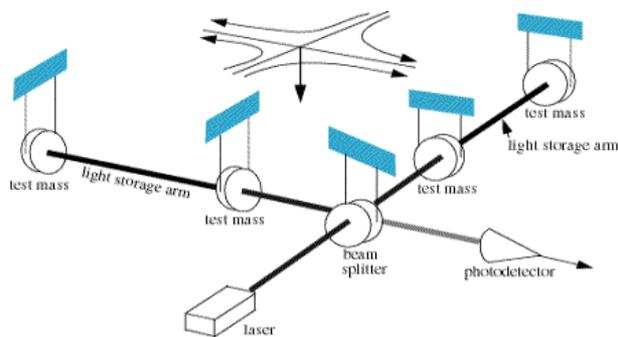


Abbildung 12.6: Laser-interferometrisches Messgerät für den Nachweis von Gravitationswellen.

Im Extremfall von Gravitationswelleninterferometern wie z.B. LIGO, GEO 600, TAMA, VIRGO und ACIGA können Änderungen in den Armlängen von

$$\frac{\Delta l}{l} < 10^{-20}$$

detektiert werden.

12.3.3 Magnetfelder

Magnetische Felder können auf sehr unterschiedliche Weisen gemessen werden. Eine einfache Möglichkeit sind rotierende Spulen: hier wird eine Spannung induziert, welche proportional zur Flussdichte ist.

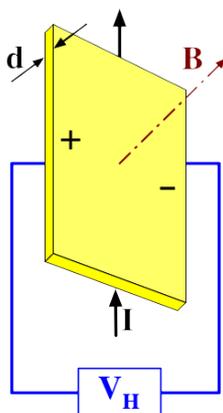


Abbildung 12.7: Hall-Effekt.

Hall Sensoren messen die Hall-Spannung

$$U_H = -\frac{IB}{dne}$$

Hier ist I der Strom, B die magnetische Flussdichte, d die Dicke des Sensors und e und n die Ladung und die Ladungsträgerdichte. Die Hall Spannung entsteht durch die Ablenkung der bewegten Ladungen im Magnetfeld auf Grund der Lorenz-Kraft. Da die Ladungsträgerdichte im Nenner steht, erhält man empfindliche Sensoren wenn man ein Material verwendet, das eine geringe Ladungsträgerkonzentration aufweist. Meistens sind dies Halbleiter. Dies kann man offensichtlich zur Messung von Magnetfeldern verwenden. Indem man alle drei Komponenten des Erdmagnetfeldes misst, kann man z.B. die Orientierung im Raum bestimmen, d.h. der Hallsensor wird zu einem Orientierungssensor.

Während man beim Hall-Effekt die Spannung senkrecht zum Stromfluss misst, ändert sich auch die Spannung in Stromrichtung. Dies wird als longitudinaler Hall-Effekt oder Magnetowiderstand bezeichnet.

Andererseits kann man aber mit Hall-Sensoren auch Positionen oder Abstände messen, wenn dadurch z.B. magnetische Feldlinien umgeleitet werden.



Abbildung 12.8: SQUID.

Weitere Möglichkeiten für die Messung von Magnetfeldern sind SQUIDS. Dabei handelt es sich um sprleitende Schaltungen, welche eine Magnetfeld-dichte in eine Spannung umwandeln.

12.3.4 Piezo-Sensoren

Materialien mit einem permanenten elektrischen Dipolmoment, d.h. Materialien bei denen die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen nicht zusammenfallen, erzeugen eine Spannung wenn daran eine Kraft (resp. ein Druck) angelegt wird.

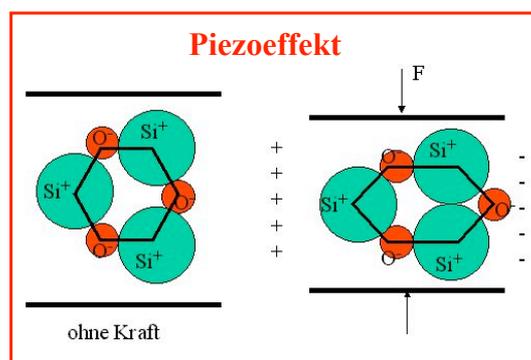


Abbildung 12.9: Piezoeffekt: Ein Druck erzeugt eine Spannung.

Der Effekt wurde von Pierre Curie 1880 entdeckt, aber erst ab den 1950er Jahren wurde er für Sensoren im industriellen Maßstab genutzt. Inzwischen sind solche Sensoren sehr weit verbreitet und werden z.B.

als Drucksensoren in Tastaturen von Mobiltelefonen oder in Mikrofonen verwendet.

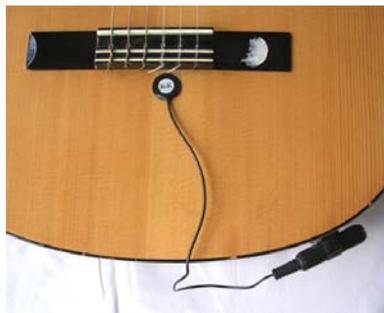


Abbildung 12.10: Mikrofon, welches den Piezo-Effekt verwendet.

Man kann damit natürlich Druck messen, aber auch andere Kräfte, wie z.B. Torsion oder, bei bekannten Materialgrößen, kann damit z.B. die Verbiegung eines Sensors gemessen werden.

12.3.5 Temperatursensoren

Die Temperatur gehört zu den am häufigsten gemessenen Größen, und da sehr viele Effekte von der Temperatur abhängen, gibt es auch sehr unterschiedliche Möglichkeiten für die Messung der Temperatur. Dazu gehört z.B. das Thermoelement, bei dem an einer Grenzfläche zwischen zwei Metallen eine Spannung entsteht, welche von der Temperatur abhängt. Eine andere Möglichkeit ist ein Widerstandsthermometer. Für Metall-Widerstandsthermometer werden Metalle mit hohem Temperaturkoeffizienten und guter Stabilität verwendet, so vor allem Pt, Ni, Ir und Mo. Normiert sind die PT-100 Widerstände, die bei der Referenztemperatur (z.B. 0 °C) auf 100 Ω normiert sind. Die Temperaturvariation beträgt standardgemäß 0.385 Ω/K.

Eine weitere Möglichkeit ist der Strom einer Diode, die gemäß Shockley exponentiell von der Temperatur abhängt. Für praktische Messungen verwendet man häufig nicht eine Diode, sondern die Basisdiode eines Transistors. Um ein lineares Verhalten zu erreichen und Störeinflüsse zu reduzieren, kann man zwei Transistoren mit unterschiedlichen Basisfläche

auf einem Chip integrieren und ihre Ströme vergleichen, oder man vergleicht eine Diode bei zwei unterschiedlichen Strömen. In diesem Fall ändert sich die Basis-Emitter Spannung um

$$\Delta V_{BE} = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}},$$

während alle übrigen Abhängigkeiten eliminiert werden.

Eine kontaktlose Messung ist möglich, wenn die Infrarot-Strahlung gemessen wird. Hierfür werden vor allem Wellenlängen im Bereich von 1-10 μm verwendet.

12.3.6 Chemische Sensoren

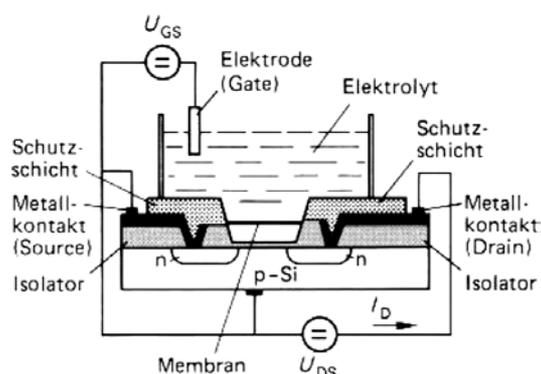


Abbildung 12.11: Prinzip eines chemischen Sensors.

Die Konzentration von bestimmten Molekülen kann ebenfalls mit Hilfe elektronischer Bauteile bestimmt werden. Eine Möglichkeit ist in Abb. 12.11 dargestellt. Wasserstoffmoleküle können in der Lösung gelöst werden und ändern damit die chemischen Potentiale in den Kontakten,

Ein weit verbreiteter chemischer Sensor ist die sogenannte Lambda-Sonde zur Messung des Sauerstoffgehalts in Autoabgasen. Sie besteht aus dem Festelektrolyten ZrO_2 , in dem Sauerstoffionen eine hohe Beweglichkeit haben. Auf beiden Seiten des Festelektrolyten sind poröse Edelmetall-Elektroden (meist aus Platin) aufgebracht, durch die das Sauerstoffgas diffundieren kann. Die eine Elektrode befindet sich dabei im Abgaskanal (zwischen 300 °C

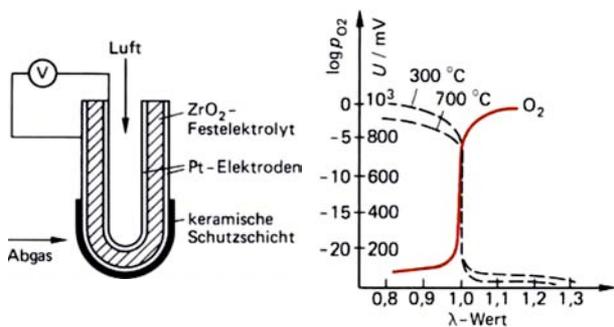


Abbildung 12.12: Aufbau und Kennlinie einer Lambda-Sonde zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts.

und 800 °C) und die andere in Luft. Der Potentialunterschied zwischen den beiden Elektroden ist ein Maß für den Sauerstoffgehalt des Abgases. Bei einer stöchiometrischen Gemischbildung ($\lambda = 1$) ist der Schadstoffausstoß am geringsten. Wird der Bereich $\lambda < 1$ (fettes Gemisch) bis $\lambda > 1$ (mageres Gemisch) durchlaufen, dann ändert sich die Konzentration des Sauerstoffs bei $\lambda = 1$ sprunghaft um mehrere Zehnerpotenzen (siehe rechte Seite in Abb. 12.12). Deswegen kann dieser Punkt messtechnisch sehr gut erfasst und das Kraftstoffgemisch optimal geregelt werden.

12.3.7 Licht

Optische Sensoren sind nicht nur für den Nachweis von Licht nützlich, sie können auch in vielen Fällen für den Nachweis von anderen Größen eingesetzt werden. Empfindliche optische Sensoren umfassen Photomultiplier, heute aber vor allem Halbleiterdetektoren wie z.B. Photodioden und Photowiderstände.

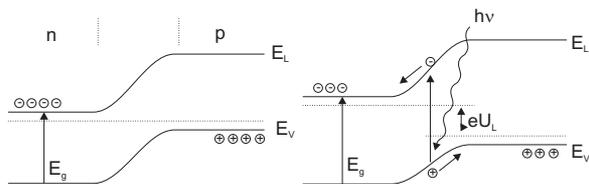


Abbildung 12.13: Nachweis von Licht an einem p-n Übergang.

In einer Photodiode wird bei der Absorption eines Photons ein Elektron aus dem Valenzband ins Leitungsband angehoben. Es entsteht somit ein Paar von Ladungsträgern. Findet der Absorptionsprozess an einem p-n Übergang statt, so werden die beiden Ladungsträger getrennt, anstatt zu rekombinieren. Das Prinzip kann zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet werden (Solarzelle) oder, wenn der p-n Übergang in Sperrichtung betrieben wird, als Sensor für Licht.

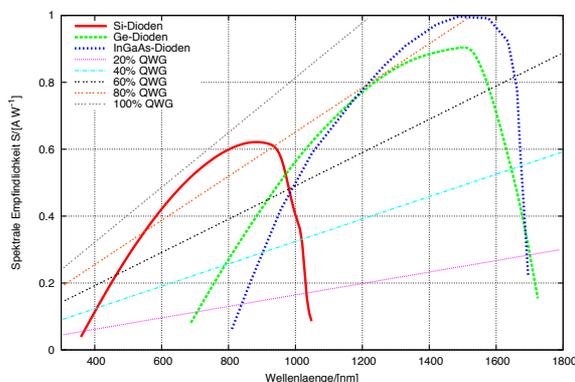


Abbildung 12.14: Spektrale Empfindlichkeit unterschiedlicher Photodioden.

Wie Abb. 12.14 zeigt, hängt die spektrale Empfindlichkeit von der Art der Photodiode ab: bei Halbleitern, deren Bandlücke klein ist, liegt das Absorptionsmaximum im Infraroten, während Si Dioden den gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums abdecken.