
Ausgewählte Themen der Sensorik

Prof. Dr. Carsten Zahout-Heil

Fernmaster Elektrotechnik

Hochschule Darmstadt

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	VI
Lernziele	VII
1 Grundlagen	8
1.1 Signalverarbeitungskette.....	8
1.2 Messgrößen vs. Störgrößen.....	8
1.3 Absolut vs. Inkrementell	9
1.4 Kompensations- und Ausschlagverfahren	10
2 Sensoreffekte	11
2.1 Resistive Sensoren	11
2.1.1 Prinzip	11
2.1.2 Spezifischer Widerstand	12
2.1.3 Längenänderung l	12
2.1.4 Flächenänderung A	13
2.1.5 Zusammenfassung.....	13
2.2 Kapazitive Sensoren	13
2.2.1 Prinzip	14
2.2.2 Permittivität ϵ	14
2.2.3 Abstand d	15
2.2.4 Fläche A	16
2.2.5 Zusammenfassung.....	16
2.3 Induktive Sensoren	17
2.3.1 Prinzip	17
2.3.2 Permeabilität μ	17
2.3.3 Länge l , A	19
2.3.4 Zusammenfassung.....	19
2.4 Sensoren basierend auf Magnetfeldänderung	20
2.4.1 Hall-Sensoren	20
2.4.2 Prinzip	20
2.4.3 Anwendung	21
2.4.4 AMR/GMR.....	21
2.4.5 Induktion.....	22
2.4.6 Zusammenfassung.....	23
2.5 Aktive Sensoren	23
2.5.1 Piezoelektrische Sensoren.....	24
2.5.2 Thermoelement (Seebeck-Effekt)	25
3 Ausführungsformen von Sensoren	25
3.1 Weg/Winkel	26
3.2 Kraft.....	26
3.2.1 Allgemeines.....	27
3.2.2 Dehnung.....	27
3.2.3 Die mechanische Spannung	29
3.2.4 Querkontraktion.....	31

3.2.5	Thermische Längenausdehnung.....	34
3.2.6	Dehnung und elektrischer Widerstand	34
3.2.7	DMS-Varianten.....	37
3.2.8	Metallische DMS	37
3.2.9	Piezoresistive Aufnehmer aus Silizium	38
3.2.10	Was ist bei der Applikation zu beachten?	39
3.2.11	Wahl der Messgitterlänge	40
3.2.12	Erfassung von zweiachsigen Spannungszuständen	42
3.3	Drucksensorik	42
3.3.1	Der piezoresistive Widerstand	43
3.4	Temperatur.....	48
3.4.1	Metall-Widerstandsthermometer	48
3.4.2	NTC.....	49
3.4.3	PTC.....	49
3.4.4	Thermoelement.....	50
3.4.5	p/n Übergang	53
4	Signalverarbeitung Primär	54
4.1	Wheatstone Brücke.....	54
4.1.1	Die ideale Wheatstone-Brücke.....	54
4.1.2	Die reale Wheatstone-Brücke	56
4.1.3	Zuleitungswiderstände und Innenwiderstand	56
4.1.4	Toleranz des Grundwiderstandes	57
4.1.5	Gleichtaktspannung	58
4.1.6	Direkte Temperaturmessung durch die Brücke.....	59
4.2	Der Differenzverstärker als Primärelektronik	59
4.2.1	Der Subtrahierer.....	61
4.2.2	Klassischer Instrumentationsverstärker	63
4.2.3	Differenzbildung mit zwei Operationsverstärkern.....	65
4.3	Brückenschaltungsvarianten	66
4.3.1	Viertelbrückenschaltung.....	66
4.3.2	Halbbrücke	69
4.3.3	Zweiviertel- oder Diagonalbrücke.....	69
4.3.4	Vollbrücke	71
5	Signalverarbeitung Sekundär	72
5.1	Schaltungstopologien.....	72
5.2	Fehlerkorrektur.....	74
5.2.1	Systematische und zufällige Fehler	74
5.2.2	Verfahren zur Fehlerkorrektur	75
5.2.3	Analoge Offsetkorrektur	75
5.2.4	Analoge Korrektur des Linearitätsfehlers	76
5.2.5	Analoger Abgleich des Verstärkungsfehlers	76
5.2.6	Digitale Korrektur	77
5.3	Schaltungstopologien.....	77
5.3.1	Rein analoge Signalverarbeitung	77
5.3.2	Digitale Signalverarbeitung	78
5.3.3	Analog-digitale Signalverarbeitung	78
5.3.4	2.6 Fazit	79

6	Charakterisierung von Sensoren	79
6.1	Fehlermodell	79
6.2	Messvorschrift	80
6.2.1	Nennsignal u_N	82
6.2.2	Nullsignal u_0 (Offset).....	82
6.2.3	Übertragungsfaktor B_0	83
6.2.4	Linearitätsabweichung F_{lin}	83
6.2.5	Hysterese	84
6.2.6	Temperaturkoeffizienten TKu_0 und TKB_0	84
6.2.7	Restfehler.....	85
	Literaturverzeichnis	87

Einleitung

Betrachtet man moderne Smartphones, Fahrzeuge oder auch Computer und Consumer-Elektronik so ist festzustellen, dass die Anzahl der verbauten Sensoren stark zunimmt. Das hat mehrere Ursachen. Einerseits fordert der Verbraucher höheren Komfort und zusätzliche Funktionen andererseits werden die Sensoren durch Miniaturisierung ständig kostengünstiger. Dies führt dazu, dass teilweise die Komplexität mechatronischer Komponenten reduziert werden kann zugunsten einer intelligenten Regelung.

Der Sensor ist hierbei für die Rückmeldung der Prozessparameter verantwortlich

Während die „klassischen“ Sensoreffekte unverändert zum Einsatz kommen hat sich doch ihre Ausführungsform stark verändert. Miniaturisierung, Integration der Signalverarbeitung und digitale Signalkorrektur auf kleinstem Raum ermöglichen eine stetige Verbesserung der Messgenauigkeit.

Dieser Lehrbrief erklärt nach Erläuterung einiger Begriffe und Definitionen zunächst grundlegende Sensoreffekte. Im Weiteren wird vertiefend die Messung von Temperatur, Kraft und Druck erläutert.

Es folgt die Darstellung möglicher Ansätze zur Signalverarbeitung und deren Vor- und Nachteile. Abschließend wird ein Fehlermodell eingeführt aus dem sich Fehlerdefinitionen ableiten lassen.

Lernziele

Die Studierenden sollen

- grundlegende Sensoreffekte (bspw. resistive, kapazitive, induktive, ...) kennenlernen.
- Erkennen wie sich Einflussgrößen wie geometrische Abmessung oder Materialkonstanten auf die messtechnischen Eigenschaften auswirken.
- Grundlegende Technologien zur Spannungs- und Dehnungsanalyse kennenlernen.
- Die Signalverarbeitungskette mit Schwerpunkt auf resistive Sensoren verstehen.
- Die Grundlagen der messtechnischen Charakterisierung von Sensoren erlernen, ein Fehlermodell verstehen und die Fehlerdefinitionen daraus ableiten können.

1 Grundlagen

1.1 Signalverarbeitungskette

Im Folgenden wird die typische Signalverarbeitungsstruktur eines Sensors erörtert. Sie wird hier unterteilt in den **Primärsensor** (Primärelement), der den mechanisch/elektrischen Wandler darstellt, einer ersten analogen Anpassung in der **Primärelektronik** und einer nachfolgenden Signalaufbereitung in der **Sekundärelektronik**.

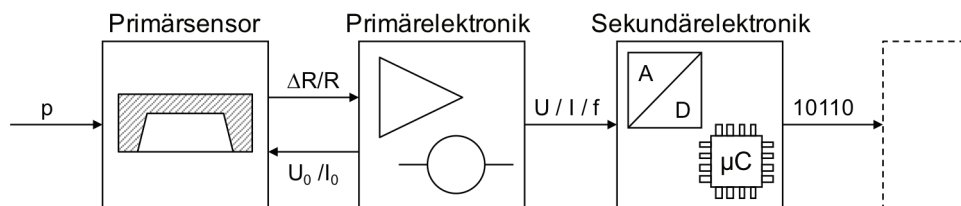


Abbildung 1: Signalverarbeitungskette

In der Primärelektronik findet die Wandlung der eigentlichen Messgröße in eine weiter zu verarbeitende elektrische Größe statt. In manchen Fällen ist dem Primärsensor noch ein zusätzliches Glied vorgeschaltet: Druck kann beispielsweise nicht direkt gemessen werden. Mit Hilfe einer Membran (mechanisch/mechanischer Wandler) wird die flächenbezogene Größe Druck in mechanische Spannung bzw. Dehnung gewandelt. Diese kann dann durch geeignete Verfahren in eine Messgröße wie Widerstandsänderung gewandelt werden.

Die nachfolgende Primärelektronik, wird als der analoge Teil der Signalverarbeitung verstanden. Im Falle eines resistiven Drucksensors wird hier die Widerstandsänderung des Primärsensors beispielsweise in eine Spannungs- oder Stromänderung gewandelt. Bei den meisten modernen Sensoren ist die Primärelektronik darauf beschränkt eine digitale Weiterverarbeitung des Sensorsignals zu ermöglichen.

Dies erfolgt in der Sekundärelektronik, wo eine Kompensation der Störgrößen, Fehlerkorrekturen und eine Anpassung an analoge oder digitale Standardschnittstellen erfolgen können. Diese Topologien werden in den folgenden Kapiteln detaillierter vorgestellt und bewertet.

1.2 Messgrößen vs. Störgrößen

Die Empfindlichkeit E eines Messsystems beschreibt das Verhältnis aus Änderung des Ausgangssignal Δu_a im Verhältnis zur Änderung des Eingangssignals Δu_e eines Sensors.

$$E = \frac{\Delta u_a}{\Delta u_e} \quad \text{Gl. 1}$$

Bei nahezu allen Sensoren ist das Ausgangssignal aber nicht nur sensitiv für *ein* Eingangssignal (Messgröße) sondern für weitere Einflussfaktoren, die sog. Störgrößen.

Typisch zu nennen ist hier die Temperatur, die fast immer als Störgröße auftritt.

Üblicherweise ist man bestrebt den Einfluss der Störgrößen zu minimieren. Dies kann geschehen durch eine Abschirmung des Sensors gegenüber der Störgrößen. Eine weitere Möglichkeit ist das zusätzliche Messen der Störgrößen, um sie kompensieren zu können. Dies kann sowohl analog als auch digital erfolgen.

Als letztes bleibt den Einfluss der Störgrößen zu akzeptieren und mit einer höheren Messunsicherheit zu leben. Ein ausführlicher Ansatz das Zusammenwirken aus Mess- und Störgrößen zu beschreiben ist das Fehlermodell nach Lenk, das in Kap 6 ausführlich beschrieben wird.

1.3 Absolut vs. Inkrementell

Will man die Länge seines Gartengrundstückes bestimmen, so hat man mehrere Möglichkeiten. Man nimmt z.B. ein langes Maßband, das einem die Länge *absolut* anzeigt. Alternativ kann man den Weg abschreiten und zählt dabei *inkrementell* die benötigten Schritte. Das Produkt aus Schrittzahl und Schrittlänge liefert dann die gesuchte Länge.

Beide Messprinzipien haben ihre Vor- und Nachteile in Bezug auf Genauigkeit, Messgeschwindigkeit und anderen Faktoren, die im Folgenden am Beispiel eines Winkelsensors kurz umrissen werden.

Bei absolut messenden Sensoren erfolgt die Bestimmung des Messwertes durch Abtasten eines codierten Materials. Jeder möglichen Position (Winkel, ...) ist ein absoluter eindeutiger Code zugeordnet, der sowohl analog als auch digital sein kann.

Dies ermöglicht eine absolute Messung direkt nach dem Einachalten des Sensors (True Power On) bzw. Bewegungen, die ausgeführt werden, wenn der Sensor ausgeschaltet ist werden berücksichtigt.

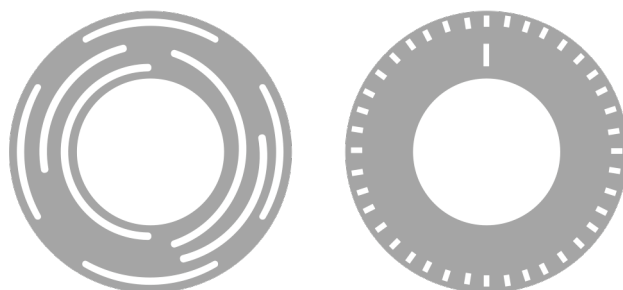


Abbildung 2: Absolut messender Encoder (links), inkrementeller Encoder

Bei der inkrementellen Messung erfolgt ein (richtungsabhängiges) Zählen an einem meist festen periodischen Muster. So kann bspw. durch Zählen von Zahnflanken leicht die Drehzahl bestimmt werden. Die absolute Bestimmung des aktuellen Verdrehwinkels ist aber wegen des Fehlens einer inhärenten absoluten Position schwierig.

1.4 Kompensations- und Ausschlagverfahren

Beim Kompensationsverfahren (auch Kompensationsmessmethode), wird der zu messenden Größe eine äquivalente Hilfsgröße entgegengesetzt und damit kompensiert. Die Gleichheit der beiden Größen wird durch ein entsprechendes Messgerät bestimmt.

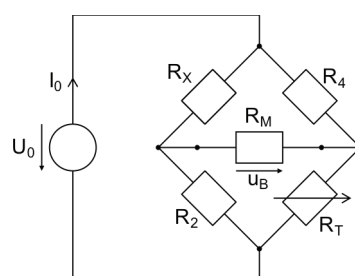


Abbildung 3: Brückenschaltung

Ein „historisches“ Beispiel soll das Prinzip verdeutlichen: Als Sir Charles Wheatstone 1837 den Nutzen von Brückenschaltungen für die Messtechnik entdeckte fehlten noch exakte Möglichkeiten zur direkten Messung von Strom und Spannung.

In der nach ihm benannten Wheatstonebrücke (**Abbildung 3**) wird der bekannte Trimmwiderstand R_T solange verändert bis die Brücke abgeglichen bzw. die Diagonalspannung $u_B = 0$ ist. Diese wurde mit Hilfe eines Galvanometers gemessen, das aber aufgrund seines geringen Innenwiderstandes nur im stromlosen Fall $u_B = 0$ die Brücke nicht belastete und damit die Messung störte. Am kalibrierten Trimmwiderstand R_T konnte dann der zu messende Widerstandswert R_x abgelesen werden.

Noch heute werden Varianten dieses Prinzips eingesetzt, so zum Beispiel bei Lebensmittelwaagen. Die Kompensation findet hier durch einen Regelkreis automatisch statt. Das begrenzt naturgemäß die Messfrequenz dieses Verfahrens. Ein Vorteil der Kompensationsmethode ist die geringe Rückwirkung auf die Messgröße.

Das gängigste Verfahren der Messtechnik ist das Ausschlagverfahren. Auch hier kann die Wheatstonebrücke als Beispiel dienen. Verändert man den Widerstand R einer abgeglichenen Brücke, so ist die Diagonalspannung u_B proportional zur Änderung des Widerstandswertes ΔR . Durch hochohmige Messung der Diagonalspannung können so geringste Widerstandsänderungen detektiert werden.