



# STUDIENBRIEF

## HALBLEITERSENSOREN

Weiterbildender Masterstudiengang „Sensorsystemtechnik“  
der Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik  
mit dem Abschluss „Master of Science (M. Sc.)“  
an der Universität Ulm

Kürzel / Nummer:	HLS
Englischer Titel:	Semiconductor Sensors
Leistungspunkte:	5 ECTS
Semesterwochenstunden:	3+1 V/Ü
Sprache:	Wird noch festgelegt
Turnus / Dauer:	jedes Sommersemester / 1 Semester
Modulverantwortlicher:	Dott. Alberto Pasquarelli
Dozenten:	Dott. Alberto Pasquarelli
Einordnung des Moduls in Studiengänge:	Sensorsystemtechnik, M.Sc., Wahlmodul, Halbleitersensoren
Voraussetzungen (inhaltlich):	Halbleiterbauelemente
Lernziele:	<p>Die Fortschritte in der Mikroelektronik und der MEMS-Technologie haben die Landschaft der Sensortechnik revolutioniert. Traditionelle voluminöse, langsame und teure Sensorsysteme konnten Dank neuer Technologien durch miniaturisierte und integrierte Smart-Sensoren auf Basis von Halbleitern ersetzt werden. Mit Hilfe der Halbleitersensoren wurden vielfältige Anwendungsbereiche erschlossen. Im Alltag begegnen wir ihnen beispielsweise in Form von Navigation- und Assistenzsystemen in Kraftfahrzeugen oder als Mikrophone, Beschleunigungssensoren, Kompass und Kameras in Mobiltelefonen. Neben der KFZ-Industrie und der mobilen Kommunikation werden Halbleitersensoren auch im Gesundheitswesen verwendet, um beispielsweise den Blutdruck oder die Körpertemperatur in Echtzeit zu erfassen. In diesem Modul werden den Teilnehmern die Grundlagen, Wirkweisen und Anwendungsbereiche verschiedener Sensoren vermittelt. Sie werden befähigt, eigenständig Sensoren zu entwickeln.</p> <p>Nach der Belegung des Moduls kennen die Teilnehmer die verschiedenen physikalischen Phänomene in den Halbleitern, welche für das Erfassen physikalischer Größen und deren Umwandlung in elektrische Signale genutzt werden, und können diese beschreiben. Sie können außerdem verschiedene Halbleiterwerkstoffe, welche für die Herstellung von Sensoren verwendet werden, benennen und ihre Reaktion unter verschiedenen Bedingungen erklären. Bei der Entwicklung eines Halbleitersensors können die Teilnehmer unter den verschiedenen Halbleiterwerkstoffen das richtige Material auswählen. Sie können Sensorbeispiele für verschiedene Messbedürfnisse berechnen. Die Teilnehmer sind in der Lage, eine Messproblematik zu analysieren, die dazu geeigneten Sensortechniken zu vergleichen und eine eigene Problemlösung zu entwickeln. Dabei können sie die Sensoreinheit dimensionieren, um die Designspezifikationen zu erfüllen.</p>
Inhalt:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einführung</li> <li>- Tutorium über Halbleiterphysik</li> <li>- Tutorium über Operationsverstärker</li> <li>- Grundlagen über Systemtechnik</li> <li>- Halbleiterbasierende Detektionsmethoden für: Strahlungen (ionisierend und nicht-ionisierend), magnetische Felder, mechanische Kräfte (Kompression, Dehnung, Biegung, Druck), Temperatur</li> </ul>

Literatur:	<ul style="list-style-type: none"><li>- Sze, S.M.: Semiconductor sensors, John Wiley &amp; Sons, 1994</li><li>- Middelhoek S., Audet S.A., Silicon Sensors, Academic Press 1989</li><li>- Popović R.S., Hall effect Devices, Adam Hilger, 1991</li><li>- Vorlesungsskript</li></ul>
Grundlage für:	Keine Angaben
Lehrveranstaltungen und Lehrformen:	Präsenzveranstaltungen: Einführungsveranstaltung: 4 h Seminar zur Prüfungsvorbereitung: 4 h Modulprüfung: 2 h E-Learning: Webinar: Projektergebnisse werden vorgetragen: 16 h Online-Gruppenarbeit: Übungen und Projekte werden in Gruppen abgearbeitet: 12 h Selbststudium: 108 h Chat zur Prüfungsvorbereitung: 4 h
Abschätzung des Arbeitsaufwands:	Vermittlung des Unterrichtsstoffs: 36 h Vor- und Nachbereitung, Übungen, Anwendung: 112 h Modulprüfung: 2 h Summe: 150 h
Leistungsnachweis und Prüfungen:	Schriftliche Modulprüfung, Dauer: 2 h
Voraussetzungen (formal):	Keine
Notenbildung:	Die Modulnote ergibt sich aus der Modulprüfung.

<b>1.</b>	<b>Einführung</b>	<b>10</b>
1.1	Mess- und Kontrollsysteme	11
1.2	Sensoren für Strahlung	13
1.2.1	Detektion ionisierender Strahlung	13
1.2.2	Detektion Nicht-Ionisierender Strahlung	14
1.2.3	Photoleiter	14
1.2.4	Photodiode	15
1.2.5	CCD-Sensor	16
1.3	Magnetfeldsensoren	16
1.3.1	Hall-Sensoren	18
1.3.2	Magnetoresitive Sensoren	19
1.4	Mechanische Sensoren	20
1.5	Thermische Sensoren	23
1.6	Anwendungsfälle für Halbleitersensoren	24
1.7	Zusammenfassung	25
<b>2.</b>	<b>Theoretische Grundlagen der Halbleiter</b>	<b>26</b>
2.1	Kristalle und Kristallstrukturen	26
2.2	Das einfache Atom-Modell	28
2.2.1	Wellenvektor	29
2.2.2	Reziproker Raum und reziprokes Gitter	29
2.3	Das freie Elektronenmodell	30
2.3.1	Periodische Potenziale	30
2.3.2	Kronig-Penney-Modell	31
2.3.3	Metalle, Isolatoren und Halbleiter	33
2.3.4	Effektive Masse	34
2.3.5	Fermi-Dirac-Verteilung	35
2.3.6	Zustandsdichte	36
2.3.7	Die Ladungsträgerdichte	36
2.3.8	Bose-Einstein- und Maxwell-Boltzmann-Verteilung	37
2.3.9	Effektive Zustandsdichte	38
2.3.10	Intrinsische Halbleiter	39
2.3.11	Dotierte Halbleiter	40
2.3.12	Massenwirkungsgesetz	42
2.3.13	Fermi-Energien in dotierten Halbleitern	42
2.3.14	Transport der Ladungsträger	43
2.3.15	Ladungsträgermobilität	44
2.3.16	Ladungsträgerdiffusion	46

<b>3.</b>	<b>Operationsverstärker</b>	<b>47</b>
3.1	Grundeigenschaften	47
3.2	Verstärkeranalyse durch äquivalente Schaltung	48
3.3	Idealer Operationsverstärker und virtuelle Masse	49
3.3.1	Idealer Voltage-Follower	50
3.3.2	Analyse des Operationsverstärkers	50
3.4	Invertierender Operationsverstärker	51
3.4.1	Integrierer	53
3.4.2	Differenzierer	54
3.4.3	Addierer	55
3.5	Nichtinvertierender Verstärker	56
3.5.1	Differenzverstärker	57
3.5.2	Instrumentensverstärker	57
3.5.3	Strom-Spannung-Konverter [Transimpedanz-Verstärker (CV-OP)]	59
3.5.4	Spannung-Strom-Konverter [Transkonduktanz-Verstärker (VC-OP)]	60
3.5.5	Komparator	62
3.5.6	Schmitt-Trigger	64
3.5.7	Realer Operationsverstärker	65
3.6	Zusammenfassung	67
<b>4.</b>	<b>Sensorsysteme</b>	<b>68</b>
4.1	Sensorik	68
4.2	Informationsübertragung durch Energie	68
4.2.1	Effekte zur Signal- oder Energieumwandlung	69
4.2.2	Instrumente oder Prozesse zur Energieumwandlung	70
4.3	Sensorgruppierung	70
4.3.1	Passive und aktive Sensoren	71
4.3.2	Tandem-Sensoren	71
4.3.3	Analoge und digitale Sensoren	72
4.4	Betriebsmodi	73
4.4.1	Kalibrieren	73
4.4.2	Wheatstone-Brücke	74
4.4.3	Brückenschaltungen für Wechselspannung	75
4.5	Interferenzen	76
4.6	Signal- und Datentransfer	77
4.7	Sensorsysteme	78
4.7.1	Smartsensorsysteme und intelligente Sensorsysteme	78
4.7.2	Architektur intelligenter Sensorsysteme	78
4.7.3	Vernetzte Sensoren	79
4.8	Sensorcharakteristiken	80
4.8.1	Statische Charakteristiken	80
4.8.2	Dynamische Charakteristiken	82
4.9	Mathematische Modellierung dynamischer Systeme	83
4.9.1	Lineare Systeme nullter Ordnung	83
4.9.2	Lineare Systeme erster Ordnung	85
4.9.3	Lineare Systeme zweiter Ordnung	88

<b>5.</b>	<b>Strahlungszintillatoren</b>	<b>101</b>
5.1	Spektrum elektromagnetischer Strahlung	101
5.2	Quellen ionisierender Strahlung	101
5.3	Photoelektrischer Effekt	102
5.3.1	Ionisationsdetektoren mit Gas-Füllung	105
5.3.2	Szintillationseffekt	107
5.3.3	Exziton-Lumineszenz	107
5.3.4	Auger-freie Lumineszenz oder Core-Valenz-Lumineszenz	108
5.3.5	Tandemsystem zur Detektion	109
5.3.6	Photokathode	111
5.3.7	Quantenausbeute	112
5.3.8	Optimierung der Systemleistung durch Auswahl der Szintillatoren	113
5.3.9	Optimierung der Systemleistung durch Übereinstimmung der Spektren	113
5.4	Szintillatoranwendungen	114
5.4.1	Medizinische Bildgebung	114
5.4.2	Röntgenteleskop	114
5.4.3	Weitere Anwendungsbeispiele	115
5.5	Zusammenfassung	116
<b>6.</b>	<b>Lichtsensoren</b>	<b>117</b>
6.1	Reflexion, Brechung und Transmission	117
6.2	Absorptionsgesetz	118
6.2.1	Absorption in Halbleitern	118
6.3	Fotoleiter	121
6.3.1	RG-Prozess	122
6.3.2	Fotostrom	124
6.3.3	Das dynamische Verhalten	125
6.3.4	Verstärkung bei Fotoleiter	126
6.4	Silizium-Fotodiode	128
6.4.1	Silizium pin-Diode	130
6.5	Zusammenfassung	131
<b>7.</b>	<b>Bildsensoren</b>	<b>132</b>
7.1	Detektor-Array CMOS mit Fotodioden	132
7.2	CCD-Sensor (Charge Coupled Device)	135
7.2.1	Funktionsweise der CCD	136
7.2.2	Idealer MOS-Kondensator	136
7.2.3	Akkumulationsbedingung	137

7.2.4	Verarmungsbedingung	138
7.2.5	Inversionsbedingung	139
7.3	Kapazität eines MOS-Kondensators	141
7.3.1	Kapazität unter Akkumulationsbedingung	141
7.3.2	Kapazität unter Verarmungsbedingung	141
7.3.3	Kapazität unter Inversionsbedingung	142
7.3.4	Versenkter Kanal bei CCD	144
7.3.5	Sammeln von Ladungsträgern bei einer CCD	145
7.4	Verbesserungsmöglichkeiten der CCD	146
7.4.1	Erhöhung der Transfergeschwindigkeit	146
7.4.2	Verbesserung der Empfindlichkeit	148
7.5	Zusammenfassung	152

## **8. Magnetfeldsensoren** **154**

8.1	Josephson- und Hall-Effekt	155
8.2	Hall-Effekt bei Halbleitern	157
8.2.1	Allgemeine Berechnung der Hall-Konstante für Halbleiter	158
8.2.2	Charakterisierung der Halbleiter mittels Hall-Effekts	159
8.2.3	Hall-Winkel	160
8.2.4	Hall-Effekt bei kurzen Proben	161
8.3	Magnetoresistivität	163
8.3.1	Anwendungen für Magnetoresistivität	164
8.4	Zusammenfassung	164

## **9. Magnetfeldsensoren II** **165**

9.1	Praktische Hall-Sensoren	165
9.2	Geometrischer Korrekturfaktor	166
9.3	Betriebsmodi der Hall-Sensoren	168
9.4	Abweichungen und Störungen beim Betrieb	169
9.4.1	Rauschen	169
9.4.2	Thermischer Drift	170
9.4.3	Offset	170
9.4.4	Chopper-stabilisierter Hall-Sensor	172
9.4.5	Ratiometrische Magnetfeldsensoren	173
9.5	Betriebsarten der Sensoren mit digitalem Ausgang	174
9.5.1	Unipolar „head-on“	174
9.5.2	Unipolar „slide-by“	174
9.5.3	Bipolar „slide-by“	175
9.5.4	Weitere „slide-by“-Varianten	176
9.5.5	Sensorsysteme mit Flusskonzentratoren an Polen	177
9.5.6	Systeme mit Bias-Magneten	178
9.5.7	Blatt-Sensor	178
9.5.8	Einsatz in mechanisch betätigten Schaltern	179
9.5.9	Zahnradsensor	180
9.6	Zusammenfassung	183

<b>10.</b>	<b>Magnetfeldsensoren III</b>	<b>184</b>
10.1	Herkömmliche Hall-Stromfühler	185
10.1.1	Betrieb in Open-Loop-Topologie	186
10.1.2	Betrieb in Closed-Loop-Topologie	186
10.1.3	Gehäusevarianten	187
10.1.4	Rauschen bei Hall-Strommessung	188
10.2	Programmierung eines Smart-Sensors	189
10.2.1	Programmierung des Sensors HAL1820	192
<b>11.</b>	<b>Mechanische Sensoren</b>	<b>194</b>
11.1	Geometrischer piezo-resistiver Effekt	195
11.2	Piezo-Resistivität bei Metallen	195
11.3	Piezo-Resistivität bei Halbleitern	197
11.4	Piezo-Widerstand bei anisotropen Materialien	202
11.5	Das Hooksche Gesetz und Young-Modul	206
<b>12.</b>	<b>Anwendungen für mechanische Sensoren</b>	<b>208</b>
12.1	Biegebalken	208
12.1.1	Sensoren zur Druckmessung	209
12.2	Mikrobearbeitung	215
12.2.1	Beschleunigungsmesser	215
<b>13.</b>	<b>Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)</b>	<b>219</b>
13.1	Oberflächenmikrofabrikation	220
13.2	„Bulk“-Mikroverarbeitung	221
<b>14.</b>	<b>Thermoelektrische Sensoren</b>	<b>231</b>
14.1	Thermoresistive Effekte in elektrischen Leitern	232
14.1.1	Draht-RTD	233
14.1.2	Dünnschicht-RTD	233
14.2	Thermoelektrische Effekte in Halbleitern	234
14.2.1	Änderung der Fermienergie	235
14.2.2	Berechnung der Fermienergie für intrinsische Halbleiter	235
14.2.3	Berechnung der Fermienergie für extrinsische Halbleiter	236
14.2.4	Thermische Ladungsträgeraktivierung bei intrinsischen Halbleitern	237
14.2.5	Thermische Ladungsträgeraktivierung bei extrinsischen Halbleitern	238
14.2.6	Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgermobilität	240
14.2.7	Temperaturabhängigkeit der Resistivität	241
14.2.8	Steinhart-Hart-Gleichung	243

<b>15.</b>	<b>Thermoelektrische Sensoren II</b>	<b>244</b>
15.1	Thermopaar	244
15.2	Der Seebeck-Effekt	246
15.2.1	Temperaturmessung mit T-Thermopaar	246
15.2.2	Temperaturmessung mit J-Thermopaar	247
15.3	Der Seebeck-Effekt bei Halbleitern	250
15.4	Der Peltier-Effekt	255
<b>16.</b>	<b>Thermoelektrische Sensoren III</b>	<b>260</b>
16.1	Anwendungsbeispiele für PTC-Thermistor	260
16.1.1	Schutz vor Stromüberlastung	260
16.1.2	Anwendung in Konstantstrom-Schaltungen	261
16.2	NTC-Thermistor als Thermometer	261
16.3	PN-Diode als thermischer Sensor	264
16.4	Bipolarer Transistor als thermischer Sensor	265
16.4.1	PTAT-Schaltkreise	266
16.4.2	Pyrometer	267
16.4.3	Pyrometrie-Methoden	269
16.4.4	Bolometer	270
16.4.5	Rauschen und Empfindlichkeitsoptimierung	272

# 1. Einführung

In diesem Kapitel erhalten Sie einen Überblick über verschiedene Halbleiter-Sensortypen und deren Anwendungsfelder und werden in der Lage sein, diese zu benennen. Sie werden ebenso die Vorteile der Halbleitersensoren im Vergleich zu traditionellen, konkurrierenden Sensoren darstellen und die den jeweiligen Sensoren zu Grunde liegenden physikalischen Effekten erklären können.



Der Kurs Halbleitersensoren behandelt Sensoren auf Halbleiterbasis für verschiedene Anwendungen. Diese umfassen

- Strahlungssensoren für ionisierende und nicht ionisierende Strahlung
- Magnetfeldsensoren
- Sensoren für mechanische Variablen wie Druck, Kraft, Beschleunigung etc.
- Temperatursensoren

Der rote Faden in dieser Vorlesungsreihe ist die Halbleitertechnologie. Die Halbleiterfertigung und die Möglichkeit der Integration dieser Sensoren in integrierten Schaltungen sind allen diesen Sensorarten gemeinsam.

Unsere Umwelt bietet Umgebungsvariablen die wir aus verschiedensten Gründen gerne messen wollen, etwa mechanische Kräfte, biologische oder chemische Energie, Strahlung etc. Sensoren zur Messung dieser Variablen wandeln diese Eingangsgrößen in Signale um, welche wiederum in einem System mit Signalaufbereitung und evtl. A/D-Wandlung über eine kabelgebundene oder kabellose Datenschnittstelle zu einem Signalprozessor weitergeleitet werden.

Halbleitertechnologie

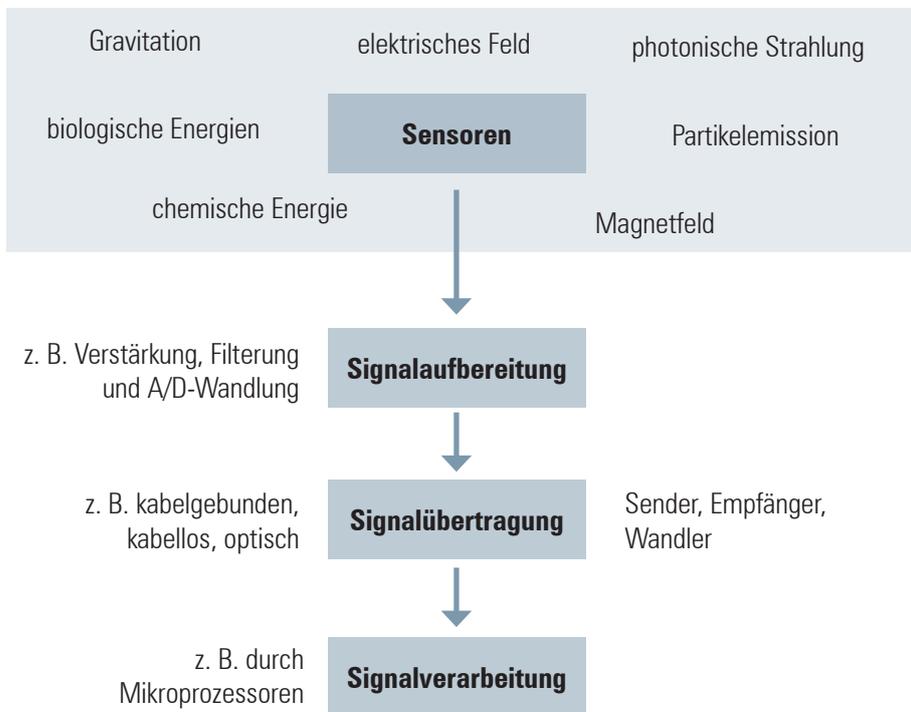
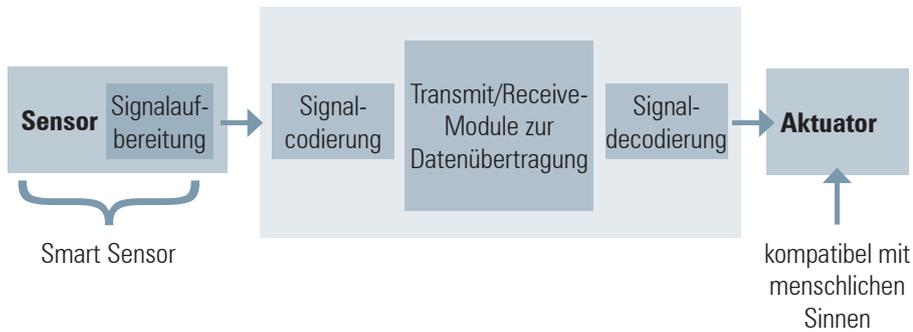


Abb. 1: Abtastung und Messung von Umgebungsvariablen durch Sensoren

## 1.1 Mess- und Kontrollsysteme

Um die Messgrößen zu erfassen und die Messwerte anschließend verarbeiten zu können, werden verschiedene physikalische Effekte ausgenutzt, die meist eine Umwandlung der gemessenen Größe in eine andere Form ermöglichen. Der typische Aufbau eines solchen Sensorsystems, die verschiedenen zu messenden Eingangsgrößen als auch die möglichen Umwandlungen und dabei zugrunde liegende physikalischen Effekte werden im Folgenden kurz erläutert. Die folgende Abbildung stellt ein Messsystem schematisch dar.



**Abb. 2:** Aufbau eines Messsystems

Als "Smart Sensor" wird ein System bestehend aus einem Sensor und einer Signalaufbereitungseinheit bezeichnet. Die Signalwandlung oder -codierung erfolgt durch einen "Transducer", häufig ein A/D-Wandler. Die Datenübertragung geschieht mittels Sender (Transmitter) und Empfänger (Receiver) sowie den dazugehörigen Schnittstellen und Protokollen. Im Schritt der Signaldecodierung wird das Signal für die Ausgabe vorbereitet – meist durch einen D/A-Wandler. Zuletzt wird das Signal zu einem Aktuator geleitet. Dieser kann im einfachen Fall zur Darstellung für den Betrachter dienen z. B. in Form einer grafischen Darstellung durch einen Nadelzeiger. Durch einen Feedback-Loop kann aber das Signal auch für die Kontrolle der Eingangsgröße verwendet werden. Dient ein Aktuator nur der Anzeige, so spricht man von einem Messsystem. Wird das Ausgangssignal jedoch mittels Feedback-Loop für die Kontrolle der Eingangsgröße verwendet, spricht man von einem Kontrollsystem.

Was ist ein Kontrollsystem, wie unterscheidet es sich von einem Messsystem?

Bitte beachten Sie, dass die Eingangsgrößen (Strahlung-, elektrische, magnetische, mechanische, thermische oder chemische Energie) durch Sensoren je nach Bedarf in eine andere der in Abb. 1 auf Seite 10 genannten Energieformen umgewandelt werden können. Bei der Signalverarbeitung und -übertragung bestehen ebenfalls verschiedene Möglichkeiten, wobei die elektrische Form die meist Verwendete ist. Beispiele für andere Übertragungswege wären die Pneumatik in Zügen oder auch die biologische Übertragung in Form von Neurotransmittern.

Smart Sensor

Umwandlung von Eingangsgrößen

## 5. Strahlungszintillatoren

In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit Sensoren für ionisierende Strahlung. Sie lernen die Quellen für solche Strahlungen und die verschiedenen Wechselwirkungen der Strahlung mit der Materie kennen. Im Speziellen behandeln wir die Szintillatoren zur Detektion ionisierender Strahlung. Sie werden in der Lage sein, die Physik der Wechselwirkung von Strahlung und Materie zu erläutern und für die Detektion unterschiedlicher Strahlung die jeweils passenden Detektormaterialien zu wählen.

### 5.1 Spektrum elektromagnetischer Strahlung

Die elektromagnetische Strahlung wird durch ihre Wellenlänge charakterisiert. Das sichtbare Licht bildet nur ein kleines Intervall in dem Spektrum. Eine Strahlung mit einer höheren Energie (d. h. mit kürzeren Wellenlänge) als das sichtbare Licht gilt als ionisierend.

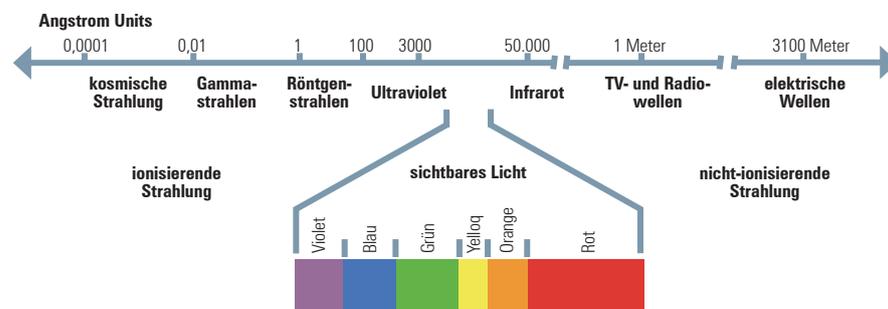
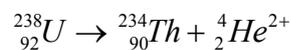


Abb. 137: Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung

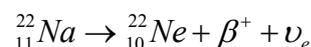
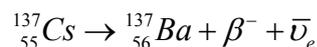
### 5.2 Quellen ionisierender Strahlung

Neben hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung gibt es weitere ionisierende Quellen. Teilchenstrahlen wie Alpha- oder Beta-Teilchen sind solche Quellen.

Alpha-Teilchen entstehen beim Zerfall schwerer, radioaktiver Atome und sind im Wesentlichen zweifach positiv geladene Helium-Kerne.



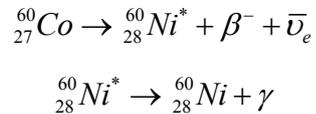
Beta-Teilchen entstehen beim Zerfall leichterer radioaktiver Atome. Bei negativer Beta-Strahlung ( $\beta^-$ ) handelt es sich um schnelle Elektronen und bei positiver Beta-Strahlung ( $\beta^+$ ) liegen schnelle Positronen vor.



Wegen Impulserhaltung entstehen dabei auch Neutrinos  $\nu_e$  oder Anti-Neutrinos  $\bar{\nu}_e$ .  $\beta^+$ -Zerfall tritt nur bei künstlich hergestellten Isotopen auf und kommt in der Natur nicht vor.

Ionisierende  
Strahlung

Gamma-Strahlung besteht aus hochenergetischen Photonen (Gammaquanten) mit einer Energie über 200 keV. Beim radioaktiven Zerfall können erst angeregte Atomkerne entstehen, die beim Übergang in den Grundzustand Gamma-Strahlen aussenden.



Röntgenstrahlen sind ebenfalls Photonen mit einer Energie von 100 -250 keV, die bei den Übergängen in inneren Elektronenschalen angeregter Atome entstehen.

Ultraviolettes Licht wird durch die angeregten Elektronen in der äußeren Schale im Atom erzeugt.

Sonstige Quellen: Neutronen können zwar wegen ihrer elektrischen Neutralität keine direkte Ionisierung hervorrufen, durch Kollisionen mit fremden Kernen können sie aber durch Sekundäreffekte ionisierend wirken.

Was ist eine Ionisierende Strahlung? Welche Quellen für die Ionisation kennen Sie?

### 5.3 Photoelektrischer Effekt

Die Gammaquanten können auf drei Arten mit der Materie wechselwirken. Die Prozesse der Photoeffekt, der Compton-Effekt und die Paarbildung werden im Folgenden näher beschrieben.

A) Bei dem Photoeffekt werden durch Photonen ausreichender Energie Elektronen aus der Atomhülle herausgelöst d. h. das Atom wird ionisiert.

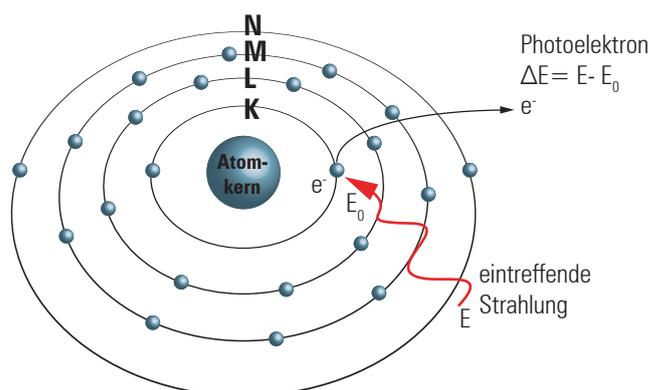


Abb. 138: Ionisierung eines Atoms durch Photonen.

Photo-  
elektrischer Effekt

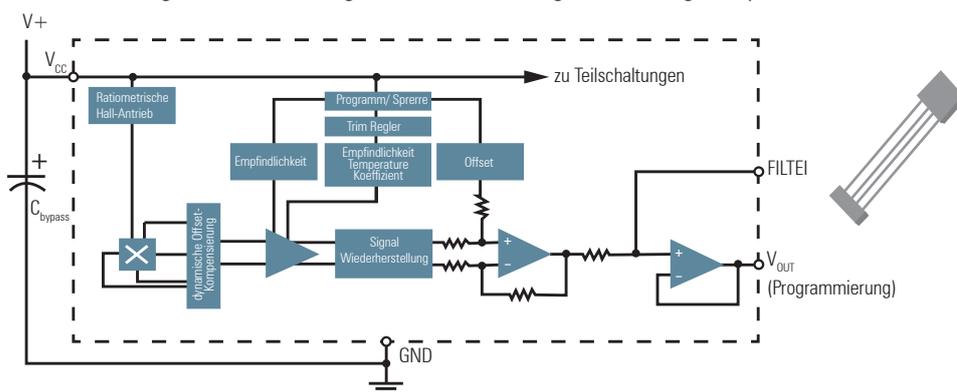
# 10. Magnetfeldsensoren III

In den beiden letzten Kapiteln haben Sie die Magnetfeldsensoren und einige praktische Konzepte bei deren Anwendung kennengelernt. In diesem Kapitel lernen Sie eine spezielle Anwendung des Hall-Magnetsensors in verschiedenen Konfigurationen und Technologien zur Strommessung kennen. Weiter beschäftigen wir uns mit der Programmierung eines Smartsensors. Sie werden in der Lage sein, abhängig von der Anwendung und Randbedingungen, die passende Technologie zur Strommessung auszuwählen und Programmiermöglichkeiten für einen Hall-Sensor zu beschreiben.

Die folgende Abbildung stellt die Schaltung eines Smart-Hall-Sensors dar. Hier können verschiedenen Parameter eingestellt werden:

- Offset-/ Ruhespannung
- Empfindlichkeit / Verstärkung
- Temperaturkorrekturfaktor der Empfindlichkeit / Verstärkung
- Polarität

Dabei kann nicht nur für die Hall-Platte selbst, sondern auch für externen magnetischen Materialien wie Magnetkerne Korrekturfaktoren programmiert werden. Weiter kann ein Offset z.B. aufgrund des Erdmagnetfelds durch Programmierung kompensiert werden.



**Abb. 281:** Ein Analogler bzw. linearer Hall-Effekt-Schaltkreis(Quelle: Allegro).

Im Folgenden betrachten wir analoge Anwendungen. Der analoge Betrieb bietet naturgemäß die Möglichkeit, mehr Parameter einzustellen. Wir beschäftigen uns zunächst mit unterschiedlichen Methoden zur Strommessung. In der untenstehenden Tabelle sind die zur Strommessung verwendeten Sensoren und ihre Eigenschaften aufgelistet.

Verwend. Sensoren	Einspeise-verluste	Schaltungs-isolation	Externe Versorg.	Frequenz-bereich	Offset (null)	Genauig-keit	Rel. Kosten
Resistiv DC	ja	keine	keine	< 100 kHz	keine	> 99%	am geringsten
Resistiv AC	ja	keine	keine	> 500 kHz	keine	> 99%	gering
Hall Open-Loop	keine	ja	ja	≥ 20 kHz	ja	90-95%	mittel
Hall Closed-Loop	keine	ja	ja	≥ 150 kHz	keine	> 95%	hoch
Transformator	ja (AC)	ja	keine	Konstant	keine	> 95%	am höchsten

Wie aus der obigen Eigenschaftentabelle ersichtlich ist, bieten die Hall-Sensoren eine galvanische Trennung und eignen sich daher für Gefahrensituationen. Sie benötigen aber eine

Stromversorgung und bieten weniger Bandbreite als die Widerstände. Sie sind im Null-Mode (d.h. mit Feed-Back, Closed-Loop) schneller als im Auslenkungsmodus (Open-Loop).

Widerstandssensoren sind zwar günstig, bewährt, zuverlässig, einfach und genau, besitzen aber auch einige Nachteile wie Leistungsverlust ( $I^2R$ ), Spannungsabfall, keine galvanische Isolierung und gehen auf Kosten der SNR, max. messbare Stromstärke und Auflösung.

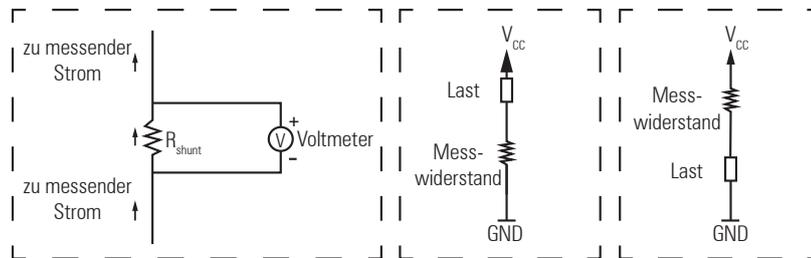


Abb. 282: Strommessung mit Widerständen

Die vorangegangene Abbildung zeigt, wie der Spannungsabfall an dem angebrachten Messwiderstand im Stromkreis gemessen wird und der Strom wird dadurch berechnet werden kann. Der Widerstand wird vorzugsweise zwischen Masse und Last angebracht, da er dann an einer niedrigeren Spannung liegt.

## 10.1 Herkömmliche Hall-Stromfühler

Die Strommessgeräte mit integriertem Hall-Sensor bieten einige Vor- und Nachteile. Vorteile sind:

- Geringer Spannungsabfall
- Geringer Leistungsverlust
- Galvanische Trennung

Und Nachteile:

- Spannungsversorgung notwendig für Hall-Element
- Interferenzstörung durch externe Magnetfelder
- Voluminöse Bauweise
- Frequenzbereich und Antwortzeit sind eingeschränkt
- Ausgangsrauschen
- Empfindlich gegen Temperaturänderung und mechanischen Stress
- Geringe Empfindlichkeit
- Kosten

Auch wenn die Liste der Nachteile lang erscheint, sind die Hall-Strommessgeräte aufgrund ihrer Vorteile sehr im Markt etabliert.

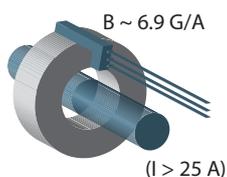


Abb. 283: Zur Messung hoher Stromstärken wird ein Hall-Sensor im Spalt eines Rings um die Stromleitung platziert. Rechts ist das kommerzielle Produkt TEK 837 abgebildet.

Herkömmliche  
Hall-Stromsensoren

## 16. Thermoelektrische Sensoren III

In diesem Kapitel lernen Sie einige weitere Anwendungsbeispiele für thermoelektrische Sensoren. Wir behandeln die PTC- und NTC-Thermistoren. Diese können als Thermometer oder als Schutzschaltungselement verwendet werden, um Stromfluss zu begrenzen oder bei Spitzen beim Einschaltvorgang zu verhindern. Ferner lernen Sie Pyrometrie sowie Bolometrie kennen. Sie werden in der Lage sein, die physikalischen Effekte bei der jeweiligen Messmethoden zu beschreiben und für die jeweilige Anwendung den Passenden Sensor auszuwählen.

Dieses letzten Kapitel behandelt PTC- und NTC-Thermistoren, Dioden und Transistoren als Temperatursensoren sowie Pyrometer und Bolometer. Wir beschäftigen uns mit den Anwendungsmöglichkeiten für diese Sensoren und stellen Schaltungsbeispiele aus der Praxis vor. Beim Pyrometer wird zur Temperaturmessung die Spektralanalyse verwendet während beim Bolometer die Messung der Wärmeabfuhr zur Bestimmung der Temperatur verwendet wird.

### 16.1 Anwendungsbeispiele für PTC-Thermistor

#### 16.1.1 Schutz vor Stromüberlastung

Wie wir im vorletzten Kapitel gesehen haben, besitzen PTCs eine steile Leitfähigkeit-Charakteristik in Abhängigkeit von der Temperatur. Diese Charakteristik kann ausgenutzt werden, um PTCs als Schutz vor Stromüberlastung in einer Schaltung zu verwenden. Hierfür werden sie mit dem zu schützenden Last in Serie geschaltet. Sie sind dabei so dimensioniert, dass sie beim Betrieb unter normalen Bedingungen kalt bleiben (siehe durchgezogene Linie in der folgenden Abbildung). Steigt die Stromstärke übermäßig an, so verursacht dies die Erwärmung des PTC und eine starke Erhöhung seines Widerstands, was zu Beschränkung der Stromstärke führt (gestrichelte Linie). Die Beseitigung der Ursache für die Fehlfunktion führt zur Abkühlung des PTC und Rückkehr zum niedrigen Widerstandswert.

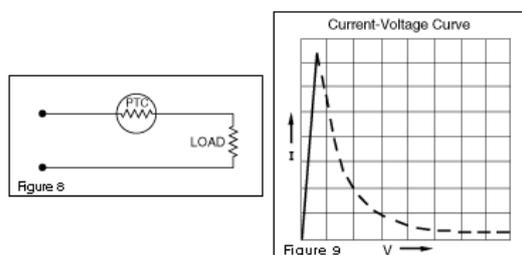


Abb. 425: Serienschaltung eines PTCs zum Schutz vor Stromüberlastung.

PTC-Thermistor-  
Anwendungen

### 16.1.2 Anwendung in Konstantstrom-Schaltungen

PTCs können auch zum Bereitstellen vom konstanten Strom bei Schwankungen der Versorgungsspannung verwendet werden. Der PTC-Einbau in der folgenden Schaltung kompensiert durch seine Widerstandsänderung die Schwankungen der Spannung und wir erhalten einen nahezu konstanten Strom.

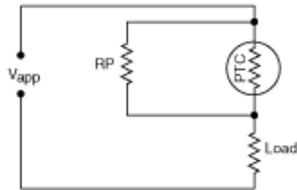


Abb. 426: Konstanter Strom bei „Load“ durch Temperaturabhängigen PTC-Widerstand.

Erklären Sie die Funktionsweise von PTC-Thermistoren beim Schutz vor Stromüberlastung.

### 16.2 NTC-Thermistor als Thermometer

NTCs zeigen keine so starken Charakteristiken wie PTCs. Die hohe Empfindlichkeit von NTC-Thermistoren macht sie zu idealen Werkzeugen zur Temperaturmessung in dem Bereich von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+300^{\circ}\text{C}$ .

Aufgrund ihrer ausgeprägt nichtlinearen R-T-Charakteristik müssen wir Linearisierungsmethoden anwenden, wenn eine lineare Kurve notwendig ist. Die einfachste Methode ist die Parallelschaltung eines temperaturunabhängigen Widerstands. Dies führt zur einer R-T-Charakteristik in S-Form. Die beste Linearisierung erhält man, wenn der Wendepunkt der S-Kurve in der Mitte des Temperaturbereichs für die anvisierte Anwendung liegt.

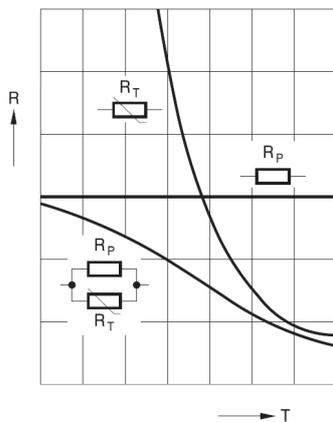


Abb. 427: Linearisierung der R-T-Kurve durch den Parallelwiderstand.

NTC-Thermistor-  
Thermometer

## Ansprechpartner

Dr. Gabriele Gröger  
Albert-Einstein-Allee 45  
89081 Ulm

Tel 0049 731 – 5 03 24 00  
Fax 0049 731 – 5 03 24 09

[gabriele.groeger@uni-ulm.de](mailto:gabriele.groeger@uni-ulm.de)  
[www.uni-ulm.de/saps](http://www.uni-ulm.de/saps)

# Mod:Master

Sensorsystemtechnik

## Postanschrift

Universität Ulm  
School of Advanced Professional Studies  
Albert-Einstein-Allee 45  
89081 Ulm

---

Das Studienangebot „Sensorsystemtechnik“ wurde entwickelt im Projekt Mod:Master, das aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert und aus dem Europäischen Sozialfonds der Europäischen Union kofinanziert wird (Förderkennzeichen: 16OH11027, Projektnummer WOH11012). Dabei handelt es sich um ein Vorhaben im Programm „Aufstieg durch Bildung: offene Hochschulen“.

---



EUROPÄISCHE UNION



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung