

# Grundlagen zur Sensorik

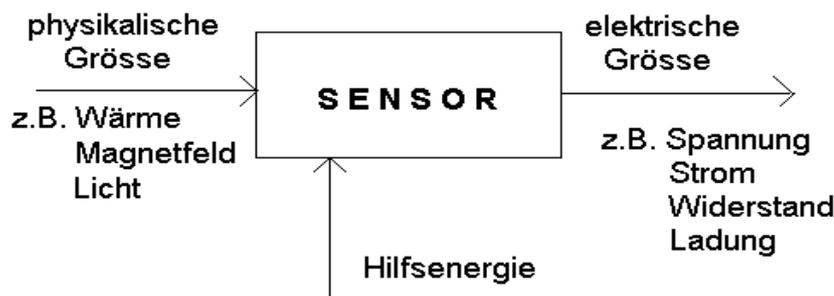
## 1. Übersicht

### 1.1 Vorläufige Definition

Unter Sensoren versteht man Bauelemente oder Funktionseinheiten, mit denen sich in Abhängigkeit von einer physikalischen oder geometrischen Größe ein in der Regel elektrisches Signal erzeugen lässt.

oder:

Ein Sensor reagiert auf eine physikalische Größe und gibt ein meist elektrisches Signal ab, aus dem auf den Wert der physikalischen Größe geschlossen werden kann (möglich sind auch pneumatische, hydraulische oder optische Signale).



Der Begriff Sensor ist noch nicht genormt, wird aber weltweit nach der obigen Beschreibung verwendet. In verschiedenen Bereichen der Technik trifft man auch auf die teilweise genormten Begriffe:

- Aufnehmer
- Umformer
- Fühler
- pick-up
- Wandler, Messwandler
- Geber

### 1.2 Basissensoren

Die minimale Funktionseinheit, die obige Bedingungen erfüllt, ist ein **Basissensor**.

Beispiele für Basissensoren sind:

- Thermoelement
- Dehnungsmess-Streifen
- Feldplatte

### 1.3 Verbundsensoren

Ein **Verbundsensor** besteht aus der Kombination mehrerer Basissensoren zu einer Baueinheit, um Parameter zu kontrollieren oder indirekt bestimmbare Größen zu erfassen.

Beispiele für Verbundsensoren sind:

- Feuchte- / Temperatursensor
- Fotodiodenarray
- Faseroptisches Interferometer mit elektronischem Detektorsystem

### 1.4 Sensorsysteme

Wird das elementar gewonnene Signal bereits im Sensor aufbereitet bzw. weiter verarbeitet oder sind zum Betrieb notwendige Zusatzfunktionen integriert, spricht man von einem **Smart-Sensor** oder einem **Sensorsystem**.

Beispiele für Sensorsysteme sind:

- Pt-100 Widerstandsthermometer mit Linearisierung
- Fotomultiplier
- Drehwinkelgeber mit Digitalausgang

## 1.5 Messgeräte / Messsysteme

Die vom Sensor abgegebenen Signale müssen häufig mit einer speziellen Elektronik aufbereitet und ausgewertet werden. Der gesamte Weg von der physikalischen Größe zum standardisierten elektrischen Signal oder zur Anzeige des Messwertes wird oft in einem einzigen Gerät zusammengefasst. Hierfür können die Begriffe **Messgerät** bzw. **Messsystem** verwendet werden.

Beispiele für Messgeräte / Messsysteme sind:

- elektronische Waage
- Fotometer
- Schallpegelmessgerät
- Dosimeter
- Anemometer

## 2. Einteilung der Sensoren

### 2.1 Einteilung nach der gemessenen Größe

Sensoren für geometrische Größen:

- Position
- Abstand
- Winkel
- Richtung
- Dehnung
- Füllstand
- Schichtdicke
- Korngröße
- Wellenlänge

Sensoren für Bewegungsgrößen:

- Weg
- Geschwindigkeit
- Drehfrequenz
- Phasenverschiebung
- Beschleunigung
- Vibration

Sensoren für Kräfte und daraus abgeleitete Größen:

- Kraft
- Druck
- Spannung
- Drehmoment
- Härte
- Elastizitätsmodul
- Beschleunigung

Sensoren für hydrostatische und hydrodynamische Größen:

- Druck
- Vakuum
- Strömungsgeschwindigkeit
- Durchfluss
- Viskosität
- Grenzflächenspannung

**Sensoren für thermometrische und kalorimetrische Größen:**

- Temperatur
- Wärmemenge
- Wärmeleitfähigkeit
- Temperaturleitfähigkeit
- Spezifische Wärmen

**Sensoren für chemische Größen und Anteile spezieller Substanzen:**

- Anwesenheit spez. Substanzen
- Volumen- oder Massenanteil
- Feuchtegehalt
- Leitfähigkeit
- pH-Wert
- Redoxpotential
- Teilchen-Beweglichkeit

**Sensoren für elektrische und magnetische Größen:**

- elektrisches Potential
- magnetische Induktion

**Sensoren für elektromagnetische Strahlung:**

- Reflexion
- Absorption
- Transmission
- Extinktion
- Strahlungsleistung
- Strahlungstemperatur
- Polarisation

**Sensoren für optische Größen:**

- Brechungsindex
- Strahlungsleistung
- Lichtdichte
- Beleuchtungsstärke
- Farbort

**Sensoren für ionisierende Strahlung:**

- Aktivität
- Dosis
- Energie

## 2.2 Einteilung nach der Energiequelle

### 2.2.1 Aktive Sensoren

Aktive Sensoren erzeugen aus dem Messprozess die Energie, die für die Weitergabe der Information notwendig ist. Bevorzugt sind elektrische Spannungen, da sie sich in der analogen Signaltechnik am leichtesten verarbeiten lassen.

Beispiele für aktive Sensoren sind:

- Thermoelement (Temperatur - Spannung)
- Induktionsspule (Geschwindigkeit - Spannung)
- Hallsonde (magn. Induktion - Spannung)
- pH-Elektrode (pH-Wert - Spannung)

Andere aktive Sensoren transportieren ihre Information in elektrischen Größen, die zur Weiterverarbeitung erst in eine Spannung umgeformt werden müssen.

Beispiele hierfür sind:

- Piezokristall (Kraft - Ladung)
- Fotodiode (Lichtintensität - Strom)
- Wiegand-Sensor (Magnetisierungssprung)

Ein aktiver Sensor mit optischem Signalausgang ist z.B. ein NaJ-Kristall zur Bestimmung der Energie von Gamma-Quanten aus dem radioaktiven Zerfall. Allerdings müssen die Signale (schwache Lichtblitze) über den Fotoeffekt an der Kathode eines Fotomultipliers in einen verstärkbaren Elektronenstrom transformiert werden, aus dem dann ein elektrisches Spannungs-Signal abgeleitet werden kann.

### 2.2.2 Passive Sensoren

Bei passiven Sensoren muss Energie durch den Sensor fließen. Der Sensor verändert seinen Widerstand und moduliert eine bestimmte Größe dieses Energiestroms. Betrachtet man den Widerstand als komplexe Größe, dann stellt die Unterteilung in **resistiv**, **kapazitiv** und **induktiv** lediglich Spezialfälle dar. Durch den komplexen Widerstand lassen sich die Komponenten einer komplexen Spannung (Betrag, Phase) beeinflussen.

**Resistiv** (ohmscher Widerstand ändert sich)

- Potentiometer
- Dehnungsmessstreifen
- Temperaturabhängiger Widerstand (Pt-100, NTC, PTC)
- Leitfähigkeitsmesszelle
- Feldplatte
- Fotowiderstand (LDR :Light Dependent Resistor)
- Fototransistor
- Gassensitiver Feldeffekttransistor (GASFET)
- Ionensensitiver Feldeffekttransistor (ISFET)

**kapazitiv** (durch Beeinflussung von:)

- Abstand zwischen Kondensatorplatten
- Größe der gegenüberstehenden Flächen der Kondensatorplatten
- Eintauchtiefe des Dielektrikums
- Änderung der dielektrischen Eigenschaften z.B. Feuchteeinlagerung

**induktiv** (Beeinflussung durch:)

- Variation der Luftspaltlänge
- Änderung des Querschnitts
- Permeabilität

Bei passiven Sensoren mit optischem Signalausgang lässt sich der Lichtstrom in folgenden Größen beeinflussen:

- Intensität
- Frequenz
- Wellenlänge
- Polarisierung
- Spektrale Zusammensetzung

### 2.2.3 Energiezufuhr bzw. Energiegewinnung

Zur Versorgung passiver Sensoren bzw. der Sensor-Elektronik muss elektrische Energie bereitgestellt werden. Verschiedene Verfahren erlauben die direkte Zufuhr elektrischer Energie oder die Gewinnung aus anderen Energieformen. Diese Energiegewinnung aus der Sensor-Umgebung wird auch als „energy harvesting“ (Energie-Ernte) bezeichnet.

- Batterie oder Akku
- Kondensator hoher Kapazität
- separate Versorgungsleitungen
- über Signalleitungen (z.B. durch Zeitfenster, Überlagerung, Modulation)
- Induktive Einkopplung
- Hochfrequenz-Einkopplung
- Einkopplung von Licht auf Fotozelle
- Thermogenerator (Peltier-Element)

## 2.3 Einteilung nach der Signalart

### 2.3.1 Sensoren mit Analog-Ausgang

Die meisten elementaren Effekte, die für Sensoren ausgenutzt werden, arbeiten im zulässigen Messbereich mit einer stetigen, eindeutig umkehrbaren Funktion zwischen Mess- und Signalgröße. Dies bleibt auch bei einer Linearisierung und Normierung des Signals erhalten (Gegenbeispiel PTC-Widerstand).

### 2.3.2 Schaltende Sensoren

Ein binäres Ausgangssignal kennt nur zwei Zustände, zwischen denen bei Über- bzw. Unterschreitung eines Schwellwertes gewechselt wird. Sind die beiden Schwellwerte verschieden, ergibt sich ein Schaltverhalten mit Hysterese.

- mechanischer Endschalter
- induktiver Näherungsschalter
- kapazitiver Näherungsschalter
- Ultraschall-Näherungsschalter
- Lichtschranke

Häufig werden auch schaltende Sensoren in Kombination miteinander oder kombiniert mit Zähler, Phasendetektoren oder Integrierer für komplexere Aufgaben eingesetzt.

- Lichtvorhang
- Drehzahlmessung mit Wiegand-Sensor
- Drehmomentmessung an tordierenden Wellen

### 2.3.3 Sensoren mit Digital-Ausgang

Manche Sensoren liefern direkt ein digital codiertes Signal. Codescheibe und Codelineal sind wohl eher noch den schaltenden Kombinationen zuzurechnen. Digitalsignale, in denen nur der Messwert codiert ist, findet man selten.

### 2.3.4 Busfähige Sensoren

Mit der Verfügbarkeit von Schnittstellen für Sensor-Bus-Systeme (USB, Feldbusse, Industrial Ethernet) hat auch die Anzahl von Sensoren zugenommen, die über einen eigenen Netzwerkanschluss verfügen. Sie erhalten teilweise auch über die Netzwerkleitung ihre Versorgungsspannung (PoE: Power over Ethernet).

### 3. Sensor-Effekte

Mit einigen Sensoren sind ganz spezielle physikalische Effekte verknüpft. Einige Sensoren tragen in ihrem Namen die zugrunde liegenden physikalischen Effekte.

#### 3.1 Piezoelektrischer-Effekt (piezo... = Druck..)

Durch eine Kraft, die auf einen Kristall (z.B. Quarz) wirkt, verschieben sich unterschiedlich geladene Ionen im Kristallgitter. Dadurch entstehen auf der Oberfläche der Druckseiten des Kristalls elektrische Ladungen. Diese Ladungen lassen sich beim Abfluss über einen integrierenden Verstärker (fälschlich Ladungsverstärker) oder einem Verstärker mit extern hohem Eingangswiderstand (Elektrometerverstärker) in eine proportionale Spannung umformen. Der Piezoeffekt ist reversibel. Zug- und Druckkräfte führen zu unterschiedlicher Polarität der Ladung. Die Größe der Ladung ist nicht temperaturabhängig und weist keine Hysterese in Abhängigkeit von der Kraft auf.

Neben Quarz finden noch polykristalline piezoelektrische Keramiken wie Barium-Titanat oder Lithium-Niobat Verwendung in Kraft-, Druck- und Beschleunigungssensoren.

#### 3.2 Piezoresistiver Effekt

Dünne Siliziumschichten ändern ihren elektrischen Widerstand beim Verbiegen. Dadurch lassen sich damit Kräfte messen. Als integrierte Schaltung lassen sich dadurch sehr kleine Sensoren bauen, die auf dem Chip neben den vier Brückenwiderständen auch die Konstantstromquelle und den Messverstärker enthalten.

#### 3.3 Seebeck-Effekt

Durch die unterschiedliche Beweglichkeit der Elektronen in verschiedenen Metallen kommt es an den Berührungsstellen zu einem Elektronenübergang ins Metall mit geringerer Beweglichkeit. Der Vorgang ist temperaturabhängig. Befinden sich zwei Kontaktstelle auf unterschiedlichem Temperaturniveau, lässt sich eine elektrische Spannung messen, die in erster Näherung proportional zur Temperaturdifferenz ist (ca 5mV bei 100K Temperaturänderung). Größere Thermospannungen lassen sich mit Halbleiter-Thermoelementen erzielen. Die Umkehrung des Seebeck-Effekts ist der Peltier-Effekt.

#### 3.4 Hall-Effekt

Auf bewegte Ladungen in einem Magnetfeld wirkt die Lorenz-Kraft. Fließt ein Strom in einer dünnen Schicht (InSb-Halbleiter), die von einem Magnetfeld durchsetzt ist, führt dies zu einer "Verdrängung" der Strombahnen auf eine Seite. Die unterschiedliche Ladungsdichte auf der Oberfläche ist als Hall-Spannung messbar. Sie ist proportional zur magnetischen Induktion. Die technische Realisation zur Magnetfeldmessung heißt Hall-Sonde bzw. Hall-Sensor.

Schließt man die Hall-Spannung durch quer zur Stromrichtung eingelagerte NiSb-Nadeln kurz, verlängert sich durch die gekrümmten Bahnen der Widerstand für den elektrischen Strom. Die Feldplatte ist damit ein magnetfeldabhängiger Widerstand.

#### 3.5 Magnetoelastischer Effekt

Nickeleisen-Legierungen ändern ihre Permeabilität bei mechanischer Belastung. Besteht der Kern einer Spule aus diesem Material, dann ändert die Spule bei Krafteinwirkung ihre Induktivität und kann als Kraft-Sensor benutzt werden.

#### 3.6 Wiegand-Effekt

Ein ferromagnetischer Draht aus einer Kobalt-Eisen-Vanadium-Legierung wird durch mechanische Verformung (drillen, dehnen) und thermische Stabilisierung innen magnetisch weich und außen magnetisch hart. Die magnetischen Vorzugsrichtungen liegen parallel zur Drahtachse. Die magnetisch harte Hülle sorgt für ein verzögertes Umklappen der Magnetisierung des Kerns bei wachsendem äußeren Feld und stabilisiert diesen Zustand bei abnehmendem Feld. Es entsteht so eine ausgeprägte Hystereseeigenschaft. Die beim

Umkappen auftretende schnelle Magnetfeldänderung induziert in der umgebenden Spule einen Spannungsimpuls, der zum Zählen verwendet werden kann.

### 3.7 Foto-Effekt

Der **Äussere Fotoeffekt** beschreibt die Übertragung der Energie eines Lichtquants auf ein Elektron. Dieses kann dadurch aus seiner Bindung befreit werden und Bewegungsenergie aufnehmen. Der Effekt wird bei der Fotozelle und beim Fotomultiplier ausgenutzt.

Beim **Inneren Fotoeffekt** wird bei der Absorption eines Lichtquants ein Elektron-Loch-Paar gebildet (Fotostrom), die als Ladungsträger die Leitfähigkeit beeinflussen. Als Sensor-Effekt wird er beim Fotowiderstand, der Fotodiode, dem Fototransistor und der Solarzelle ausgenutzt.

### 3.8 Faraday-Effekt

Die Polarisationssebene des Lichtes oder anderer elektromagnetischer Strahlung dreht sich beim Durchgang durch transparente, ferrimagnetische Oxide (z.B. Granat). Die Drehrichtung wechselt mit dem Vorzeichen der Magnetisierung, ist aber unabhängig von der Ausbreitungsrichtung des Lichtes.

### 3.9 Kerr-Effekt

Der Kerr-Effekt beschreibt das gleiche Verhalten wie der Faraday-Effekt, allerdings bei Reflexion statt Transmission.

### 3.10 Sagnac-Effekt

Der Effekt ist aus der Speziellen Relativitätstheorie über die relativistische Geschwindigkeitsaddition ableitbar, wurde aber schon 1913 entdeckt. Mit einer von Sagnac entwickelten Interferometeranordnung lässt sich der Effekt ausnutzen. Wird vom Weg des Lichtes eine Fläche umschlossen (z.B. durch eine Lichtleiterfaser), dann ist die Laufzeit des Lichtes in den beiden Ausbreitungsrichtungen unterschiedlich, wenn das System rotiert. Eine solche Anordnung nennt man ein Ringinterferometer, da sich die beiden Teilstrahlen je nach Phasenunterschied verstärken oder auslöschen können. Durch Auszählen der Auslöschungsvorgänge während der Bewegung lassen sich Rotationswinkel gegenüber einem Inertialsystem auch bei sehr langsamer Rotation bestimmen. Als sog. Faserkreisel findet der Effekt Anwendung in der Navigation.

## 4. Sensor-Verhalten

### 4.1 Statisches Verhalten

Die statische Kennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen der physikalischen bzw. geometrischen Eingangsgröße und der informationstragenden Größe des Ausgangssignals. Bei der Aufnahme der Kennlinie dürfen keine zeitlichen Schwankungen mehr zu beobachten sein. Die Steigung der Kennlinie liefert den Wert der Empfindlichkeit. Ist die Kennlinie eine Gerade, ist die Empfindlichkeit konstant. Bei manchen Sensoren führt nicht jede Eingangs-Änderung zu einer Änderung des Ausgangssignals. Dies wird durch die Begriffe Quantisierungsfehler bzw. Hysterese beschrieben.

### 4.2 Empfindlichkeit, Auflösung, Genauigkeit, Präzision, Richtigkeit

Die **Empfindlichkeit** (auch Steilheit oder Übertragungsfaktor) gibt die Steigung der statischen Kennlinie an. Liegt keine Gerade vor, wird die differentielle Steigung angegeben. Eine Verschiebung wird mit Offset (oder manchmal auch fälschlich Nullpunkt) bezeichnet.

Die **Auflösung** bezieht sich auf die Kombination Sensor plus Messgerät für die Signalgröße. Sie gibt an, welche kleinste Änderung der Messgröße noch durch die Signalwerte unterschieden werden kann.

Die **Genauigkeit** gibt den maximalen Fehler an, der entsteht, wenn von dem gemessenen Ausgangssignal des Sensors über die statische Kennlinie (Kalibrierkurve) auf die Eingangsgröße zurück geschlossen wird.

Die Genauigkeit ist abhängig von der Steigung der Kalibrierkurve, deren systematischem Fehler, der Messunsicherheit und der Auflösung oder mit anderen Begriffen von Präzision und Richtigkeit.

Ein Sensor mit hoher **Präzision** liefert eine Signalgröße mit nur kleinen statistischen Schwankungen. Messungen, bei denen die Merkmalswerte nahe beieinander liegen, können trotzdem bezüglich ihrer Reihenfolge und ihrer relativen Abstände unterschieden werden. Allerdings können die Werte bei gleichzeitiger geringer Richtigkeit weitab vom tatsächlichen, richtigen Wert liegen.

Ein Sensor mit hoher **Richtigkeit** liefert einen Wert, der dem tatsächlichen, richtigen Wert nahe liegt. Allerdings kann bei gleichzeitiger geringer Präzision eine große Streuung auftreten. Eine Angabe setzt voraus, dass der richtige Wert bekannt ist.

### 4.3 Dynamisches Verhalten

Bei schnellen Änderungen der Eingangsgröße kann das Ausgangssignal des Sensors verzögert reagieren oder "Überreaktionen" zeigen. Die dynamische Kennlinie zeigt in der Regel die Signalantwort des Sensors auf eine sprungartige Änderung der Eingangsgröße (Sprungantwort). Wenn nur die Größe, nicht aber die Form der Sprungantwort von der Größe des Eingangssprungs abhängt (Proportionalität), verhält sich der Sensor als "Lineares System".

### 4.4 Quereffekte

Das Ausgangssignal kann neben der Messgröße auch durch andere Größen beeinflusst werden (Feuchte, Druck, Magnetfeld). Diese Größen müssen kontrolliert konstant gehalten oder als Parameter miterfasst und in der Kennlinienfunktion berücksichtigt werden.

### 4.5 Betriebsbereiche und Grenzwerte

Kennlinien und Kennwerte gelten für die angegebenen Betriebsbereiche (z.B. bezüglich der Temperatur). Ein Betrieb ausserhalb der Grenzwerte kann zu einer dauerhaften Beeinträchtigung oder Beschädigung des Sensors führen.

## 5. Sensor-Signale

### 5.1 Schalt-Signale

#### 5.1.1 Binärsignal 0 V / 5 V

Den beiden Zuständen EIN und AUS sind die Spannungen +5V (HIGH) und 0V (LOW) zugeordnet. Diese Spannungspegel lassen sich direkt von TTL-Schaltungen (Transistor-Transistor-Logik) verarbeiten. Zur Sicherheit sind die Bereiche für Ein- und Ausgänge unterschiedlich definiert.

Ausgang:  $U < 0.4V$  LOW  $U > 2.4V$  HIGH

Eingang:  $U < 0.8V$  LOW  $U > 2.0V$  HIGH

Dieser Signalstandard ist vorwiegend im Laborbereich und innerhalb von abgeschlossenen Systemen anzutreffen.

#### 5.1.2 Binärsignal 0 V / 24 V

Den beiden Zuständen EIN und AUS sind die Spannungen +24V (HIGH) und 0V (LOW) zugeordnet. Die höhere Spannung ergibt auch eine höhere Störsicherheit. Diese Pegel werden in der Steuerungstechnik für Maschinen und Prozessanlagen verwendet.

### 5.2 Direkte digitale Signale

Nur wenige Sensoren erzeugen direkt aus ihrer Funktionsweise ein digitales Signal. Dazu gehören Strichmaßstäbe für Translations- und Rotationserfassung, bei denen über einen zweiten, versetzten

Maßstab die Bewegungsrichtung erkannt wird, sowie digitale Positions- und Winkelsensoren. Jedes einzelne Bit wird dabei auf einer eigenen Leitung geführt (parallel). Typisch ist der TTL-Pegel.

## 5.3 Digital codierte Signale

### 5.3.1 Nachricht

Für den Einsatz in Bussystemen zur Vernetzung von Sensoren müssen diese Nachrichten senden und empfangen können. Die eigentlichen Inhalte werden als digitaler Code in einen Rahmen (Briefumschlag) gepackt, der die Zieladresse enthält. Die transportierten Inhalte können Angaben zur Sensor-Identifikation, Messwerte, Zustandsinformationen oder Parametrierdaten sein.

### 5.3.2 Protokoll

Im Protokoll ist festgelegt, welchen Aufbau der Datenrahmen hat und wie darin die Informationen für den Transport codiert sind. Die Protokolle unterscheiden sich z.B. in der Anzahl der adressierbaren Stationen, im Umfang der transportierbaren Daten, den Verfahren zur Fehlererkennung und - beseitigung und der Vermeidung von Datenkollisionen. Dies führt zu unterschiedlichen Sicherheiten, Übertragungsgeschwindigkeiten und Reaktionsgeschwindigkeiten. Einige gebräuchliche Protokolle sind:

- CAN-Bus (auf RS 485)
- ModBus (auf RS 485)
- Profibus (auf RS 485)
- AS-i
- TCP/IP (Industrial Ethernet)

### 5.3.3 Übertragungssystem (Bussystem)

Die im Rahmen verpackte Information kann über verschiedene elektrische (oder optische) Standards übertragen werden. Dort sind z.B. die Spannungspegel, die zeitlichen Bedingungen, die Art des Kabels und die Maßnahmen zur Störunterdrückung festgelegt. Einige gebräuchliche Bussysteme sind:

- RS 232 (+12V / -12V massebezogen, Steuerleitungen TTL)
- RS 485 (-5V / +5V massefrei)
- IEC-Bus (0V / +5V parallel)
- AS-i, EN 50295 (Frequenzumtastung auf Versorgungsleitung 24V)
- Industrial Ethernet (z.B. Secos III, Profinet, Varan, ...)

## 5.4 Analoge Signale

### 5.4.1 nicht standardisiert

Aktive Sensoren liefern ihre Information z.B. als Spannung (Thermoelement), Strom (Fotozelle), Ladung (Piezosensor), Frequenz (Tacho), Phase oder Tastgrad. Nur in wenigen Fällen kann eine größere Entfernung störicher überbrückt werden. Der Sensor wird daher mit einer elektronischen Schaltung kombiniert, die standardisierte Signale liefert. Normalerweise findet hier auch eine Linearisierung statt. Die Umrechnung kann mit einer multiplikativen Konstante (Steigung, Verstärkung, gain) und einer additiven Konstante (Abschnitt, Verschiebung, offset) erfolgen. Es kann immer nur ein Analogsignal auf einer Leitung übertragen werden.

### 5.4.2 Einheitssignal 0 . . . 10 V

Der gesamte Messbereich des Sensors (z.B. 1 bar bis 5 bar) wird auf den Spannungsbereich von 0V bis 10V abgebildet. Spannungen lassen sich leicht stabilisieren, so dass sie von der Belastung weitgehend unabhängig sind. Nachteilig ist der Spannungsabfall auf den Leitungen, so dass nur kurze Entfernungen überbrückt werden können.

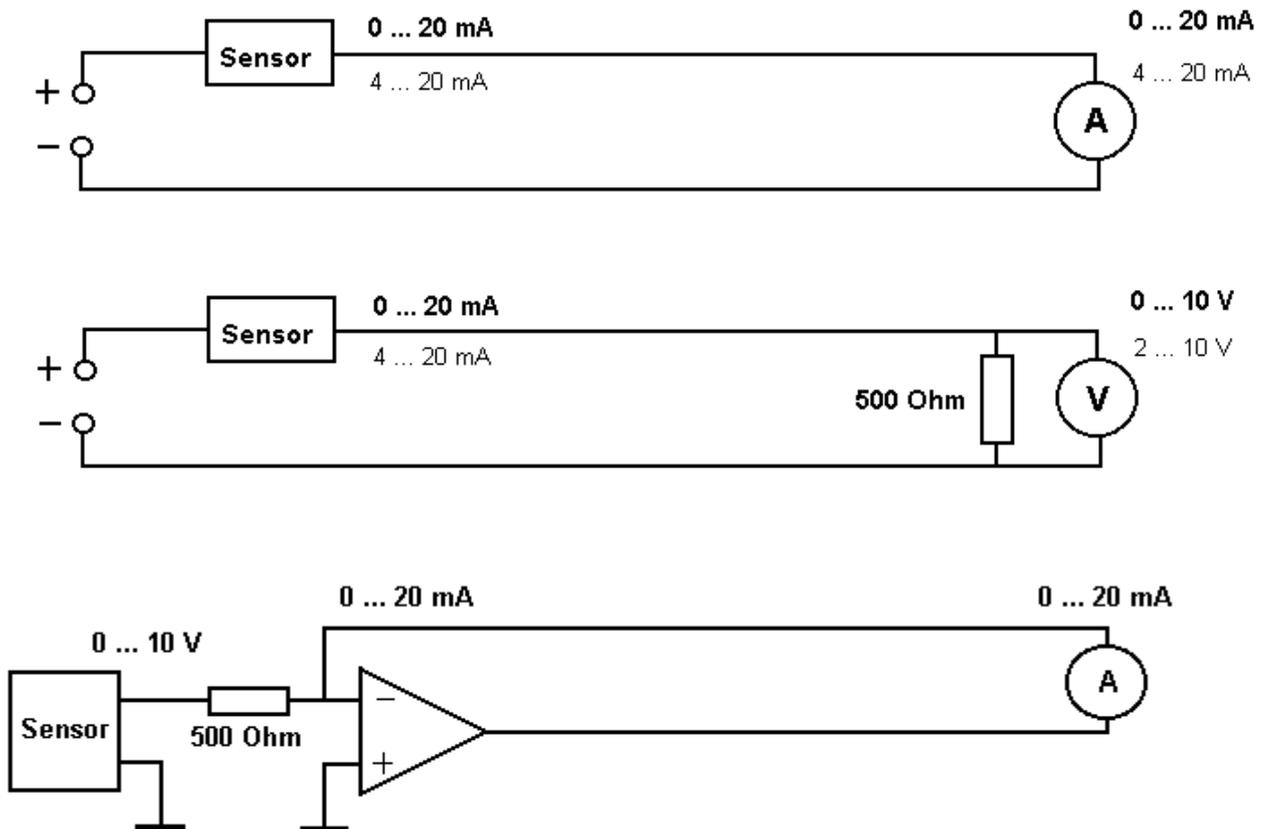
### 5.4.3 Einheitssignal 0 . . . 20 mA

Der gesamte Messbereich des Sensors (z.B. 1 bar bis 5 bar) wird auf den Strombereich von 0mA bis 20mA abgebildet. Eine Stromquelle mit stabilisiertem Strom passt die Spannung an den angeschlossenen Widerstand an. Fast beliebig große Entfernungen (km-Bereich) lassen sich so überbrücken. Nachteilig ist, dass zur Messung der Stromkreis aufgetrennt werden muss, um das Amperemeter anzuschalten. Beträgt

der Eingangswiderstand am Empfänger 500 Ohm, ergibt sich dort gerade ein Spannungsbereich von 0V bis 10V. Manchen Sensoren ist ein solches Widerstandsbauteil beigelegt.

#### 5.4.4 Einheitssignal 4 . . . 20 mA (lebender Nullpunkt)

Um einen Messwert an der Untergrenze des Messbereichs von einem Leitungsbruch unterscheiden zu können, ist der zulässige Strombereich auf 4mA (Untergrenze des Messbereichs) bis 20 mA (Obergrenze des Messbereichs) eingeschränkt. Natürlich müssen hier andere Umrechnungskonstanten verwendet werden.



Mit einfachen Schaltungen lassen sich die einzelnen Standards ineinander überführen. Der Verstärker der dritten Schaltung sorgt für ausreichenden Strom bei hochohmigem Sensor-Ausgang. Er ist an eine eigene Stromversorgung angeschlossen.

#### 5.4.5 Einheitssignal Sinus-Cosinus

Bei der Messung von Position oder Winkel werden statt Rechtecksignalen häufig auch Spannungen bzw. Ströme mit sinusförmigem Verlauf in Abhängigkeit vom Ort bzw. Winkel verwendet. Da die Umkehrung des Sinus nicht eindeutig ist (gleicher Wert bei verschiedenen Winkeln), wird ein zweites, cosinusförmiges Signal für die Feststellung des Quadranten verwendet. Eine mögliche technische Realisierung sind Gitter entsprechender Transparenz, die gegeneinander verschoben werden (Gitterabstand z.B. 10  $\mu\text{m}$ ) oder induktive Systeme.

### Hinweise

Die elektronische Aufbereitung der Signale nennt man Signal-Konditionierung.

Auch bei pneumatischen Anlagen (mit Druckluft) wird ein Standardsignal verwendet. Der Meßbereich wird durch den Druck zwischen 0,2 bar und 1,0 bar dargestellt.