

Magnetisch-induktive Sensoren

u.M.v. Kevin Kondziella, Oliver Haack, Christian Stahl, Marco Wieland

Als magnetisch-induktive Sensoren gelten solche, die für die Erfüllung ihrer Funktion die physikalischen Effekte magnetischer Felder nutzen. Hierbei finden je nach Sensorprinzip sowohl elektromagnetische als auch dauermagnetische Felder ihre Anwendung. In Abhängigkeit des verwendeten Effekts kann eine weitere Untergliederung stattfinden.

Im Allgemeinen können mit Hilfe der Magnetfeldsensoren neben Positionen auch verschiedene andere Größen erfasst werden. Zum Einsatz kommen diese Sensoren in nahezu allen Bereichen der Industrie. Dazu gehören unter anderem die Automobilindustrie, die Medizintechnik und die Verkehrstechnik. Drehzahlen, Winkel und die Präsenz stellen die am häufigsten mit dieser Art der Sensoren erfassten Größen dar.

Nach einer Darstellung der allgemeinen physikalischen Grundlagen werden im Folgenden die auf dem Hall-Effekt basierenden sowie die auf Induktion basierenden Sensoren vorgestellt, da diese am häufigsten verwendet werden.

Physikalische Grundlagen

Das Verständnis der Messprinzipien magnetisch-induktiver Sensoren erfordert einige allgemeine Kenntnisse im Bereich des Elektromagnetismus. Die wichtigsten Grundbegriffe werden in diesem Kapitel dargestellt und erläutert.

Magnetfelder

Magnetfeldlinien sind im Gegensatz zu Linien des elektrischen Feldes immer geschlossen. Sie treten am magnetischen Nordpol aus dem Magneten aus und am Südpol wieder ein. Im Inneren des Magneten verlaufen sie vom Süd- zum Nordpol. Abbildung 4.1.1 zeigt das Feld eines stabförmigen Permanentmagneten. Offensichtlich sind die Magnetfeldlinien an den Stirnflächen der Pole sehr konzentriert. Das Feld ist daher dort besonders stark. Solche Dauermagneten kommen in Hall-Sensoren (siehe Kapitel 4.2) fast ausschließlich zum Einsatz. Aber auch die sogenannten Induktiv- oder Induktionsgeber zur Erfassung kontinuierlicher translatorischer oder rotatorischer Bewegungen basieren auf Permanentmagneten (siehe Kapitel 4.3).

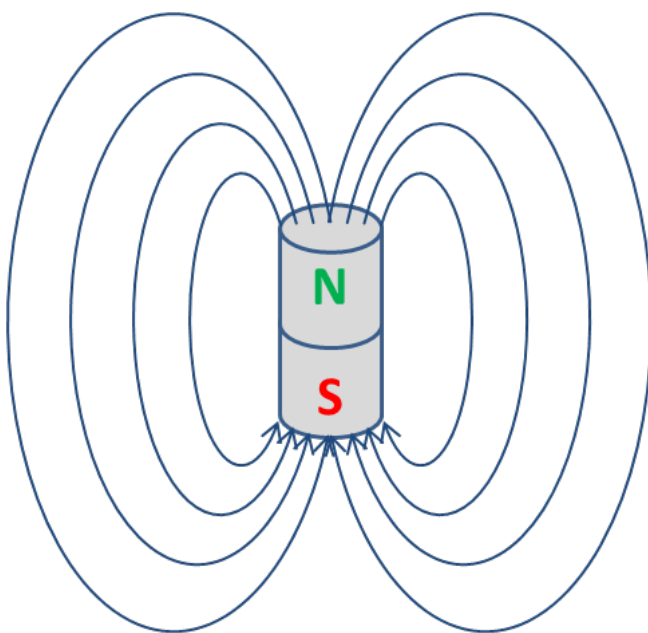


Abbildung 4.1.1: Magnetfeld eines stabförmigen Permanentmagneten.

Gemäß dem Ampèreschen Gesetz (Maxwell-Gleichungen) sind elektrische Ströme die Ursache von Magnetfeldern. Das Feld von Permanentmagneten lässt sich auf inneratomare Kreisströme zurückführen. Jeden stromdurchflossenen elektrischen Leiter umgibt daher ein magnetisches Feld. Im Falle eines langen, geraden Leiters liegen die Feldlinien in Form konzentrischer Kreise um diesen herum. Die Richtung dieses magnetischen Feldes kann bei bekannter technischer Flussrichtung der elektrischen Stromstärke mit Hilfe der Rechten-Faust-Regel bestimmt werden: Zeigt der abgespreizte Daumen der rechten Hand in Richtung des Stromflusses, deuten die gekrümmten Finger in Richtung der Magnetfeldlinien. Abbildung 4.1.2 verdeutlicht dies.

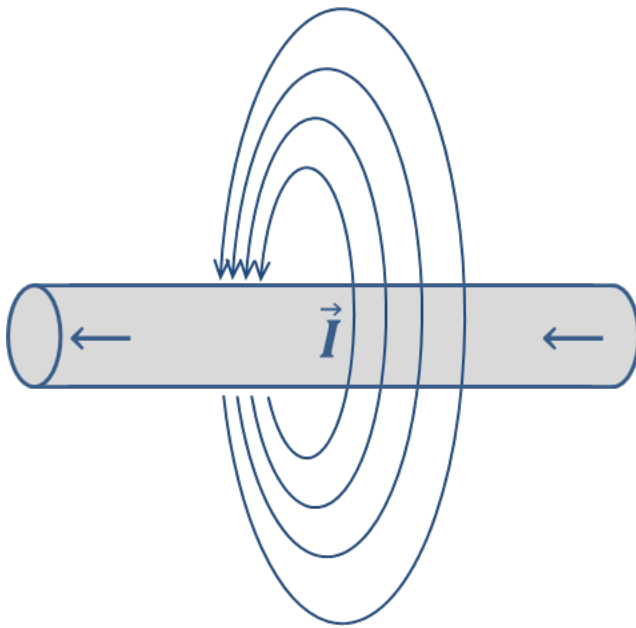


Abbildung 4.1.2: Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters.

Ein stärkeres Magnetfeld erreicht man durch den Einsatz von Spulen. Der stromdurchflossene Leiter wird hierfür zu einer Rolle aufgewickelt, um so die wirksame Fläche zu erhöhen. Abbildung 4.1.3 zeigt das Magnetfeld einer Zylinderspule. Mit Ausnahme der oben genannten Induktiv- oder Induktionsgeber setzen die meisten Sensoren, die auf Induktion oder Wirbelströmen basieren, solche Magnetspulen ein.

Unsupported image type: .wmf

Magnetische Kenngrößen

Eine wichtige Kenngröße zur Bestimmung der Stärke und Richtung eines Magnetfeldes ist die magnetische Feldstärke. Deren Einheit ist das Ampere pro Meter (A/m). Wesentlich häufiger wird zur Charakterisierung allerdings die zur Feldstärke proportionale magnetische Flussdichte verwendet, denn diese berücksichtigt gleichzeitig das umgebende Medium. Die Flussdichte ergibt sich durch Multiplikation der Feldstärke mit der magnetischen Permeabilität:

88.75% 11.25%

(4.1.1)

Die Einheit der magnetischen Flussdichte ist das Tesla (T), benannt nach dem serbisch-stämmigen Physiker Nicola Tesla (Stiny 2011, S. 98).

Die Permeabilität ist eine Materialkonstante des umgebenden Mediums oder (insbesondere bei Spulen) des Mediums in Inneren. Sie gibt dessen Durchlässigkeit für magnetische Felder an. Die magnetische Permeabilität ist das Produkt

aus der magnetischen Feldkonstante und der einheitenlosen relativen Permeabilität (Permeabilitätszahl) des jeweiligen Stoffs :

88.75% 11.25%

(4.1.2)

Die magnetische Flussdichte beschreibt die Anzahl der Feldlinien durch ein bestimmtes Flächenstück. Wird Sie mit der Querschnittsfläche multipliziert, so ergibt sich der magnetische Fluss . Für den Fall eines homogenen Feldes und einer ebenen Fläche berechnet sich der Fluss folgendermaßen:

88.75% 11.25%

(4.1.3)

Die Einheit des magnetischen Flusses ist das Weber (Wb), benannt nach dem deutschen Physiker Wilhelm Eduard Weber.

Magnetische Materialien

Materialien werden aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften in drei Gruppen eingeteilt. Wenn die relative Permeabilität kleiner als eins ist, spricht man von diamagnetischen Stoffen (Diamagnetika). Ist sie größer als eins, nennt man die Stoffe paramagnetisch (Paramagnetika). Wenn wesentlich größer als eins ist, bezeichnet man die Stoffe als ferromagnetisch (Ferromagnetika). Die Tabelle 4.1.1 liefert einer Übersicht (Baumann 2011, S.66).

62.94% 37.06%

Tabelle 4.1.1: Relative Permeabilität verschiedener Stoffe (Baumann 2011, S.66).

Relative Permeabilität

Diamagnetika

Wasser	0,999 993
--------	-----------

Stickstoff (Gas)	0,999 999 993
------------------	---------------

Gold	0,999 971
------	-----------

Paramagnetika

Aluminium	1,000 024
-----------	-----------

Sauerstoff	1,000 001 5
------------	-------------

Ferromagnetika

Baustahl	800 – 2.000
----------	-------------

Eisen (rein)	10.000
--------------	--------

Permalloy	70.000
-----------	--------

Ferromagnetische Werkstoffe zeigen in einem externen Magnetfeld eine eigene (spontane) Magnetisierung, deren Richtung vom äußeren Magnetfeld bestimmt wird. Diese (makroskopische) Magnetisierung rührt von der Orientierung ungeordneter (mikroskopischer) Magnetmomente her und ist nicht, wie bei diamagnetischen oder paramagnetischen Materialien, induziert. Im Allgemeinen hat das Magnetfeld des Ferromagneten die gleiche Ausrichtung wie das externe Feld.

Ferromagnetika lassen sich in weichmagnetische und hartmagnetische Materialien unterteilen. Hartmagnetische Stoffe (z.B. gehärteter Stahl) können die externe Magnetisierung dauerhaft annehmen und so zu Permanentmagneten werden. In weichmagnetischen Materialien (z.B. Eisen, Kobalt, Nickel) verliert sich die Magnetisierung meist sofort wieder, wenn der Gegenstand aus dem externen Magnetfeld entfernt wird. Dies ermöglicht eine schnelle Anpassung der Ausrichtung an alternierende externe Felder. Daher kommen weichmagnetische Ferromagnetika häufig als Kernmaterial in wechselstrombetriebenen Magnetspulen zum Einsatz. Aufgrund ihrer sehr großen relativen

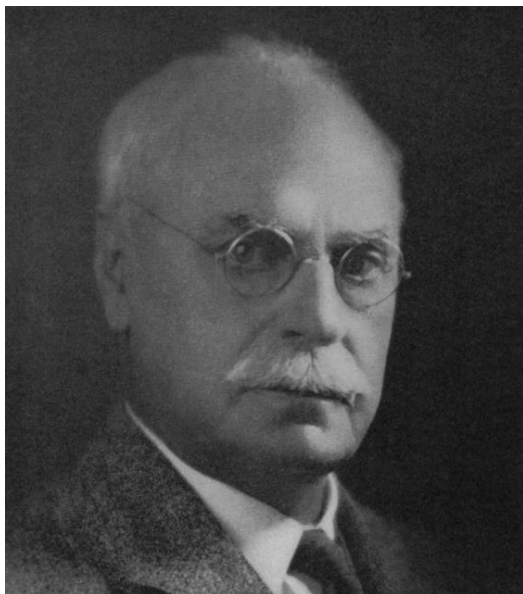
Permeabilitäten von bis zu 300.000 kann die Ausrichtung ihrer magnetischen Momente parallel zum äußeren Magnetfeld dieses außerordentlich verstärken (siehe Gleichung 4.1.1).

Wird also der weichmagnetische Eisenkern in einer Spule leicht verschoben und anteilig durch Luft ersetzt, hat dies eine erhebliche Veränderung der effektiven magnetischen Permeabilität und, nach Gleichung 4.1.1, der magnetischen Flussdichte so auch des magnetischen Flusses zur Folge. Dieser Zusammenhang stellt die Funktionsgrundlage der meisten induktionsbasierten Sensoren dar.

Hall-Sensoren

Einleitung

Das folgende Kapitel behandelt die auf dem Hall-Effekt basierenden Sensoren.



Der nach Edwin Herbert Hall (siehe Abbildung 4.2.1) benannte physikalische Effekt gründet auf dem galvanomagnetischen Prinzip. In der im September 1879 im *American Journal of Mathematics* veröffentlichten Publikation „*On a New Action of the Magnet in Electric Currents*“ setzt sich Hall öffentlich mit seiner Entdeckung auseinander (E.H. Hall 1879, S. 287 ff.). Motiviert durch die Arbeiten von J.C. Maxwell und die Vorlesungen seines Doktorvaters H.A. Rowland beschäftigte sich Hall mit dem Auftreten einer elektrischen Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet. Verantwortlich für diesen Effekt ist die Lorentzkraft.

Voraussetzung für die messtechnische Nutzung des Hall-Effekts ist ein homogenes Magnetfeld, welches auf einen stromdurchflossenen Leiter oder Halbleiter wirkt und senkrecht zu der Stromflussrichtung ausgerichtet ist. Durch die örtliche Ablenkung der Elektronen im stromdurchflossenen Leiter kann eine elektrische Spannung orthogonal zur Stromflussrichtung gemessen werden, welche als Hall-Spannung bezeichnet wird (Tränkler 2014, S. 67).

Der physikalische Hintergrund wurde in Kapitel 4.1 erläutert. Diese Grundkenntnisse des Magnetismus werden für die in Kapitel 4.2.2 folgende Erläuterung des Messprinzips vorausgesetzt. Kapitel 4.2.3 stellt im Anschluss die Anwendungsbereiche dieses Sensorprinzips dar. Es folgt eine tabellarische Zusammenstellung der verschiedenen kommerziellen Produkte in Kapitel 4.2.4. Den Abschluss bildet Kapitel 4.2.5 in Form einer Zusammenfassung.

Messprinzip

Lorentzkraft

Der Hall-Effekt basiert auf der nach dem niederländischen Physiker Hendrik Antoon Lorentz benannten Kraft. Wirkt ein äußeres Magnetfeld orthogonal zu einem Leiter, der die elektrische Stromstärke führt, so interferiert das externe Magnetfeld mit dem den Leiter umgebenden Feld (siehe Abbildung 4.1.2). Dort, wo die Feldlinien entgegengesetzt zueinander gerichtet sind, kommt es zu einer Schwächung des äußeren Feldes. Eine Feldverstärkung entsteht dort, wo die Magnetfeldlinien in dieselbe Richtung wirken (Daniel 1997, S. 135). Dies hat zur Folge, dass der Leiter in Richtung der geschwächten Feldlinien „abgedrängt“ wird. Die für diesen Effekt verantwortliche Kraft wird als Lorentzkraft bezeichnet. Die Abbildung 4.2.2 verdeutlicht dies.

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.2.2: Lorentzkraft und Überlagerung der magnetischen Felder.

Bewegt sich eine elektrische Ladung mit der Driftgeschwindigkeit im Magnetfeld, kann die Lorentzkraft mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

88.75% 11.25%

(4.2.1)

Unter der Driftgeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit verstanden, mit welcher sich Ladungsträger aufgrund eines äußeren elektrischen Feldes bewegen. Die Wirkrichtung der Lorentzkraft kann mit Hilfe der orthogonalen Drei-Finger-Regel der rechten Hand bestimmt werden: Zeigt der Daumen in Richtung der Ladungsbewegung (oder) und der Zeigefinger in Richtung der Magnetfeldlinien, dann gibt der Mittelfinger die Krafrichtung an. Eine negative Ladung (Elektronenfluss) kehrt die Richtung um (Halliday & Koch 2013, S. 564).

Hall-Effekt

Im Folgenden wird die Richtungsangabe einer Größe im Index geführt. Damit erübrigt sich die Vektorschreibweise. Als Basis dient der in Abbildung 4.2.3 dargestellte stromdurchflossene Leiter der Breite und der Dicke .

Unsupported image type: .wmf

Der in Richtung der positiven x-Achse fließende Strom entspricht Ladungsträgern der Einzelladung, die sich mit der Driftgeschwindigkeit bewegen. Die Kombination mit dem senkrecht dazu in z-Richtung wirkenden Magnetfeld erzeugt die auf die Elektronen wirkende Lorentzkraft in y-Richtung. Gleichung 4.2.1 vereinfacht sich dann folgendermaßen:

88.75% 11.25%

(4.2.2)

Die Verschiebung der Elektronen durch die Lorentzkraft bewirkt einen Elektronenüberschuss auf der rechten und einen daraus resultierenden Elektronenmangel auf der linken Seite des Leiters (jeweils bezüglich der Stromrichtung). Dadurch baut sich proportional zum resultierenden elektrischen Feld mit der elektrischen Feldstärke eine der Lorentzkraft entgegengerichtete elektrische (Coulomb-) Kraft auf:

88.75% 11.25%

(4.2.3)

Die Ladungen werden so weit verschoben, bis sich ein Kräftegleichgewicht zwischen und eingestellt:

88.75% 11.25%

(4.2.4)

Die Hall-Spannung ist dann gerade die Potentialdifferenz im elektrischen Feld über die Breite der Leiterplatte:

88.75% 11.25%

(4.2.5)

Aus Gleichung 4.2.4 und Gleichung 4.2.5 ergibt sich:

88.75% 11.25%

(4.2.6)

Wenn die elektrische Leitfähigkeit des Materials nur von einer Ladungsträgerart bestimmt wird, kann die Driftgeschwindigkeit gemäß folgender Gleichung auch als Funktion der Stromstärke und der Ladungsträgerdichte ausgedrückt werden:

88.75% 11.25%

(4.2.7)

wobei bei reiner Elektronenleitung der Elementarladung entspricht. Der erste Term in Gleichung 4.2.7 stellt somit eine Materialkonstante dar und wird als Hall-Konstante bezeichnet. Achtung: Auch der Hall-Widerstand wird oft mit gekennzeichnet (Kittel 2006, S. 174).

Einsetzen von Gleichung 4.2.7 in Gleichung 4.2.6 ergibt die für die Hall-Sensoren grundlegende Gleichung zur Berechnung der Hall-Spannung:

88.75% 11.25%

(4.2.8)

Die Hall-Spannung ist also direkt proportional zum magnetischen Fluss und zur Hall-Konstanten (umgekehrt proportional zur vorzeichenbehafteten Ladungsträgerdichte). Der spezifische elektrische Widerstand kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden (Döring 1981, S. 69).

Das Vorzeichen der Hall-Konstante wird dabei durch die Art der beweglichen Ladungsträger bestimmt. Sie nimmt bei reinen Elektronenleitern wie Silber oder Kupfer negative Werte an. Bei Halbleitern wie Bismut oder Verbindungshalbleitern wie Zinn können durch die sogenannte Löcherleitung, in welchen Defektelektronen häufig vereinfacht als positive Ladungsträger beschrieben werden, auch positive Werte auftreten (Vogg 2008, S. 126). Eine Zusammenstellung von Hall-Konstanten verschiedener Leitermaterialien liefert die folgende Tabelle:

61.75% 38.25%

Tabelle 4.2.1: Hall-Konstanten ausgewählter Materialien (Hering 2012, S. 48).

Werkstoff

Elektronenleiter

Kupfer (Cu)

Silber (Ag)

Löcherleitung

Zinn (Sn)

Kadmium (Cd)

Halbleiter

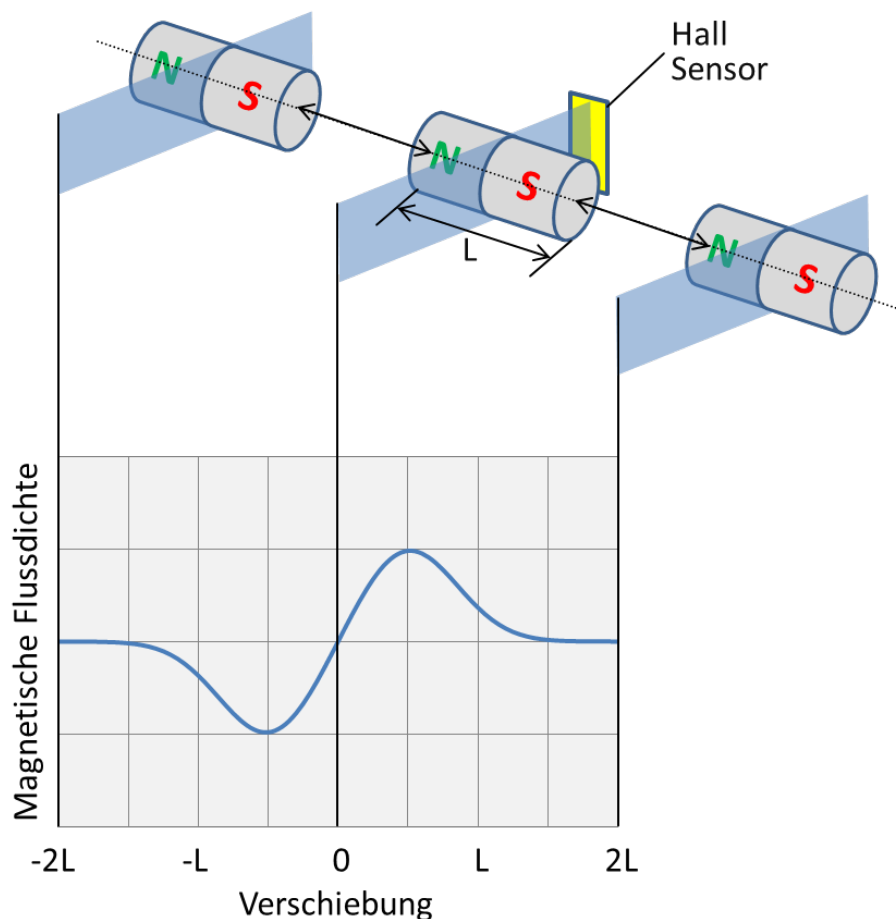
Indium-Antimonid (InSb)

Bismut (Bi)

In dauerleitenden Materialien ist die Beweglichkeit der Ladungsträger für Messanwendungen in der Regel zu gering, weshalb in Hall-Sensoren häufig Halbleitermaterialien zum Einsatz kommen (Hering 2012, S. 48).

Hall-Sensor

Ein Hall-Effekt wird zur Ermittlung verschiedener Größen genutzt. Unabhängig von der Messaufgabe stellt aber stets die Hall-Spannung die indirekte Messgröße dar, aus der dann die interessierende Größe abgeleitet wird. In der Praxis besteht der Hall-Sensor oft nur aus der stromdurchflossenen Leiterplatte und der Messeinrichtung für die Hall-Spannung. Das magnetische Feld wird in der Regel von externen Magneten generiert, wobei überwiegend Permanentmagneten zum Einsatz kommen. Für die Erfassung von Positionen und Verschiebungen ist entweder der Magnet oder der Hall-Sensor mit dem zu vermessenden Objekt verbunden. Die jeweils andere Komponente ist ortsfest. Bei Annäherung des Hall-Elements an die Stirnflächen der Magnetpole vergrößert sich die magnetische Flussdichte (vergleiche Abbildung 4.1.1) und damit gemäß Gleichung 4.2.8 auch die Hall-Spannung. Bei Entfernung von diesen verringert sie sich. Abbildung 4.2.4 verdeutlicht die Funktion des Verschiebungs-Sensors auf Basis eines Hall-Elements. Außerdem zeigt sie die magnetische Flussdichte als Funktion der Magnetposition. Deren Betrag wird maximal bei einer Verschiebung um die Hälfte der Magnetlänge. Der Gesamtmessbereich entspricht demnach also in der Regel der Länge des Magneten. Der annähernd lineare Messbereich ist noch deutlich kleiner (Allegro Microsystems 2013).



Einige Anwendungen erlauben allerdings den Einsatz längerer Magneten nicht. Um auch in solchen Fällen einen größeren Messbereich zu ermöglichen, werden manchmal zwei Hall-Sensoren im festen Abstand verwendet, zwischen

denen sich der verschiebbare Magnet befindet. Die Signalauswertung erfolgt dann differentiell (Gradienten-Hall-Sensoren / Differential-Hall-Sensoren). Andere Varianten arbeiten mit zwei Magneten, zwischen denen sich der Hall-Sensor befindet (Texas Instruments 2014).

Für einige Anwendungen ändert sich das Magnetfeld nicht kontinuierlich sondern diskret. Hierfür wird das Magnetfeld (oft durch periodische Annäherung und Entfernung des Magneten) an- und ausgeschaltet, oder es werden im Wechsel magnetische Nord- und Südpole zum Sensor gerichtet.

Eigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften dieses Messprinzips seien kurz zusammengefasst:

- Hall-Sensoren auf Halbleiter-Basis können einfach in Mikrochips und integrierte Schaltkreise (ICs) implementiert werden. Dies ermöglicht
 - ☐ sehr kompakte Bauweise,
 - ☐ geringes Gewicht,
 - ☐ niedrige Anschaffungskosten,
 - ☐ direkte Kompensation der Temperaturabhängigkeit (alternativ mittels Stromregelung),
 - ☐ direkte Kompensation von Nichtlinearitäten,
 - ☐ digitale Aufbereitung der Signale und
 - ☐ Durchführung der Signalauswertung on-board.
- Messungen mit Hall-Sensoren erfolgen in der Regel berührungslos. Dies erlaubt es, die Sensoren zu kapseln, und ermöglicht so
 - ☐ Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung,
 - ☐ Einsatz unter harschen Bedingungen und
 - ☐ lange Lebensdauer.
- Hall-Sensoren basieren oft auf der Detektion diskreter Zustände (z.B. Magnetfeld an/aus oder magnetischer Nordpol/Südpol). Dadurch sind
 - ☐ sehr hohe Messqualitäten und -genauigkeiten erreichbar (Janisch 2006, S. 1 ff.) und
 - ☐ die Sensoren auch zur Erfassung sehr langsamer oder sogar statischer Zustände geeignet (Hering 2012, S. 49).

Anwendungen

Der Hall-Sensor ist der meistgenutzte Sensortyp weltweit (Hering 2012, S. 436). In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der Hall-Sensoren dargestellt. Zunächst werden die drei wichtigsten technischen Prinzip-Anordnungen kompakt beschrieben. Anschließend erfolgt eine Aufführung der Anwendungsbereiche nach Industriebranchen geordnet. Im letzten Schritt werden die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten der auf dem Hall-Effekt basierenden Sensoren anhand von Anwendungsbeispielen aufgezeigt.

Hall-Sensoren werden in der Praxis in verschiedenen Prinzip-Anordnungen hergestellt. Eine Übersicht zeigt Tabelle 4.2.2.

32.81% 67.19%

Tabelle 4.2.2: Prinzip-Anordnungen von Hall-Sensoren.

Prinzip-Anordnung

Besonderheiten

Diskrete Hall-Sensoren

Unter den diskreten Hall-Sensoren werden einachsige Sensoren verstanden, welche häufig aus dünnen Halbleiter-Elementen bestehen. Hierbei erfolgt keine interne Signalaufbereitung sondern die reine Erfassung des magnetischen Feldes.

Integrierte Hall-Sensoren

Diese Hall-Elemente sind bereits in Schaltkreise integriert. Hier können unmittelbar eine Signalverstärkung, eine A/D-Signalumsetzung, eine digitale Signalaufbereitung oder

entsprechende Korrekturen erfolgen. Der Sensor kann so weit entwickelt werden, dass er direkt nach dem Anschluss korrekte Werte liefert. Integrierte Hall-Sensoren werden unterschieden in:

Laterale Hall-Sensoren

Hier erfolgt die Messung der magnetischen Flussdichte senkrecht zur Chip-Oberfläche. Dieser Aufbau wird in der Praxis fast ausschließlich verwendet.

Vertikale Hall-Sensoren

Hier erfolgt die Messung der magnetischen Flussdichte parallel zur Chipoberfläche. Diese Sensoren weisen im Durchschnitt bisher schlechtere Spezifikationen auf als laterale Sensoren. Erst neueste Entwicklungen machen diesen Sensortyp serientauglich.

Gradienten-Hall-Sensoren (Differential-Hall-Sensoren)

Bei den Gradienten-Hall-Sensoren wird mittels zweier (oder mehrerer) in bestimmtem Abstand zu einander angeordneter Hall-Elemente eine differentielle Auswertung der Einzelsignale durchgeführt. Diese Schaltung macht den Sensor robuster gegenüber homogenen magnetischen Störfeldern. Besonders für Positionssysteme und Stromsensoren bietet sich dieses Prinzip an.

Die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten des Hall-Sensors sind in Tabelle 4.2.3 nach Industriebranchen aufgelistet.

28.12% 71.88%

Tabelle 4.2.3:
Nutzungsmöglichkeiten des Hall-Sensors nach Branchen gegliedert.

Branchen	Nutzungsmöglichkeiten
Maschinenbau	Lineare Wegmesssysteme zur Positionserfassung, prellfreie Näherungsschalter, Drehwinkel und Drehzahl der Hauptspindel von Werkzeugmaschinen
Automobilindustrie	Messung von Raddrehzahl, Getriebedrehzahl, Pedalwinkel. Darüber hinaus: Sitzbelegungserkennung und automatische Leuchtweitenregulierung
Medizin	Kontaktlose Sicherheitsfunktionen in sterilen Diagnose- und Versorgungsgeräten
Produktion	Berührungslose funktions- bzw. erfolgsbestätigende Kontrolle bei Roboter greifern, Erfassung von Endlagen bei Pneumatik- und Hydraulik-Zylindern, verschleißfreie Prüfung der Anwesenheit bei Fördereinrichtungen
Mobile Endgeräte	Erkennung des Schließens von Gehäusen und Schutzhüllen zur automatischen Deaktivierung des Displays, weitere Funktionalitäten für Programme von Drittanbietern
Messinstrumente	Ein- oder zweidimensionale Erfassung von magnetischen Feldern mit anschließender Visualisierung als Magnetfeldkamera, Messung von Schichtdicken
Elektrotechnik	Kontaktlose Strommessung ohne Verletzung der Leitung

Exemplarisch werden nun ausgewählte Einsatzgebiete von Hall-Sensoren näher beschrieben.

Raddrehzahlsensor

Die Raddrehzahl wird für einige Fahrerassistenzsysteme, wie zum Beispiel das Antiblockiersystem (ABS), die Antischlupfregelung (ASR) und das elektronische Stabilisierungssystem (ESP) ausgewertet. Diese Systeme unterstützen den Fahrer und sorgen stets für eine optimale Traktion der Räder auf der Straße. Prinzipiell kann zwar zwischen passiven Raddrehzahlsensoren (induktiver Sensor) und aktiven Raddrehzahlsensoren (Hall-Sensor) unterschieden werden, in der Praxis werden jedoch seit Ende der neunziger Jahre fast ausschließlich aktive Sensoren verwendet (Winner 2009, S. 98 f.).

Im Regelfall verwendet man hierfür einen lateralen Hall-Sensor, welcher in Kunststoff vergossen ist. Die Drehbewegung wird bei dieser Bauweise mit Hilfe eines magnetischen Multipolrings erfasst, der um die Welle montiert ist. Der Multipolring besteht aus Kunststoffelementen, die wechselweise magnetisch gepolt sind. Bei einer Rotation der Welle ändert sich das magnetische Feld vor dem Hall-Sensor periodisch vom Nord- zum Südpol und bewirkt so eine entsprechende Modulation der Hall-Spannung. Aus der Periodendauer und dem Magnetpolabstand (oder -winkel) kann die Drehzahl bestimmt werden. Abbildung 4.2.5 veranschaulicht den Aufbau und die Funktionsweise. Lineare Wegmesssysteme setzen gradlinige Multipolstreifen ein und funktionieren ganz analog.

Unsupported image type: .wmf

Alternativ kann für die Messung des Drehwinkels oder der Drehzahl auch ein Aufbau eingesetzt werden, der auf der Welle ein Impulsrad und auf der der Welle abgewandten Seite des Hall-Elements einen Dauermagneten aufweist (sogenannter Back-Bias-Magnet). Das Impulsrad kann als sehr flaches Zahnrad beschrieben werden. Das konstante Magnetfeld des Back-Bias-Magneten wird durch die Zähne und Lücken des Impulsrades periodisch gestört und erzeugt somit eine Modulation der Hall-Spannung (siehe Abbildung 4.2.6). Die Frequenz der Spannung ist wieder proportional zur Raddrehzahl (Reif 2012, S. 127 f.).

Unsupported image type: .wmf

Getriebedrehzahlsensor

Getriebedrehzahlsensoren finden ihren Einsatz in allen modernen Getriebetypen. Sie dienen hier der Erfassung von Wellendrehzahlen. Bei einem Doppelkupplungsgetriebe, werden die beiden Drehzahlen der Eingangswellen und die Drehzahl der Ausgangswelle erfasst. Auch hier kommt, wie bei den Raddrehzahlsensoren, sowohl die Nutzung eines Multipolrings als auch die Verwendung eines Impulsrades in Kombination mit einem Back-Bias-Magneten in Frage (Reif 2012, S. 123).

Um Störungen durch externe Magnetfelder (wie das des Motors) zu kompensieren, arbeiten Getriebedrehzahlsensoren mit den in Tabelle 4.2.2 beschriebenen Gradienten-Hall-Sensoren. Die folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Sensors mit Back-Bias-Magneten.

Unsupported image type: .wmf

Anwesenheitssensor

Ein veränderter Aufbau ermöglicht die Feststellung der Anwesenheit eines Objekts beispielsweise beim Endschalter einer Sicherheitstür. Häufig kommt hier ein Hall-Sensor im magnetischen Feld eines Dauermagneten zum Einsatz (siehe Abbildung 4.2.8). Dieser liefert bei Nichtvorhandensein des Eisenkerns eine Hall-Spannung, da das magnetische Feld durch den Flussleiter direkt durch den Hall-Sensor fließt. Wird der Eisenkern zwischen die beiden Hälften des Flussleiters geschoben, erzeugt dieser einen magnetischen Kurzschluss und es ist keine Hall-Spannung mehr messbar. Die Anwesenheit der Sicherheitstür kann so nachgewiesen werden (Hesse & Schnell 2014, S. 54).

Unsupported image type: .wmf

Kommerzielle Produkte

Dieses Kapitel präsentiert eine Auswahl der zurzeit am Markt verfügbaren Hall-Sensoren. Die Tabellen sind dabei entsprechend der im Kapitel 4.2.3 aufgeführten Bauformen gegliedert. Somit kann durch den herstellerübergreifenden Vergleich für einen spezifischen Anwendungsfall schnell ein geeigneter Sensor ermittelt werden.

In der folgenden Tabelle 4.2.4 sind zunächst die Halbleitersensorelemente aufgelistet. Typischerweise werden diese in Zwei-, Drei- oder Vier-Draht-Ausführung hergestellt. Dabei sind alle Varianten mit Spannungs-, Strom- oder Digital-Ausgang verfügbar. Da die Masse aller dieser Elemente unter einem Gramm liegt, wird diese Größe hier nicht aufgeführt. Preislich liegen diese Sensorelemente meist bei Cent-Beträgen, wobei die Abnahmemenge eine entscheidende Rolle spielt. Die Abbildung 4.2.9 veranschaulicht typischen Bauformen. Die Abmessungen können der Tabelle entnommen werden.

Unsupported image type: .wmf

15.16% 13.02% 13.42% 24.2%
21.52% 12.68%

Tabelle 4.2.4: Kommerzielle Hall-Sensoren als Halbleiterbauelemente.

Hersteller	Sensortyp	Modell	Messbereich bei 25°C (mT)	Abmessungen (mm)	Quelle
Micronas	Schalter	HAL 101	24,0 – 34,0	2,60 ´ 4,60 ´ 1,20	Micronas.com
	Schalter	HAL 501	-0,8 – 0,6	3,10 ´ 4,11 ´ 1,55	
	Differential	HAL 300	-0,5 – 1,0	3,10 ´ 4,11 ´ 1,55	
	Linear	HAL 24xy	0 – 200	4,00 ´ 5,00 ´ 1,65	
	Strom	CUR 32xy	-	3,10 ´ 4,11 ´ 1,55	
Nicera		NHE528	0 – 50	2,10 ´ 1,25 ´ 0,80	Nicera.co.jp
Infineon	Schalter	TLE4905L	> 17	3,29 ´ 4,16 ´ 1,52	Infineon.com
					semicon.
Panasonic		AN48841B	0,5 – 8	2,00 ´ 1,70 ´ 0,70	Panasonic.co.jp
Texas Instruments	Schalter	DRV5053	> 73	3,21 ´ 4,10 ´ 1,62	ti.com

In Tabelle 4.2.5 erfolgt eine Zusammenstellung charakteristischer technischer Daten von einbaufertigen Hall-Sensoren, welche insbesondere für den Maschinenbau und die Prozessautomatisierung von Bedeutung sind. Abbildung 4.2.10 zeigt verbreitete Bauformen. Die Gliederung dieser Sensortypen erfolgt nach der Funktion: (1) Anwesenheitsprüfung, (2) Drehzahlmessung, (3) Winkelmessung und (4) berührungslose Winkelmessung.

Unsupported image type: .wmf

17.31% 15.57% 12.46%
14.02% 15.57% 0.27%
10.64% 0.27% 13.79%
0.1%

Tabelle 4.2.5: Kommerzielle einbaufertige Hall-Sensoren.

(1) Näherungsschalter
Dieser Sensortyp ist der einfachste, denn hier wird die reine Anwesenheit eines ferromagnetischen Objekts über dem Sensor geprüft. Anwendung findet dieser Sensor z.B. an sicherheitsrelevanten Türen.

Hersteller/ Modell	Arbeits- frequenz	Betriebs- spannung (VDC)	max. Laststrom (mA)	Abmessungen (mm)	ca. Preis (Euro)	Quelle
Hamlin 55100-3M-03-A	max. 10 kHz	3,8 – 24	20	26 ´ 11 ´ 3	6	hamlin.com
elobau 153610	-	10 – 30	100	36 ´ 26 ´ 13	83	elobau.com
Pepperl+Fuchs MB-F32-A2	-	10 – 30	100	50 ´ 21 ´ 18	90	pepperl- fuchs.de

(2) Drehzahlsensoren
Drehzahlsensoren sind die am häufigsten hergestellten Hall-Sensoren. Sie werden meist direkt in entsprechende Bohrungen eingeschraubt, welche dicht an Zahnrädern oder Polscheiben vorgesehen werden.

Hersteller/ Modell	Arbeits- frequenz	Betriebs- spannung (VDC)	Umgebungs- temperatur (°C)	Abmessungen (mm)	ca. Preis (Euro)	Quelle
ifm electronic MX5000	0,005 – 15 kHz	7 – 30	-32 – 140	32 ´ 30 ´ 61	30	ifm.com
Wachendorff WDG24C	max. 12 kHz	5 – 30	-20 – 80	Ø24 ´ 42	195	wachendorff- automation .de
Pepperl+Fuchs MNI40N	max. 1 MHz	10 – 30	-40 – 100	32 ´ 22,4 ´ 5	306	pepperl- fuchs.de

(3) Winkelsensoren
Winkelsensoren dienen zur Messung von Drehwinkeln und geben daher häufig absolute Werte aus. Eine mechanische Verbindung zu der entsprechenden Welle erfolgt durch eine

kraftübertragende Kupplung. Hier gibt es kein externes, ferromagnetisches Gegenstück, denn dieses ist bereits im Gehäuse integriert.

Hersteller/ Modell	Messbereich	Max. Drehzahl (1/min)	Ausgangs- signal	Abmessungen (mm)	ca. Preis (Euro)	Quelle
Novotechnik RSC-2800	max. 1 Umdrehung (durchdrehbar)	800	Strom, Spannung, SSI, SPI	48 ´ 16 ´ 23	120	novotechnik .de
TWK TSA 50	max. 32768 Umdrehungen	1000	Strom, Spannung	Ø50 ´ 60	-	twk.de
Baumer BMMH 58	max. 262144 Umdrehungen	6000	CANopen	Ø58 ´ 32	782	baumer.com

(4) Winkelsensoren – berührungslos
Auch dieser Sensortyp liefert in der Regel absolute Werte.
„Berührungslos“ steht hier für die völlige Kräfte- und Momenten-Freiheit des Sensors, welche durch eine rein magnetische Verbindung, also auch über einen Luftspalt realisiert werden kann. Die maximale Betriebsdrehzahl ist hierbei durch die Lagerung des Magneten und die Abtastrate des Sensors beschränkt. Dieses Messprinzip eignet sich vor allem für sehr kleine Drehmomente, da hier keine mechanischen Verluste die Messung beeinträchtigen.

Hersteller/ Modell	Messbereich	Ausgangssignal	Abmessungen (mm)	ca. Preis (Euro)	Quelle
Novotechnik RFC-4800	360°	Strom, Spannung, SSI, SPI	48 ´ 45 ´ 14	120	novotechnik .de
Baumer MDRM 18	120°	Strom	Ø18 ´ 40	170	baumer.com

Zusammenfassung

Das vorangegangene Kapitel behandelt Sensoren, die auf dem Hall-Effekt basieren. Dabei erfolgt neben der historischen Einordnung auch die ausführliche Erklärung des physikalischen Effekts. Die anschließende Erläuterung der möglichen Anwendungsgebiete und der dort eingesetzten Sensortypen ermöglicht dem Leser einen kompakten Überblick über das derzeitige Nutzungsspektrum. Den Abschluss bildet die tabellarische Auflistung zurzeit am Markt verfügbarer kommerzieller Produkte, gegliedert in Halbleitersensorelemente und einbaufertige Hall-Sensoren.

Der den Sensoren zugrunde liegende Hall-Effekt basiert auf der Lorentzkraft: Wirkt ein homogenes äußeres Magnetfeld orthogonal zu einem stromdurchflossenen elektrischen Leiter, so kommt es zu einer Überlagerung der Magnetfelder. Als Folge dessen wird der Leiter in Richtung der Feldschwächung „abgedrängt“.

In Analogie zu diesem abgelenkten, elektrischen Leiter werden in einem ortsfesten Leiter die Bewegungsbahnen der Elektronen gekrümmt, was auf der einen Seite des Leiters einen Elektronenmangel und auf der gegenüberliegenden einen Elektronenüberschuss verursacht. Der so entstandene Potentialunterschied sorgt für eine messbare Spannung quer zur Stromflussrichtung. Diese als Hall-Spannung bezeichnete elektrische Spannung ist proportional zur magnetischen Flussdichte und stellt unabhängig vom Verwendungszweck stets die Messgröße von Hall-Sensoren dar.

Weiterhin ist die Hall-Spannung umgekehrt proportional zur Ladungsträgerdichte des Leitermaterials. Deshalb werden für Sensoren in der Regel Halbleitermaterialien verwendet. In modernen Sensoren wird das Hall-Element mit ergänzenden integrierten Schaltkreisen zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit, zur digitalen Aufbereitung und für die Signalauswertung auf einem Chip vereint. In der Regel erfolgen sämtliche Messungen kontaktlos, weshalb industrielle Hall-Sensoren häufig gekapselt werden und daher besonders unempfindlich gegen Verschmutzung und extreme Arbeitsbedingungen sind.

Der Hall-Sensor ist der meist genutzte Sensortyp der Industrie weltweit und wird in der Praxis in verschiedensten Prinzip-Anordnungen hergestellt. Er findet unter anderem Verwendung im Maschinenbau, im Automobilbau, der Kommunikationstechnik und der Medizintechnik. Dort dienen die unterschiedlichen Sensorausführungen zur Messung von Positionen, Verschiebungen, Winkeln, Drehzahlen und anderen Größen. Außerdem kann mit Hall-Schaltern die Anwesenheit eines ferromagnetischen Materials geprüft werden. Entfernungsmesser auf Basis des Hall-Effekts bieten typischerweise einen Messbereich von 1 mm bis 100 mm und eine Auflösung von 0,1 mm.

Konkrete Beispiele für das weite Einsatzgebiet dieser Sensorgattung sind die Drehzahlmessung der Räder bei ESP-Systemen oder die Kontrolle der Wellendrehzahlen in Automatikgetrieben von modernen Kraftfahrzeugen. Hall-Schalter kommen auch an sicherheitsrelevanten Türen und Klappen zur Absicherung des Schließstatus zum Einsatz.

Durch die häufig integrierte Korrektur diverser Nichtlinearitäten bei den jeweiligen Sensortypen können mittels Hall-Sensorik hohe Genauigkeiten erreicht werden. Die kompakten Abmessungen, das geringe Gewicht und die niedrigen Preise machen diese Sensoren zusätzlich attraktiv.

Adolphs, DP 2008, *Vergangenheit und Zukunft des induktiven Näherungsschalters* [Online]. http://www.process.vogel.de/automatisierung_prozessleittechnik/articles/145538 (Zugriff 20.06.2015).

Allegro MicroSystems LLC, Andrea Foletto, Andreas Friedrich, Sanchit Gupta, *Analysis of a Hall-Effect System With Two Linear Sensor ICs for 30 mm Displacement*, 2013 [Online]. <http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Hall-Effect-System-With-Two-Linear-Sensor-ICs.aspx> (Zugriff 08.12.2015).

Balluff GmbH 2015, *Robuste Sensoren zur Objekterkennung im Metallbereich* [Online]. <http://www.balluff.com/balluff/MDE/de/produkte/Uebersicht-Induktive-Sensoren.jsp> (Zugriff 20.06.2015).

Baumann, B 2011, *Physik für Ingenieure*, 2. Auflage, Schlembach-Verlag, Wilburgstetten

Bridgman, PW 1939, *Biographical Memoir of Edwin Herbert Hall 1855-1938*, National Academy of Sciences of The United States of America.

Daniel, H 1997, *Elektrodynamik: Relativistische Physik*, de Gruyter, Berlin.

Döring, E 1981, *Werkstoffkunde der Elektrotechnik*, Vieweg, Braunschweig.

Hall, EH 1879, On a New Action of the Magnet on Electric Currents, *American Journal of Mathematics*, Vol. 2, No. 3, pp. 287–292.

Halliday, D & Koch, SW 2013, *Halliday Physik*, 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim.

Hering, E 2012, *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

Hesse, S & Schnell, G 2014, *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*, 6. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

Janisch, J. 2006, Kleiner Effekt – Große Wirkung, *Elektronik Industrie*, No. 7.

Kittel C 2006, *Einführung in die Festkörperphysik*, 14. Aufl., Oldenbourg, München.

Reif, K 2010, *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*, 6. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

Reif, K 2012, *Sensoren im Kraftfahrzeug*, 2. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden.

Stiny, L 2011, *Grundwissen Elektrotechnik*, 61. Aufl., Franzis, München.

Texas Instruments, Wilson Zuo, *Center stage with Hall sensors*, 2014 [Online]. https://e2e.ti.com/blogs_/b/motordrivecontrol/archive/2014/07/21/center-stage-with-hall-sensors (Zugriff 08.12.2015).

Tränkler, HR & Reindl, LM 2014, *Sensortechnik*, 2. Aufl., Springer Vieweg, Heidelberg.

Vogg, W 2008, *Elektrizität und Magnetismus in Theorie und Praxis*, Books on Demand, Norderstedt.

Winner, H, Hakuli, S, Lotz, F, Singer, C 2009, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

Induktive Sensoren

Einleitung

In diesem Kapitel werden Sensoren vorgestellt, die auf elektromagnetischer Induktion beruhen.

Aus der Notwendigkeit heraus, mechanische Schalter in der chemischen Industrie durch eine Alternative zu ersetzen, stellte die Firma Pepperl+Fuchs im Jahr 1958 den ersten induktiven Näherungsschalter her. Dieser bot neben dem Vorteil eines eigensicheren Betriebs (näheres hierzu unter dem Absatz „Chemieindustrie“ in Kapitel 4.3.3) eine hervorragende Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien. Möglich wurde die wirtschaftliche Nutzung des

induktiven Sensors durch die Erfindung des Transistors einige Jahre zuvor. Hierdurch war eine preiswerte Auswerteschaltung für den Schwingkreis realisierbar.

Zunächst blieb der Haupteinsatzbereich auf die Chemieindustrie mit ihren rauen Betriebsbedingungen beschränkt, um dann in den 1960er Jahren auch in weitere Bereiche der Automatisierungstechnik vorzudringen. Gegenüber resistiven Sensoren und elektromechanischen Schaltern überzeugen vor allem der Wegfall des mechanischen Verschleißes und damit die lange Lebensdauer der Produkte.

In den 1970er Jahren stieg die Nachfrage nach den Sensoren stark an, da große Teile der Industrie begannen, auf die Automatisierung zu setzen. Es entstanden viele neue Hersteller und eine große Vielfalt an Produkten.

In den folgenden Jahrzehnten konnten durch die Miniaturisierung und Weiterentwicklung der Transistortechnik große Fortschritte in der Auswerteelektronik gemacht werden. Das führte dazu, dass sich der maximal detektierbare Abstand eines Objekts kontinuierlich erhöhte und sich die Baugröße der Sensoren stetig verkleinerte. Diese Entwicklung wird auch heute noch vorangetrieben (Adolphs 2008).

In Kapitel 4.3.2 wird zunächst das physikalische Messprinzip der Sensoren erläutert. Zum besseren Verständnis dieses Abschnitts empfiehlt es sich, das Kapitel 4.1 „Physikalische Grundlagen“ hinzuzuziehen. Es wird dabei sowohl auf *Verschiebungs- und Positionssensoren* eingegangen, die ein wechselndes Magnetfeld zur Lagebestimmung ruhender und bewegter Objekte einsetzen, als auch auf *Induktivgeber*, die ein konstantes Magnetfeld zur Erfassung bewegter Objekte verwenden.

Es folgt Kapitel 4.3.3 mit einem Überblick über die technischen Anwendungsfälle der Sensoren. Die Vorstellung einiger kommerzieller Produkte schließt sich in Kapitel 4.3.4 an. Dabei wurde ein Querschnitt der am häufigsten verwendeten Sensoren und ihrer Einsatzgebiete aus dem großen Markt abgebildet.

Zum Schluss werden die wichtigsten Erkenntnisse in Kapitel 4.3.5 zusammengefasst. Dabei werden auch die Vor- und Nachteile induktiver Sensoren in kompakter Form erläutert.

Messprinzip

Induktive Wegsensoren sind in der Lage, die Position ruhender und bewegter Objekte zu bestimmen. Ihr Messprinzip kann auf den folgenden Wechselwirkungen basieren:

- Induktion
 - ☐ Selbstinduktion
 - ☐ Gegeninduktion
- Wirbelstromeffekt.

Der vom Aufbau her besonders einfache Induktivgeber setzt einen Permanentmagneten für die Erzeugung des Messsignals ein. Er erfasst ausschließlich Gegenstände, die sich in Bewegung befinden.

Induktive Abstands- und Verschiebungssensoren zur Detektion ortsfester Objekte nutzen ein zeitlich verändertes Magnetfeld, welches grundsätzlich von einer Wechselstrom durchflossenen Spule erzeugt wird (Fraden 2010, S.288 ff.). Die Wechselwirkung mit dem elektrisch oder magnetisch leitfähigen Objekt besteht dabei in der Erzeugung von Wirbelströmen und/oder in der (Selbst)-Induktion. Grundsätzlich gilt: Bei leicht magnetisierbaren Werkstoffen (weichmagnetisch) und Materialien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit sowie bei niedrigen Frequenzen (< 1 kHz) dominiert der induktive Effekt. Bei schwer magnetisierbaren Werkstoffen (hartmagnetisch) und elektrisch gut leitenden Materialien sowie bei hohen Frequenzen (> 100 kHz) dominiert der Wirbelstromeffekt (Schiesle 2008, S. 153). Die Objektentfernung oder -verschiebung wird dann in der Regel als eine Änderung der Induktivität der Spule detektiert. Die Messung erfolgt üblicherweise als Änderung der Impedanz (Wechselstromwiderstand) in einem Wechselstromkreis. Mit induktiven Positionssensoren können translatorische und rotatorische Messgrößen ein- oder mehrdimensional erfasst werden, wobei die Position des Objekts immer relativ zur Spule gemessen wird.

Induktion

Unter elektromagnetischer Induktion, die nach dem englischen Physiker Michael Faraday auch Faradaysche Induktion genannt wird, versteht man das Entstehen eines elektrischen Feldes in einer Leiteranordnung bei einer zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses. In vielen Fällen lässt sich das elektrische Feld durch Messung einer elektrischen Spannung direkt nachweisen (Faradaysches Induktionsgesetz). Für eine schlanke Spule (Durchmesser L) mit der Windungszahl gilt:

88.75% 11.25%

(4.3.1)

Der Induktiv- oder Induktionsgeber zur Erfassung bewegter Objekte basiert auf diesem Zusammenhang: Das Vorbeiführen eines weichmagnetischen Bauteils an einem Permanentmagneten verändert dessen Magnetfeld ausreichend, um in einer benachbarten Spule Spannungsimpulse zu induzieren. Über die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit kann die gewünschte Größe bestimmt werden.

Selbstinduktion

Wie in Abschnitt 4.1 ausgeführt, erzeugen alle stromdurchflossenen Leiteranordnungen selbst ein Magnetfeld. Der magnetische Fluss einer Leiteranordnung ist dabei stets proportional zur Stromstärke. Für eine schlanke Spule mit der Windungszahl gilt:

88.75% 11.25%

(4.3.2)

Die Proportionalitätskonstante ist die sogenannte Induktivität. Ihre Maßeinheit ist das Henry, benannt nach dem US-amerikanischen Physiker Joseph Henry. Die Induktivität einer Spule der Querschnittsfläche und der Länge mit weichmagnetischem Kern berechnet sich dann näherungsweise folgendermaßen, wobei die magnetische Permeabilität des Kernmaterials ist (siehe Gleichung 4.1.2):

88.75% 11.25%

(4.3.3)

Um mit induktiven Sensoren auch unbewegte Objekte im festen Abstand erfassen zu können, muss mit einem zeitlich veränderten Magnetfeld gearbeitet werden, denn nach Gleichung 4.3.1 induziert nur ein sich ändernder magnetischer Fluss eine Spannung. Daher wird die Spule mit Wechselspannung versorgt. Wird die Spule aber von dem korrespondierenden Wechselstrom durchflossen, hat dies nach Gleichung 4.3.2 eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses zur Folge. Diese periodische Variation des Magnetfeldes induziert wiederum gemäß Induktionsgesetz (Gleichung 4.3.1) eine zusätzliche elektrische Spannung im selben Stromkreis (Selbstinduktion). Einsetzen von Gleichung 4.3.2 in 4.3.1 ergibt (Nelles 2003, S. 183):

89.6% 10.4%

(4.3.4)

Diese Spannung hat im geschlossenen Stromkreis der Spule einen zusätzlichen Stromfluss zur Folge. Nach der Lenzschen Regel ist dieser Induktionsstrom dem ursprünglichen Strom entgegengerichtet. Deshalb sind die rechten Seiten der Gleichungen 4.3.1 und 4.3.4 in der Literatur öfter mit einem Minuszeichen versehen (Nelles 2003, S. 190 ff.).

Selbstinduktionsbasierte Positionssensoren gründen auf der Änderung der Induktivität der Messanordnung durch eine Verschiebung des Messobjekts.

Eine erste Variante basiert auf einer festen Verbindung zwischen einem Teil der Messanordnung und dem Messobjekt. Diese Verbindung kann beispielsweise mit dem Tauchkern der Magnetspule bestehen. Beim Verschieben des Kerns mit dem Objekt wird das Spuleninnere anteilig mit Luft gefüllt. Dies hat eine erhebliche Veränderung der effektiven magnetischen Permeabilität und somit auch der Induktivität zur Folge. Andere Bauformen nutzen einen offenen

Magnetkreis, der erst durch einen mit dem Objekt verbundenen Queranker geschlossen wird. Die Induktivität wird dann durch den Luftspalt zwischen dem Sensor und dem Messobjekt bestimmt.

Eine zweite Variante basiert auf der direkten Veränderung der Magnetfeldlinien durch elektrisch oder magnetisch leitende Objekte in der näheren Umgebung. Diese Positionssensoren arbeiten in der Regel berührungslos.

Gegeninduktion

Unter Gegeninduktion (oder induktiver Kopplung) versteht man die gegenseitige magnetische Beeinflussung zweier oder mehrerer räumlich benachbarter elektrischer Stromkreise infolge von elektromagnetischer Induktion. Eine stromführende primäre Leiteranordnung bewirkt einen magnetischen Fluss in einer sekundären Leiteranordnung. Dieser ist abhängig von den Geometrien und direkt proportional zur Stromstärke. Gleichung 4.3.2 wird zu:

$$89.6\% \quad 10.4\%$$

(4.3.5)

Der Proportionalitätsfaktor wird als Gegen- oder Koppelinduktivität bezeichnet. Stromänderungen in dem primären Stromkreis induzieren so auch Spannungen in dem sekundären Stromkreis. Gleichung 4.3.4 wird zu:

$$89.6\% \quad 10.4\%$$

(4.3.6)

Gegeninduktionsbasierte Positionssensoren setzen oft eine Probenspule und eine Messspule ein und arbeiten in der Regel berührungslos (Fraden 2010, S. 188).

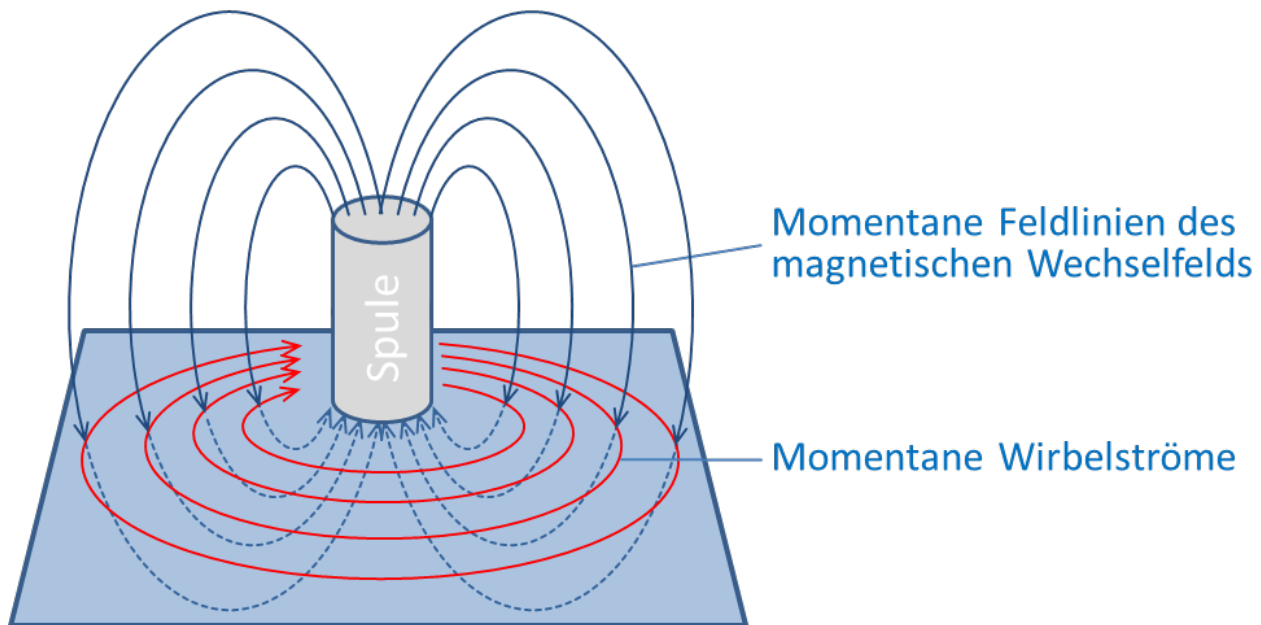
Wirbelstromeffekt

Bei hartmagnetischen und elektrisch gut leitenden Werkstoffen ist der Effekt der Induktion relativ schwach ausgeprägt. Hier dominiert der Wirbelstromeffekt (Schiessle 2008, S. 153).

Gemäß dem Induktionsgesetz induziert ein zeitlich verändertes primäres Magnetfeld in einem elektrisch gut leitenden Objekt, das sich in der Nähe befindet, elektrische Spannungen und Ströme. Diese elektrischen Ströme weisen geschlossene kreisförmige Stromlinien auf und werden daher Wirbelströme genannt. Abbildung 4.3.1 verdeutlicht dies. Solche Wirbelströme lassen sich auch durch die Bewegung des Objekts in einem konstanten aber inhomogenen Magnetfeld generieren. Deren Stärke ist substantiell abhängig von der Leitfähigkeit des Materials.

Die Wirbelströme erzeugen nach dem Ampèreschen Gesetz ein sekundäres Magnetfeld, welches gemäß der Lenzschen Regel dem ursprünglichen Magnetfeld entgegenwirkt. Die Folge ist eine Schwächung des primären Magnetfelds.

Wurde das primäre Magnetfeld von einer Spule erzeugt, hat das geschwächte Magnetfeld eine Verringerung ihrer Induktivität zur Folge (Nelles 2003, S. 190 ff.). Die Wirbelströme und damit auch das sekundäre Magnetfeld sind dabei umso stärker, je näher sich das Objekt an der Magnetspule befindet. Die gemessene Induktivität kann so als Maß für die Entfernung des Objekts zur Spule dienen. Elektrisch gut leitende Materialien werden in der Regel auf Basis des Wirbelstromeffekts detektiert (Tränkler 2014, S. 584; Hering et al. 2014, S. 383).



Sensoren auf Basis der Induktion

Für Anwendungsfälle, bei denen eine kontinuierliche translatorische oder rotatorische Bewegung aufgenommen werden soll, können Sensoren eingesetzt werden, die als Induktiv- oder Induktionsgeber bezeichnet werden. Ein Beispiel für solch eine Anwendung ist der Kurbelwellensensor im Kraftfahrzeug, welcher im Abschnitt 4.3.3 kurz vorgestellt wird.

Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 4.3.2 dargestellt. Der wesentliche Unterschied zu den anderen induktiven Sensoren ist, dass sein Magnetfeld mit Hilfe eines Permanentmagneten erzeugt wird. Durch das Vorbeiführen eines weichmagnetischen Bauteils, welches abwechselnd Nuten und Erhebungen aufweist (z.B. ein Zahnrad), wird nun der magnetische Fluss in regelmäßigen Abständen abrupt geändert, was nach Gleichung 4.3.1 in der Spule periodische Spannungsimpulse induziert. Über die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit kann die Geschwindigkeit oder Drehzahl bestimmt werden. Da das Magnetfeld durch einen Permanentmagneten erzeugt wird, benötigt dieser Sensor keine externe Stromversorgung (Reif 2012, S.120 f.).

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.3.2: Schematischer Aufbau eines Induktivebers.

Sensoren auf Basis der Selbstinduktion

Es existieren sehr viele verschiedene Varianten von Sensoren auf Basis der Selbstinduktion. Von denen sollen hier nur die wichtigsten Bauformen vorgestellt werden (Schiessle 2008, S. 129 ff.):

1. Längsanker-1-Spulen-Sensor
2. Längsanker-Differenzspulensensor
3. Queranker-1-Spulen-Sensor
4. Induktiver Positionssensor

Alle vier Varianten setzen eine Magnetspule und ein durch diese generiertes magnetisches Wechselfeld ein. Die ersten drei Bauformen (a, b, c) werden auch als induktive Verschiebungssensoren bezeichnet, da ihre primäre Aufgabe die Messung von Positionsänderungen eines Messobjekts ist. Sie bedürfen einer festen Verbindung zwischen dem Objekt und der Spule oder dem Spulenkern (Anker). Ihre Funktion basiert auf der Tatsache, dass die Induktivität der Magnetspule eine Funktion der effektiven Permeabilität und damit der Eintauchtiefe und Geometrie des Ankers ist.

Induktive Positionssensoren (d) besitzen einen offenen Magnetkreis und arbeiten berührungslos. Sie basieren auf der direkten Veränderung der Magnetfeldlinien durch elektrisch oder magnetisch leitende Objekte in der näheren Umgebung der Spule.

Längsanker-1-Spulen-Induktivaufnehmer

Die einfachste Variante eines Sensors auf Basis der Selbstinduktion ist der Längsanker-1-Spulen-Induktivaufnehmer. Dieser besteht aus einer feststehenden Spule und einem innerhalb der Spule verschiebbaren weichmagnetischen Kern (Anker). Der Anker ist dabei parallel („längs“) zur Spulenachse ausgerichtet. Bei dem Messobjekt handelt es sich um den Anker selbst oder einen Gegenstand, der mittels eines Jochs mit diesem verbunden ist. Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 4.3.3 dargestellt (Tränkler 2014, S. 579).

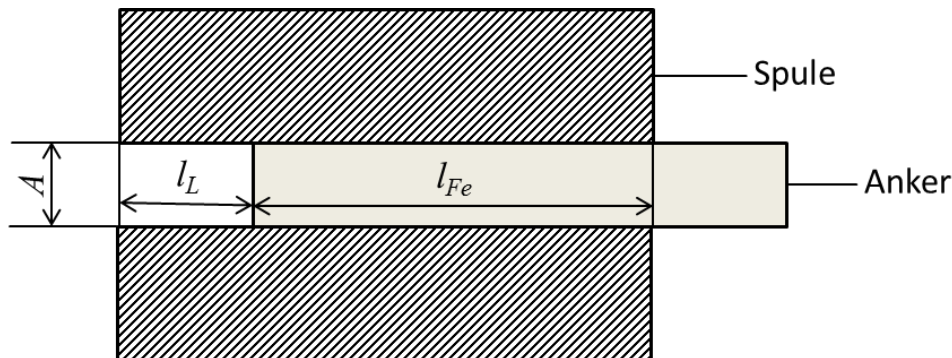


Abbildung 4.3.3: Aufbau eines Längsanker-1-Spulen-Induktivaufnehmers (Hart 2014, S. 203).

Induktive Wegsensoren verwenden meist U- oder Schalenkerne und weisen meist ein geschlossenes Magnetfeld auf. Je nach Position des Ankers ändert sich die Induktivität der Spule. Befindet sich dieser vollständig innerhalb der Spule, ergibt sich ein Maximum. Ist der Anker vollständig außerhalb des Magnetfelds, ergibt sich ein Minimum (Hering et al. 2014, S. 383). Abbildung 4.3.4 zeigt den Zusammenhang zwischen der Eintauchtiefe eines weichmagnetischen Kerns in einem Längsanker-1-Spulen-Sensor und der Induktivität.

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.3.4: Induktivität in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe (Hart 2014, S. 303).

Die Induktivität der Spule wird maßgeblich vom luftgefüllten Anteil bestimmt und lässt sich gemäß Gleichung 4.3.3 wie folgt darstellen (Hart 2014, S. 302):

$$89.6\% \quad 10.4\%$$

$$(4.3.7)$$

Hierbei ist die Länge des luftgefüllten Teils der Spule und ist die Länge des kerngefüllten Teils. Die relative Permeabilität von Luft wird als eins angenommen. Der magnetische Widerstand des kerngefüllten Teils wird in der Praxis aufgrund seiner großen relativen Permeabilität gegenüber dem des luftgefüllten Anteils oftmals vernachlässigt.

Weg- und Winkelmessungen sind mit diesem System möglich, werden jedoch nur selten realisiert, da eine erhebliche Nichtlinearität zwischen der Induktivität und der Eintauchtiefe des Ankers besteht. Aus diesem Grund werden Sensoren mit einer Spule in der Regel nur verwendet, wenn keine besonders genaue Positionsbestimmung notwendig ist.

Längsanker-Differenzspulensensor

Für eine erhöhte Messgenauigkeit benutzt man Längsanker-Differenzspulensensoren nach Abbildung 4.3.5 (Tränkler 2014, S.580 ff.).

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.3.5: Aufbau eines Längsanker-Differenzspulensensors (Schiessle 2008, S. 133).

Bei diesem Verfahren werden zwei gleiche Spulen symmetrisch nebeneinander angeordnet. Der Anker besteht aus einem weichmagnetischen Kern und einem nicht magnetischen Stab, der die Verbindung zum Objekt herstellt. In Abbildung 4.3.5 ist dies der rechte Zylinder mit geringerem Durchmesser. Das Messprinzip erfolgt analog zum Längsanker-1-Spulen-Sensor, indem sich die Spuleninduktivität in Abhängigkeit der Position des Kerns innerhalb der Spule ändert. Befindet sich der Kern in der Mitte zwischen den beiden Spulen, beträgt die Differenz der Spuleninduktivitäten Null. Man spricht in diesem Fall auch von der Nullposition. Wird der Kern in Richtung einer der beiden Spulen verschoben, vergrößert sich eine der Induktivitäten gemäß Gleichung 4.3.7, während sich die andere verringert. Die Differenz der Spuleninduktivitäten ist dann ungleich Null. Abbildung 4.3.6 zeigt diesen Zusammenhang. Man erkennt, dass um den Nullpunkt herum ein annähernd linearer Bereich besteht. Um einen möglichst großen linearen Bereich der Differenz zwischen beiden Impedanzen zu erreichen, muss die Kernlänge der Spulenlänge angepasst sein. Der Kern ist normalerweise etwas kürzer als eine der beiden Spulen (Schiessle 2008, S. 132; Tränkler 2014, S. 580).

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.3.6: Induktivität in Abhängigkeit der Eintauchtiefen beim Differenzspulensensor (Schiessle 2008, S. 133).

Die Vorteile der Differenzspulenanordnung gegenüber dem Längsanker-1-Spulen-Induktivaufnehmer bringen durch die gegenseitige Kompensation eine effektivere Unterdrückung additiver Störgrößen mit sich, wie sie zum Beispiel durch Erwärmung der Spulen auftreten können (Tränkler 2014, S. 581). Bei einer Erwärmung des Sensors steigt der Widerstand im Spulendraht. Dieses führt zu einer Verringerung des Stromflusses und damit verbunden zu einer Absenkung des magnetischen Flusses in beiden Spulen. Die dadurch verringerte Induktivität in beiden Spulen entfällt somit als Störgröße, da nur die Differenz der Induktivität beider Spulen gemessen wird. Zudem führt dieses Prinzip zu einer Verdoppelung des Messbereichs und der Messempfindlichkeit (Schiessle 2008, S. 132).

Queranker-Induktivsensor

Queranker-Induktivsensoren unterscheiden sich gegenüber Längsanker-Induktivsensoren im Wesentlichen durch die Spulenanordnung. Hier werden oft U-Kerne oder E-Kerne eingesetzt, auf deren einem Schenkel sich die Spule befindet und deren offenes Magnetfeld erst mithilfe einer senkrecht („quer“) zur Spulenachse ausgerichteten, verschiebbaren Ankerkomponente geschlossen wird. Dieser Queranker ist fest mit dem zu detektierenden Objekt verbunden. Abbildung 4.3.7 verdeutlicht dies.

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.3.7: Aufbau eines Queranker-1-Spulen-Sensors (Schiessle 2008, S. 131).

Die Induktivität der Anordnung wird maßgeblich durch den Luftspalt zwischen dem Queranker und dem Kern bestimmt. Sie wird maximal, wenn der Queranker mit dem Kern in Kontakt ist. Die Magnetfeldlinien durchlaufen zweimal den Luftspalt (auf der einen Seite hin, auf der anderen zurück) und sind ansonsten weitgehend durch den Kern geführt. Damit ist die Induktivität des Queranker-Induktivsensors umgekehrt proportional zur Spaltbreite (Adam 2013, S. 28):

89.6% 10.4%

(4.3.8)

Dabei ist die Länge des Eisenkerns, dessen Querschnittsfläche und dessen relative Permeabilität. Die relative Permeabilität von Luft wird als eins angenommen. Abbildung 4.3.8 zeigt die Induktivität als Funktion der Spaltbreite. In der Praxis wird der Beitrag des weichmagnetischen Ankers aufgrund seiner großen Permeabilität oft vernachlässigt.

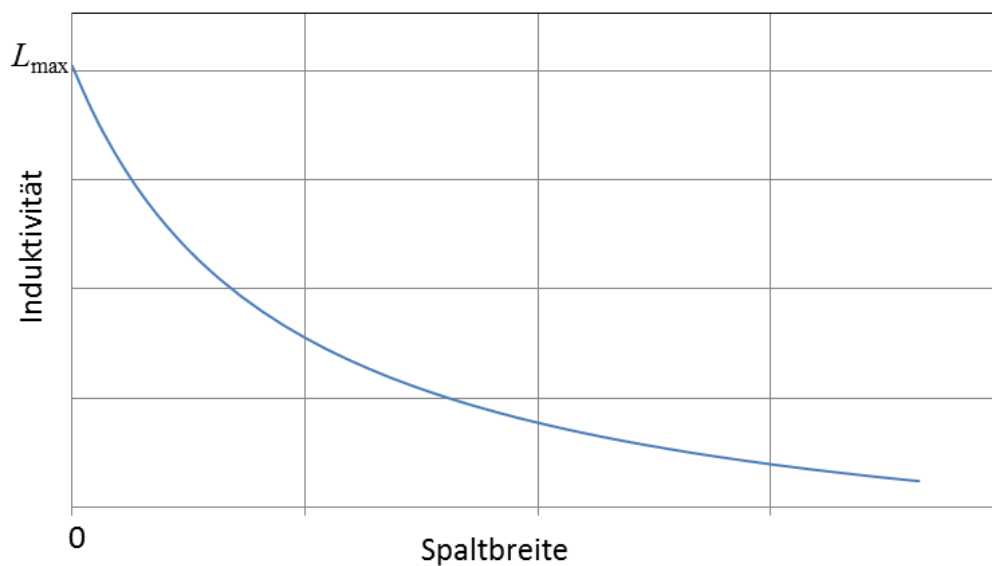


Abbildung 4.3.8: Induktivität eines Queranker-1-Spulen-Sensors als Funktion der Spaltbreite.

Diese Sensoren eignen sich nur für kurze Messabstände und arbeiten dort aber ausreichend linear. Bei größeren Abständen nehmen die Empfindlichkeit und die Linearität schnell ab (Schiessle 2008, S. 138). Queranker-Induktivsensoren existieren auch in einer Differenzspulen-Version mit erhöhtem Messbereich analog zum Längsanker-Differenzspulensensor.

Induktive Positionssensor / Näherungssensor

Das Funktionsprinzip des induktiven Positions- oder Näherungssensors entspricht dem des Queranker-Induktivsensors (siehe Abbildung 4.3.7). Auch er besitzt einen offenen Magnetkreis und die Magnetspule und das Objekt sind nicht miteinander verbunden. Der Aufbau unterscheidet sich allerdings dahingehend, dass kein Queranker existiert und das magnetische Feld der Spule direkt durch das Messobjekt geschlossen wird (Hesse & Schnell 2014, S. 34). Die Induktivität wird bei Annäherung eines Objekts durch den Effekt der Steigerung des magnetischen Flusses erhöht. Die Induktivität ist dann wieder gemäß Gleichung 4.3.8 umgekehrt proportional zur Breite des Luftspalts zwischen dem Objekt und dem Kern / der Spule. Die maximale Induktivität wird erreicht, wenn das Objekt sich in Kontakt befindet. Der Zusammenhang wird in Abbildung 4.3.8 verdeutlicht.

Wirbelstrombasierte Positionssensoren (siehe unten) verwenden einen identischen Aufbau. Hier nimmt die Induktivität bei Annäherung eines Objekts allerdings ab. Grund hierfür ist die zunehmende Schwächung des primären Magnetfelds durch den Wirbelstromeffekt (siehe oben). Welcher Effekt dominiert, hängt vom Material des zu detektierenden Objekts ab. Der Sensor muss deshalb auf das jeweilige zu detektierende Material abgestimmt werden (Schiessle 2008, S.152 ff.). Da der Sensor keine beweglichen Teile aufweist, berührungslos arbeitet und somit sehr robust ist, wird er sehr häufig in der Industrie eingesetzt (Hering 2012, S. 54).

Sensoren auf Basis des Wirbelstromeffekts

Auch Sensoren auf Basis des Wirbelstromeffekts existieren in großer Vielfalt. Es sollen hier nur die zwei am häufigsten eingesetzten Bauformen vorgestellt werden (Schiessle 2008, S. 129 ff.):

1. Längsanker-Wirbelstromsensor
2. Wirbelstrombasierter Positionssensor

Beide Varianten sind vom Aufbau her jeweils identisch mit ihrem induktiven Pendant. Der einzige Unterschied besteht in den eingesetzten Materialien. Im Fall des Längsanker-Wirbelstromsensors (a) wird ein Anker mit hoher

elektrischer Leitfähigkeit verwendet. Der wirbelstrombasierte Positionssensor (b) ist ausschließlich zur Detektion elektrisch gut leitender Objekte geeignet.

Längsanker-Wirbelstromsensor

Der Aufbau eines Längsanker-Wirbelstromsensors ist identisch mit dem eines Längsanker-Induktivsensors (Abbildung 4.3.3). Dabei ist wieder entweder die Spule oder der Kern mit dem Objekt verbunden. Allerdings werden für den Anker statt des weichmagnetischen Materials, elektrisch gut leitende Materialien in das magnetische Wechselfeld der Sensorspule eingeführt. Durch die hochfrequente Änderung der Polung des Spulen-Wechselstroms wird ein primäres magnetisches Wechselfeld erzeugt. Dies sorgt, wie in der Beschreibung des Wirbelstromeffekts erwähnt, für die Erzeugung von in sich geschlossenen Wirbelströmen im Anker (siehe Abbildung 4.3.1). Das daraus resultierende sekundäre Magnetfeld schwächt das primäre Feld und damit die Induktivität der Spule. Dadurch ergibt sich entgegen dem Prinzip des Längsanker-Induktivsensors ein Minimum an Induktivität bei einem komplett eingeschobenen Anker (vergleiche Abbildung 4.3.4). Ein Maximum tritt auf, wenn der Anker sich vollständig außerhalb befindet (Schiessle 2008, S. 149).

Wirbelstrombasierter Positionssensor / Näherungssensor

Wirbelstrombasierte Positionssensoren verwenden denselben einfachen Aufbau wie induktive Positionssensoren. Es besteht keine Verbindung zwischen Komponenten der Magnetspule und dem elektrisch gut leitenden Objekt. Das zeitlich veränderte Magnetfeld der Spule induziert in dem Objekt Wirbelströme. Abbildung 4.3.1 verdeutlicht dies. Die Wirbelströme erzeugen ein Magnetfeld, welches dem ursprünglichen Magnetfeld entgegenwirkt. Dies führt zu einer Schwächung des primären Magnetfeldes und, damit verbunden, zu einer Verringerung der Spuleninduktivität (Tränkler 2014, S. 584; Hering et al. 2014, S. 383). Im Gegensatz zu den induktiven Positionssensoren ist die Induktivität dabei umso kleiner, je näher sich das Objekt befindet.

Genau wie die induktionsbasierten Positionssensoren haben auch die wirbelstrombasierten den Vorteil, dass sie berührungslos und daher verschleißfrei arbeiten. Abstände metallischer Objekte können mit dieser Methode mit einer Auflösung im Nanometerbereich bestimmt werden. Die Erzeugung der Wirbelströme funktioniert auch durch nichtmetallische Stoffe hindurch. Somit können Messungen auch bei starker Verschmutzung durchgeführt werden. Wirbelstrombasierte Positionssensoren ermöglichen auch die Erfassung metallischer Objekte, die mit einem nichtmetallischen Material wie Kunststoff beschichtet sind, wodurch auch Schichtdicken gemessen werden können.

Signalauswertung induktiver Sensoren

Alle induktiven Sensoren zur Positionsbestimmung setzen Magnetspulen ein, die mit hochfrequentem Wechselstrom betrieben werden. Die übliche Arbeitsfrequenz liegt im Bereich zwischen 20 kHz und mehreren Megahertz (Tränkler 2014, S. 585). Dies hat den Vorteil, dass auch schnelle Zustandsänderungen, sowie sehr kurze zeitliche Intervalle gemessen werden können (Hesse & Schnell 2014, S. 34). Die Wechselspannung wird üblicherweise von einer Oszillatorschaltung erzeugt.

Eine nachgeschaltete Auswerteeinheit wandelt die hervorgerufene Impedanzänderung in ein elektrisches Schaltsignal um. Dies kann mithilfe einer Wechselstrombrücke mit Trägerfrequenz-Verstärker oder mithilfe eines Oszillators erfolgen. Im ersten Fall kann z.B. bei einem Differenzspulensensor die Aufnahme des Messsignals mithilfe einer Brückenschaltung erfolgen, bei der sich die Brückendiagonalspannung aus der Differenz der Spulendinduktivitäten ergibt. Im zweiten Fall ist die Spule Teil eines Schwingkreises und wird mit einer hochfrequenten Spannung beaufschlagt. Die Änderung der Induktivität führt dann zu einer Veränderung der Amplitude im Schwingkreis. Nähert sich zum Beispiel ein metallisches Objekt einem wirbelstrombasierten Näherungsschalter, wird dessen Magnetfeld durch die oben beschriebenen Effekte gedämpft, wodurch die Amplitude im Schwingkreis abnimmt. Wird dabei ein bestimmter Wert unterschritten, so gibt der Sensor über seine Ausgangstufe ein Signal aus (Schiessle 2008; Hesse & Schnell 2014, S.34 ff.; Hering et al. 2014, S.382 ff.).

Anwendungen

Induktiv- und Wirbelstromsensoren besitzen aufgrund ihrer einfachen Bauart und Robustheit ein breites Anwendungsspektrum in verschiedenen Branchenbereichen. Mit diesem Verfahren können Abstände, Verschiebungen, Entfernungen und Winkel erfasst werden. Es handelt sich dabei um extensive Messgrößen, bei denen der Messbereich ganz wesentlich durch die Baugröße des Sensors bestimmt wird (Bosch Autoelektrik und Autoelektronik 2010, S. 254).

Ein großer Vorteil dieser Sensoren ist die berührungsfreie Messung, die keinen Verschleiß - am Sensor oder Messobjekt - verursacht und damit den Sensor langlebiger und zuverlässiger macht. In manchen Fällen werden aus Kostengründen noch mechanische Sensoren verwendet, da diese ihre Aufgabe ausreichend gut erfüllen. Induktive Sensoren bieten jedoch eine gute Alternative und werden zukünftig verstärkt eingesetzt werden (Bosch Autoelektrik und Autoelektronik 2010, S. 285; ifm Induktive Sensoren, Schulungsunterlagen 2003, S. 85).

Tabelle 4.3.1 zeigt Anwendungsbereiche induktiver Sensoren in ausgewählten Branchen. Diese Anwendungsbeispiele werden im Folgenden detailliert beschrieben.

32.82% 67.18%

Tabelle 4.3.1: Anwendungsbereiche induktiver Sensoren in ausgewählten Branchen

Branche	Anwendungsbeispiele /-bereiche
Maschinenbau, Prozessautomatisierung	<ul style="list-style-type: none">- Detektion von metallischen Objekten- Positionserfassung bei Roboterarmen, Transportanlagen und Fertigungsstraßen- Drehzahl- und Endschalterüberwachung
Automobilindustrie, Fahrzeugtechnik, Straßenverkehr	<ul style="list-style-type: none">- Rad- und Getriebedrehzahlmessung- Detektion von Fahrzeugen vor Ampeln (Induktionsschleife)- Positionierung des Fahrzeugs in Autowaschanlage- Detektion von Materialgefügen, z.B. zur Überprüfung von Schweißnähten
Chemie & Werkstoffe	<ul style="list-style-type: none">- Positionserfassung unter extremen Bedingungen, z.B. in Bereichen mit explosionsgefährdeten Stoffen wie Getreidemühlen, Tanklagern, etc.
Lebensmittel- / Pharmazeutik	<ul style="list-style-type: none">- Einsatz in Bereichen, die sich gut reinigen lassen müssen- Einsatz in Bereichen, die hohe Hygienestandards fordern

Maschinenbau

Die Einsatzgebiete im Maschinenbau sind insbesondere in der Anlagentechnik und Prozessautomation zu finden. Hier ist es oft erforderlich die Position oder den Winkel, zum Beispiel eines Roboterarms, zu ermitteln. Da induktive und wirbelstrombasierte Näherungssensoren durch das Fehlen beweglicher Teile die Option einer vollständigen Kapselung bieten, ist auch ein Betrieb unter schwierigen Umweltbedingungen, wie zum Beispiel in staubiger Umgebung oder unter hohem Druck, zulässig. Dies ermöglicht auch den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen. Umgebungsmedien wie Wasser oder Öl beeinflussen dabei die Messung nicht, da sie keine (oder nur eine sehr geringe) elektrische Leitfähigkeit besitzen und durch ihre Permeabilität nahe eins die Induktivität nur sehr gering verfälschen (Reif 2012, S.120 f.).

In Abbildung 4.3.9 ist ein Anwendungsbeispiel der Prozessautomation dargestellt: Der induktive Näherungssensor dient zur Feststellung, ob ein Stahlprofil für den nächsten Arbeitsschritt vorhanden ist. Durch den Sensor lässt sich auch der Durchsatz an Objekten - in diesem Fall von Stahlprofilen - in einem Zeitraum überwachen.

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.3.9: Induktiver Näherungsschalter in der Prozessautomatisation.

Ein anderer häufig benötigter Einsatzfall ist die Bestimmung von Drehzahlen, wozu in einfachen Fällen eine gezahnte Scheibe und ein Induktivgeber genügen. Näheres dazu wird im nächsten Absatz beschrieben. Nach diesem Prinzip lassen sich auch Zahnräder direkt abtasten. Alternativ dazu kann ein induktiver Näherungsgeber mit einer ausreichend hohen Schaltfrequenz eingesetzt werden (Tränkle 2014, S. 728; ifm Induktive Sensoren, Schulungsunterlagen 2003, S. 85).

Automobilindustrie

Als Beispiel für den typischen Einsatz eines Induktivsensors in dieser Branche sei der Kurbelwellensensor im Verbrennungsmotor genannt, welcher die aktuelle Drehzahl des Motors ermittelt. Dazu wird mit abwechselnden Erhebungen und Aussparungen im Umfang des Schwungrads der magnetische Fluss zeitlich verändert (siehe Abbildung 4.3.10). Da hier die Schwungradscheibe in ständiger Drehbewegung ist, genügt es einen Induktivgeber (s. o.) zu verwenden, der das Magnetfeld mit einem Dauermagneten erzeugt. Durch die Drehung ergibt sich ein periodisches impulsförmiges Signal, aus dem sich die Drehzahl bestimmen lässt (Reif 2012, S.120 f.).

Unsupported image type: .wmf

Abbildung 4.3.10: Kurbelwellensensor.

Lebensmittel- und pharmazeutische Industrie

In Edelstahl gekapselte Sensoren eignen sich hervorragend zum Einsatz in der Lebensmittelindustrie, da sie zum einen eine geringe Angriffsfläche für Ablagerungen bieten, zum anderen aber auch leicht zu reinigen sind. Dabei sind sie auch gegenüber aggressiven Reinigungsmethoden, wie dem Sterilisieren mit heißem Dampf, unempfindlich. Da sich Edelstahl neutral gegenüber Lebensmitteln verhält, erfolgt kein Schadstoffeintrag durch den Sensor, und die Hygieneanforderungen können problemlos erfüllt werden (Hesse & Schnell 2014, S. 45).

Chemieindustrie

Da die induktiven Sensoren auch mit kleinen Spannungen zuverlässig arbeiten und sich von der Umgebung isolieren lassen, sind sie prädestiniert für den Einsatz in explosionsgefährdeten Umgebungen. Durch die kleine Spannung wird sichergestellt, dass bei einer Fehlfunktion die freigesetzte Energie durch einen Kurzschluss nicht ausreicht, um eine Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre herbeizuführen. Diese Bauart nennt man deshalb eigensicher. Unter normalen Betriebsbedingungen gibt es keine Funkenbildung, wie sie in elektromechanischen Schaltern bei jedem Schaltvorgang auftritt. Der Einsatz in der chemischen Industrie sowie in anderen Bereichen, die explosionsgefährdet sind (z.B. Getreidemöhlen) gehört somit zu einem Anwendungsgebiet, in dem schon sehr früh induktive Sensoren eingesetzt wurden (ifm Induktive Sensoren, Schulungsunterlagen 2003, S. 85).

Werkstoffprüfung

Sensoren auf Wirbelstrombasis können auch zur Rissfindung in Bauteilen eingesetzt werden. Da die Wirbelströme sehr schwach sind, stellt ein Riss in einem elektrisch leitfähigen Bauteil eine Barriere für diese dar. Dies hat zur Folge, dass sich die Rückwirkung auf das magnetische Sensorfeld von derjenigen unterscheidet, die durch ein rissfreies Bauteil von gleicher Geometrie erzeugt werden würde. Durch den Vergleich lassen sich also defekte Bauteile bestimmen. Das Verfahren kann auch zur Kontrolle von Schweißnähten angewendet werden. Nach diesem Prinzip können auch größere Fehlstellen wie Löcher, Lunker usw. detektiert werden, sowie die Dicke von Bauteilen oder die Position von Bohrungen bestimmt werden (Hesse & Schnell 2014, S.45 f.).

Kommerzielle Produkte

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit kommerziellen induktiven Sensoren. Da diese Sensorbauart sehr häufig eingesetzt wird und die Herstellung durch den verhältnismäßig einfachen Aufbau gut beherrscht wird, gibt es viele Anbieter auf dem Markt. Vor allem für Näherungssensoren gibt es eine große Anzahl an Varianten und Bauformen für

verschiedenste Einsatzbedingungen. Eine komplette Auflistung der Unternehmen und ihrer Produkte soll deshalb nicht erfolgen. Stattdessen werden Kategorien von induktiven Sensoren am Beispiel des Unternehmens *Balluff* vorgestellt. Die Abbildung 4.3.11 verdeutlicht die Vielfalt der Produkte und ermöglicht eine Zuordnung zu den in Kapitel 4.3.3 genannten Anwendungen.

<p>Hochdruckfeste Sensoren</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Integration in miniaturisierte hydraulische Aggregate, Ventile und Blockzylinder Erfassen zuverlässig die Endlagen des Kolbens eines Hydraulikzylinders Überwachen von Ventilpositionen Einsatz bis 500 bar, Medienbeständig, verschiedene Gewindegrößen 	<p>Ringsensoren</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Erfassung von Nägeln, Schrauben, Schweißbolzen oder ähnlichem Auswurfkontrolle Teilezählung Drahtbruchkontrolle Nagelmaschinen Zufuhrkontrolle in der Montagetechnik Staumeldung 	<p>Schlauchsensoren</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Auswurf- und Zufuhrkontrolle Teilezählung Einfache Befestigung an Zuführungsschläuchen Erkennung von schnellen Teilen Objektgeschwindigkeit max. 20 /s 
<p>Hochtemperaturfeste Sensoren</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Zuverlässige Positionserkennung auch bei hohen Temperaturen Zuverlässiges Schaltverhalten Berührungsloses und verschleißfreies Erfassen der Kolbenstellung durch die Zylinderwandung Unempfindlich gegen Verschmutzung <p>-13...+320°F -25...+160°C</p> 	<div style="text-align: center;"> <h1 style="margin: 0;">BALLUFF</h1> <p style="margin: 0;"><i>sensors worldwide</i></p> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>Kommerzielle Produkte (Beispiele)</p> </div> </div>	<p>Proxinox Sensoren</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Chemisch resistente Sensoren gegen aggressive Medien (Säure, Lauge, Dampf, Schaumreiniger) z. B. für Umgebungen mit häufigen Reinigungsvorgängen in der Lebensmittel-, Getränke- und Chemischen Industrie, Fördertechnik Gehäuse aus Edelstahl 
<p>Supershorties</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Integrierter Einbau und Positionsabfragen in kompakten Baugruppen wie Lineareinheiten, Ventilen und Aktoren möglich Miniaturisierung von Baugruppen möglich Anwendungen mit extrem schnellen Beschleunigungen Pick-and-Place 	<p>8x8 Sensoren</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Positionsüberwachung von miniaturisierten Lineareinheiten Kleinteileerkennung in Robotik und Automation Pick-and-Place-Module Bestückungsautomaten Funktionsüberwachung von Produktionsprozessen 	<p>5x5 Sensoren</p> <p>Anwendungen / Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> Positionsüberwachung von miniaturisierten Lineareinheiten Kleinteileerkennung in Robotik und Automation Pick-and-Place-Module Bestückungsautomaten 

Abbildung 4.3.11: Kommerzielle induktive Sensoren und deren Anwendungen (Balluff GmbH 2015).

Weitere Anbieter induktiver Sensoren sind z.B. FESTO, ifm, Sick, Pepperl+Fuchs und *Contrinex*.

Typische Kenndaten induktiver Sensoren sind in Tabelle 4.3.2 dargestellt und liefern einen Überblick. Die Merkmale eines Sensors lassen sich dabei in mechanische und elektrische Kenndaten unterteilen. Die Masse von induktiven Sensoren beträgt im Allgemeinen wenige Gramm und wird deshalb auf Grund seiner untergeordneten Rolle bei den üblichen Anwendungsfällen nicht weiter aufgeführt. Der Preisbereich der Sensoren variiert in Abhängigkeit von Bauart und Ausstattung und liegt zwischen 30 € und 300 €.

19.71% 9.27% 18.53% 18.53%
16.98% 16.98%

Tabelle 4.3.2: Typische Kenndaten der induktiven Sensoren aus Abbildung 4.3.11 (Balluff GmbH 2015).

Sensorart	Einheit	Schlauchsensord	Ringsensord	8x8 Sensord	Proxinox
Bezeichnung	-	BES0429	BES03JH	BES017R	BES0005
Mechanische Kennwerte					
Abmessungen	mm	17,0 / 11,9 / 106,0	35,0 / 20,0 / 60,0	8,0 / 8,0 / 40,0	D06,5
Mechanische Einbaubedingung	-	-	-	bündig	nicht bündig
Bemessungs-schaltabstand	mm	16,0	-	1,50	4,00
Durchflussgeschw.	m/s	20	60	hochfrequent	hochfrequent
Temperaturbereich	°C	-25 bis 70	-25 bis 70	-25 bis 70	-25 bis 70
Mindest-Targetgröße	-	Schraube M3x5	Kugel D = 4 mm	-	-
Elektrische Kennwerte					
Anschluss	-	Kabel, Steckverbinder	Steckverbinder M12x1-S04	Kabel, PVC	Steckverbinder M8x1-S49
Betriebsspannung	V	10 ... 30	10 ... 30	10 ... 30	10 ... 30
Bemessungs-betriebsstrom	mA	200	400	200	200
Schaltfrequenz	Hz	10	16	3000	1500

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Messprinzip induktiver Sensoren, ihre technischen Anwendung sowie exemplarische kommerzielle Produkte vorgestellt.

Das Funktionsprinzip beruht auf dem Gesetz der elektromagnetischen Induktion, wobei in den meisten Fällen mit einer Spule ein wechselndes Magnetfeld erzeugt wird. Befindet sich ein elektrisch oder magnetisch leitfähiges Objekt im Einflussbereich eines Sensors, so wirkt sich das auf die Amplitude im elektrischen Schwingkreis aus. Hieraus kann ein Rückschluss über die Lage des Objekts gezogen werden.

Dabei kommen zwei verschiedene physikalische Effekte zum Tragen: Zum einen wird die Induktivität im Schwingkreis durch die Ablenkung der magnetischen Feldlinien durch einen magnetisch leitfähigen (weichmagnetischen) Werkstoff hervorgerufen. Zum anderen erzeugt das magnetische Wechselfeld in elektrisch leitfähigen Objekten Wirbelströme, die ihrerseits ein Magnetfeld erzeugen, welches die Induktivität im Schwingkreis ändert. Welcher der beiden Effekte dominiert, hängt vom zu detektierenden Material und von der Art des Sensors, vor allem von dessen Frequenz, ab.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es für die induktiven Sensoren sowohl eine breite Produktpalette als auch ein breites Anwendungsspektrum gibt. Wichtige Produktbezeichnungen sind *Wirbelstromsensoren*, *Induktivgeber* und *induktive Näherungssensoren*. Ihren größten Anwendungsbereich finden die Sensoren vor allem in der Industrie und Prozessautomation zur Detektion der Lage oder zu Überprüfung des Vorhandenseins von metallischen Objekten. Der

Messbereich induktiver Abstands-/Verschiebungssensoren variiert je nach Bauweise und Model zwischen 0,1 mm und 100 mm.

Es werden abschließend die Vor- und Nachteile dieses Sensortyps aufgelistet:

Vorteile

- Berührungsloser Betrieb
- Kein mechanischer Verschleiß
- Nahezu unbegrenzte Lebensdauer
- Vollständige Kapselung möglich, damit unabhängig von Umwelteinflüssen
- Betrieb mit geringen Stromstärken möglich (Eigensicherheit)
- Sicheres Erkennen von schnellen Bewegungen möglich
- Vibrations- und druckbeständig
- Hohe Messgenauigkeit

Nachteile

- Nur elektrisch oder magnetisch leitfähige Objekte können erkannt werden (in der Regel sind dies in der Praxis Metalle)
- Es ist immer eine externe Stromversorgung *oder* eine Mindestgeschwindigkeit des zu detektierenden Objekts nötig (bei Induktivgebern)
- Reichweite stark begrenzt (wenige Zentimeter)
- Teurer als mechanische Schalter

Literaturverzeichnis

Adam, W., Busch, M., Nickolay, B., 2013, Sensoren für die Produktionstechnik, Springer-Verlag, Berlin

Baumann, B. 2011, *Physik für Ingenieure*, 2. Auflage, Schlembach-Verlag, Wilburgstetten

Fraden 2010, *Handbook of modern sensors*, 4. Aufl., Springer, New York.

Hart, H. 2014, Einführung in die Meßtechnik, 2. Ausgabe, Springer-Verlag, Berlin

Hering, Bressler & Gutekunst 2014, *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 6. Aufl., Springer Vieweg, Berlin.

Hesse & Schnell, Hrsg. 2014, *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*, 6. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

ifm Induktive Sensoren, *Schulungsunterlagen 2003* [Online]. <http://www.ifm.com/obj/S100d.pdf> (Zugriff 24.04.2015).

Nelles 2003, *Magnetische Felder*, VDE-Verl., Berlin.

Reif, Hrsg. 2010, *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*, 6. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

Reif, Hrsg. 2012, *Sensoren im Kraftfahrzeug*, 2. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden.

Schiessle 2008, *Industriesensorik*, 1. Aufl., Vogel Industrie Medien, Würzburg.

Stiny, Hrsg. 2011, *Grundwissen Elektrotechnik*, 61. Aufl., Franzis, München.

Tränkler 2014, *Sensortechnik*, 2. Aufl., Springer Vieweg, Heidelberg.