

Was Sie schon immer über Hallensoren wissen wollten

Kleiner Effekt – Große Wirkung

Nach einer sehr ausführlichen Einführung in die Prinzipien und Problematiken der Hallensensorik erläutert *elektronik industrie* in diesem Beitrag, was Entwickler beim Einsatz von Hallensensoren beachten müssen. Eine monolithisch integrierte 360°-Winkelsensor-Familie dient dabei als Beispiel.

Vor über 125 Jahren entdeckte Edwin Herbert Hall im Jahre 1879, dass sich längs eines stromdurchflossenen Leiters bei Vorhandensein eines senkrecht darauf wirkenden Magnetfelds eine Spannung aufbaut (Bild 1). Diese später nach ihm benannte Hallspannung ist proportional zum durchflossenen Strom sowie zur Flussdichte des magnetischen Feldes, das senkrecht auf den Leiter wirkt, und umgekehrt proportional zur Dicke des Leiters:

$$U_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot e \cdot d} = R_H \frac{I \cdot B}{d} \quad [1]$$

Dabei bedeuten:

U_H = Hallspannung

I = Strom durch den Leiter

B = magnetische Flussdichte

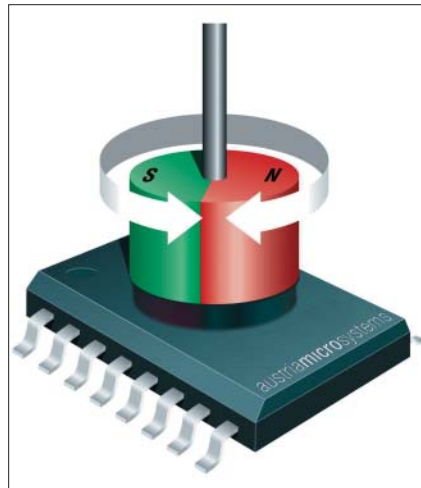
n = Ladungsträgerdichte

e = Elektronenladung

d = Dicke des Leiters

R_H = Hall-Konstante $= 1/(n \cdot e)$

Aus [1] erkennt man, dass die Hallspannung U_H umso größer ist, je geringer die Ladungsträgerdichte n ist. Da Halbleiter eine weit geringere Ladungsträgerdichte aufweisen als Metalle, sind sie sehr gut als Basismaterial für Hallelemente geeignet. Auch die idealerweise geringe Dicke des Hallelements spricht für eine Fertigung auf Halbleiterbasis. Tatsächlich kann man Hallelemente sehr gut mit anderen Komponenten wie der erforderlichen Stromquelle, Verstärkern, A/D-Wandlern oder Signalprozessoren auf einem gemeinsamen Chip integrieren. Formel [1] zeigt aber auch, dass die Hallspannung U_H proportional zur magnetischen Flussdichte B ist. Die Flussdichte eines Magneten wie-



Die AS-5000-Serie von austriamicrosystems deckt in vollem Umfang einen Drehwinkel von 360° ab – und zwar mit programmierbarem Nullpunkt.

Grafik: austriamicrosystems/Ineltek

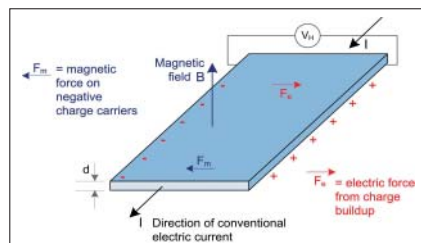


Bild 1: Prinzip des Hall-Effekts

Grafik: austriamicrosystems/Ineltek

derum nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.

Einfache Hallelemente werden als magnetfeldabhängige Schalter eingesetzt. Beispiele hierfür sind prellfreie Schalter oder Impulsgeber bei Zahnrädern, wobei die Anzahl der Impulse pro Umdrehung der Anzahl der Zähne des Zahnrads entspricht. Ihrem Messprinzip entsprechend sind einfache Hallensensoren auch empfindlich gegen unerwünschte externe magnetische Störfelder, da sie zunächst nicht zwischen dem Magnetfeld des Gebermagneten und dem eines Störfelds unterscheiden können.

Ein Unterscheidungsmerkmal gibt es allerdings: Hallelemente sind nur auf die Komponente des Magnetfelds senkrecht zu ihrer Fläche empfindlich (Bild 1). Zur Entkopplung von magnetischen Störfeldern ist daher eine entsprechende Schirmung mit ferromagnetischem Material wie z. B. Eisenblech erforderlich.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Temperatur des Magnets, denn die Stärke des Magnets ist je nach verwendetem Material sehr temperaturabhängig. So haben beispielsweise Ferrite einen typischen Temperaturkoeffizienten von $-0,2\%/K$. Somit nimmt bei einem Temperaturanstieg um $100\text{ }^\circ\text{C}$ die Stärke des Magnetfelds um 20% ab! NdFeB-Magnete (Neodym/Eisen/Bor) weisen einen um etwa Faktor 2 besseren Temperaturkoeffizienten auf und SmCo-Magnete (Samarium-Kobalt) sind noch deutlich besser (typischerweise $-0,035\%/K$), aber auch relativ teuer.

Hallensensoren zur Winkelmessung

Plaziert man ein Hallelement längs eines diametral magnetisierten Magnets, so erzeugt der rotierende Magnet eine sinusförmige Ausgangsspannung (Bild 2). Dieser einfache Aufbau ist nur bedingt für Winkelmessungen einsetzbar, da im Bereich $> 90^\circ$ in beiden Richtungen keine Eindeutigkeit des Signals mehr gewährleistet ist. In praktischen Anwendungen ist nur der quasi-lineare Bereich bis ca. $\pm 45^\circ$ nutzbar. Zudem ist dieser Aufbau sehr empfindlich in Bezug auf die vertikale bzw. horizontale Lage des Magnets. Auch der eingangs erwähnten Abhängigkeit gegenüber Temperaturschwankungen des Magnets sowie von externen magnetischen Störfeldern muss Rechnung getragen werden.

Winkelmessungen bis 360°

Für genaue Winkelmessungen über eine volle Umdrehung sind daher weitere Maß-

AUTOR

Josef Janisch ist Product Manager bei Austriamicrosystems



all-electronics.de
ENTWICKLUNG. FERTIGUNG. AUTOMATISIERUNG



Entdecken Sie weitere interessante Artikel und News zum Thema auf [all-electronics.de](https://www.all-electronics.de)!

Hier klicken & informieren!



nahmen erforderlich. Austriamicrosystems bietet mit der Serie AS5000 eine Familie von integrierten Lösungen für präzise 360°-Winkelsensoren an. Das patentierte Prinzip lässt sich vereinfacht folgendermaßen erklären: Verwendet man anstelle eines Hallelements vier Hallelemente und platziert sie gleichmäßig verteilt unterhalb eines diametral magnetisierten Magneten (Bild 3), so erhält man über eine volle Umdrehung des Magneten vier sinusförmige Signale, die genau 90° zueinander phasenverschoben sind:

$$\begin{aligned}
 H1 &= \hat{a} \cdot \sin \alpha \\
 H2 &= \hat{a} \cdot \sin(\alpha + 90^\circ) = \hat{a} \cdot \cos \alpha \\
 H3 &= \hat{a} \cdot \sin(\alpha + 180^\circ) = \hat{a} \cdot -\sin \alpha \\
 H4 &= \hat{a} \cdot \sin(\alpha + 270^\circ) = \hat{a} \cdot -\cos \alpha
 \end{aligned}$$

Dabei bezeichnet \hat{a} den Amplituden-Scheitelwert (peak) und α den Winkel des Magneten. Durch Differenzverstärkung zweier jeweils gegenüberliegender Signale, also

$$\begin{aligned}
 &\hat{a} \cdot \sin \alpha - [-\hat{a} \cdot \sin \alpha] \text{ und} \\
 &\hat{a} \cdot \cos \alpha - [-\hat{a} \cdot \cos \alpha]
 \end{aligned}$$

ergeben sich die beiden Signale

$$\begin{aligned}
 &2 \cdot \hat{a} \cdot \sin \alpha \text{ und} \\
 &2 \cdot \hat{a} \cdot \cos \alpha.
 \end{aligned}$$

Diese beiden Analogsignale werden mit Hilfe eines A/D-Wandlers quantisiert und digital weiterverarbeitet. Ein CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) transformiert Sinus- und Cosinus-Information in Winkel- und Amplitudeninformation. Dabei kommen folgende Zusammenhänge zur Anwendung: zur Anwendung:

$$\frac{2 \cdot \hat{a} \cdot \sin(\alpha)}{2 \cdot \hat{a} \cdot \cos(\alpha)} = \tan(\alpha) \quad [2]$$

$$A \hat{=} \arctan\left(\frac{2 \cdot \hat{a} \cdot \sin(\alpha)}{2 \cdot \hat{a} \cdot \cos(\alpha)}\right) \quad [3]$$

Hier steht „A“ für den gemessenen Winkel, „ α “ für den Winkel des Magneten und „ \hat{a} “ für den Scheitelwert der Amplitude. Dividiert man $2 \cdot \hat{a} \cdot \sin \alpha$ durch $2 \cdot \hat{a} \cdot \cos \alpha$, so kürzt sich der Term $2 \cdot \hat{a}$ weg und es bleibt $\sin \alpha / \cos \alpha = \tan \alpha$. Bildet man die Arcustangensfunktion von [2], so erhält man einen Wert, der linear mit α ansteigt. Bei einem Winkel von 90° ist $\cos \alpha = 0$ und

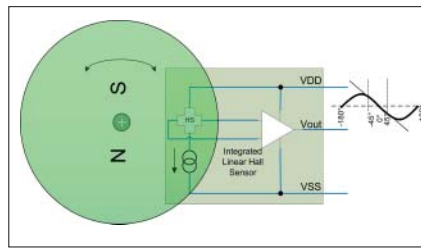


Bild 2: Einfacher Winkelsensor mit einem Hallelement
Grafik: austriamicrosystems/Ineltek

tan $\alpha = \infty$. Die Arcustangensfunktion hat hier eine Unstetigkeitsstelle und beginnt mit steigendem Winkel wieder bei -90° (Bild 4). Dasselbe wiederholt sich bei einem Winkel von 270°. Man muss also in Abhängigkeit der Vorzeichen von $\sin \alpha$ und $\cos \alpha$ einen Offset von 180 in Quadrant QII und QIII bzw. 360 in Quadrant QIV addieren, damit man einen mit dem Drehwinkel des Magneten linear ansteigenden Wert von 0 ... 360 erhält. Mit entsprechender Auflösung und Abtastrate der A/D-Wandler sowie ausreichender Rechengenauigkeit des CORDIC erlaubt diese Methode die Realisierung von hochauflösenden und zugleich sehr schnellen absoluten Winkelmessern über den vollen Winkelbereich von 360°.

Die absolute Winkelinformation kann dann noch in verschiedene Ausgangsformate umgesetzt werden. Austriamicrosystems bietet mit der Winkelencoder-Serie AS5000 Varianten von 8 bis 12 bit Auflösung, mit seriellem Interface, PWM-, Analog- oder Inkremental-Schnittstelle sowie Kombinationen davon an.

Genauigkeit eines Encodersystems

Bei der Betrachtung von Winkelencodern sind zwei Parameter zu unterscheiden, die nicht notwendigerweise in Bezug zueinander stehen und auch gerne verwechselt werden: Auflösung (Resolution) auf der einen und Genauigkeit (Accuracy) auf der anderen Seite. Auflösung ist die kleinste Schrittweite bzw. die Anzahl von gleichförmig stetigen Schritten pro Umdrehung, die der Encoder liefert; ein 12-bit-Encoder hat somit eine Auflösung von $2^{12} = 4096$ Schritten pro Umdrehung oder $0,08789^\circ$ pro Schritt. Die Größe der Auflösung wird im Wesentlichen von der Auflösung des ADCs und von der Rechentiefe des CORDICs bestimmt. ▶

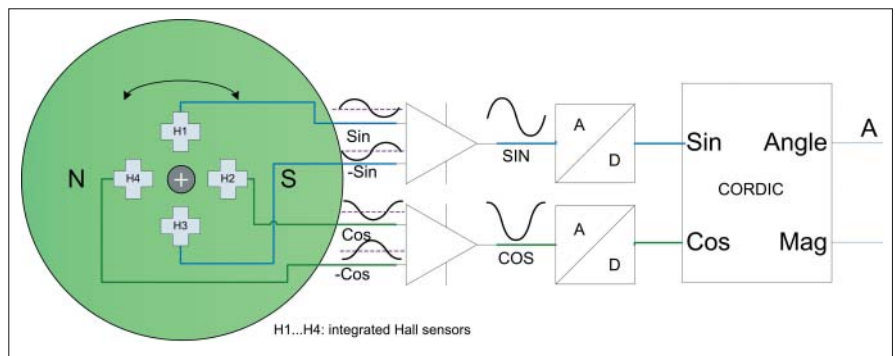


Bild 3: Funktionsprinzip der AS5000-Serie

Grafik: austriamicrosystems/Ineltek

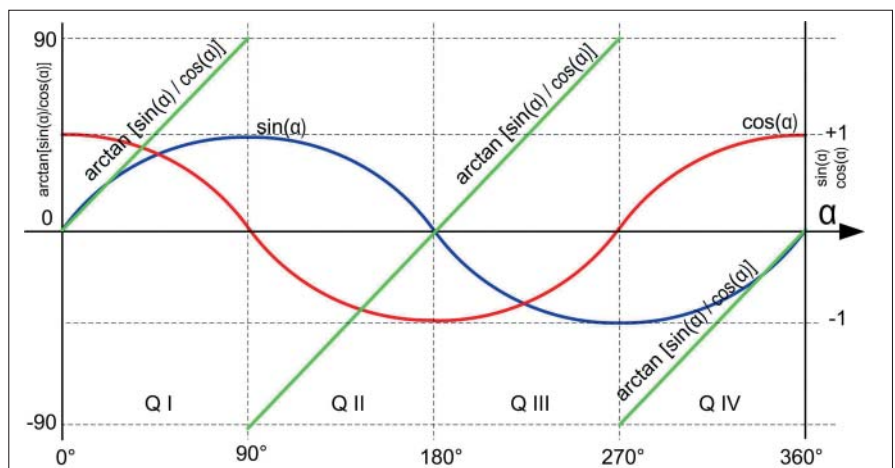


Bild 4: Eingangs- und Ausgangsfunktionen des CORDIC

Grafik: austriamicrosystems/Ineltek

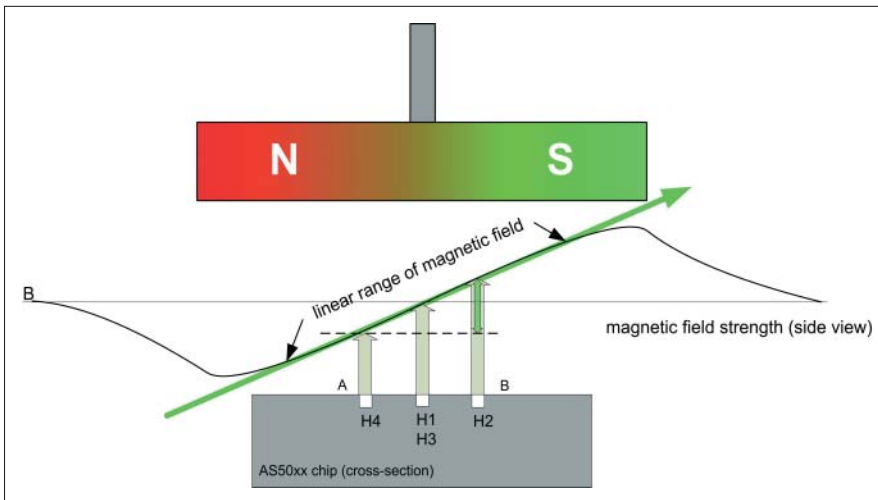


Bild 5: Vertikale Feldverteilung eines Magneten

Grafik: austriamicrosystems/Ineltek

Genauigkeit ist die Abweichung des angezeigten Winkelwerts vom tatsächlichen Winkel. Auf die Genauigkeit eines Encoders wirken viele Einflüsse, die in Summe letztlich die Qualität des Encoders bestimmen. Die wesentlichsten Einflussfaktoren sind:

Phasenfehler der Hall-Signale

Zunächst scheint dieser Parameter keinen großen Einfluss zu haben, zumal ja die Hallelemente genau rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Kommt es aber zu unterschiedlichen Signallaufzeiten im Sinus- und Cosinuspfad, kann sich dieser Fehler besonders bei schnell drehenden Magneten gravierend auswirken – und zwar umso mehr, wenn die Hall-Signale nicht gleichzeitig zur Verfügung stehen, wenn also nur ein ADC verwendet wird, der die Hallelemente nacheinander abtastet. Die Encoder der AS5000-Serie verwenden daher eine parallele Signalverarbeitung (Bild 3) wodurch der Phasenfehler selbst bei hohen Umdrehungen vernachlässigbar gering bleibt.

Abgleichfehler der Hallsensoren und Verstärker

Abgleichfehler, auch Matching- oder Offsetfehler genannt, lassen sich zwar relativ gut durch nachträgliche Trimmung korrigieren, aber eine ideale Trimmung ist – speziell über den vollen Temperaturbereich – mit viel Aufwand verbunden. Die primäre Aufgabe liegt darin, diese Fehler von vornherein so gering wie möglich zu halten. Es ist also zum einen eine hohe Anforderung an De-

sign der Analogkomponenten, sowie zum anderen eine fertigungstechnische Herausforderung an die Stabilität des Halbleiter-Prozesses.

Offsetfehler im Signalpfad

Bei Offsetfehlern ist dem Sinus- bzw. Cosinus-Signal eine Gleichspannung überlagert. Offsetfehler entstehen vor allem im Hallelement selbst und durch schlechte Transistor-Anpassung der Komponenten im analogen Signalpfad. Diese Fehler können durch geeignete Design-Maßnahmen, wie Spinning-Current-Kompensation im Hallelement, Chopper-Verstärker, Chip-Trimmung etc. gering gehalten werden. Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Fehlereinflüsse ändert sich [3] in:

$$A \cong \arctan\left(\frac{\text{Offs}_{\sin} + 2 \cdot \hat{a}_{\sin} \cdot \sin(\alpha + \varphi)}{\text{Offs}_{\cos} + 2 \cdot \hat{a}_{\cos} \cdot \cos(\alpha)}\right) \quad [4]$$

Dabei sind:

A = gemessener Winkel

α = Winkel des Magneten

\hat{a}_{\sin} = Scheitelwert der Sinusamplitude

\hat{a}_{\cos} = Scheitelwert der Cosinusamplitude

φ = Phasenfehler zwischen Sin- und Cos-Signal

Offs_{\sin} = Offsetfehler, Sinusamplitude

Offs_{\cos} = Offsetfehler, Cosinusamplitude

Nichtlinearität des ADCs

Die Nichtlinearität eines ADCs lässt sich, abgesehen von einer aufwändigen Kalibrierung, kaum kompensieren, weshalb an diese Komponente entsprechend hohe De-

sign- und Performance-Anforderungen gestellt werden.

Nichtlinearität des Magneten

Bild 5 zeigt den Aufbau von Sensor + Magneten aus Bild 3 in einer Seitenansicht. Trägt man in dieser Achse den Verlauf der vertikalen Feldkomponente (für die der Sensor empfindlich ist) ein, so zeigen sich Maxima an den jeweiligen Polen. Der Bereich dazwischen verläuft größtenteils linear. Solange sich alle Hallelemente innerhalb dieses linearen Bereichs befinden, sind die Differenzsignale

$$\hat{a} \cdot \sin \alpha - [-\hat{a} \cdot \sin(\alpha)] \text{ und} \\ \hat{a} \cdot \cos \alpha - [-\hat{a} \cdot \cos(\cdot)]$$

immer gleich groß – und zwar unabhängig von der horizontalen Position des Magneten. Folgerichtig erlauben Magnete mit größerem Durchmesser eine größere horizontale Verschiebung als kleinere. Gleichzeitig nimmt aber durch die flachere Kurve des Feldlinienverlaufs die Amplitude des Differenzsignals ab, was wiederum höhere Verstärkung und somit einen schlechteren Signal-Rauschabstand bewirkt.

Als guter Kompromiss haben sich Magnete von ca. 6 mm Durchmesser erwiesen. Bild 6 zeigt eine typische (unkalibrierte) Fehlerkurve eines Magneten mit 6 mm Durchmesser bei einem Abstand von 0,5 mm zwischen Magnet und IC (gemessen am AS5040 10-bit-Encoder). Auf den horizontalen Achsen ist die laterale Verschiebung des Magneten in X- und Y-Richtung (jeweils ± 1 mm) aufgetragen, auf der vertikalen Achse der maximale Fehler (worst case) über eine volle Umdrehung an der jeweiligen Position. Man sieht, dass der maximale Fehler selbst bei nicht exakt zentriertem Magneten noch deutlich unter 1° liegt. Bei zentriertem Magneten liegt der maximale Fehler unter $0,5^\circ$.

AS5000-Serie: 360°-Fähigkeit mit programmierbarem Nullpunkt

Das verwendete Messprinzip erlaubt eine Winkelmessung über eine volle Umdrehung ohne Einschränkungen des Winkelbereichs. Eine aufwändige Justage des magnetischen Nullpunkts zum mechanischen Nullpunkt ist nicht notwendig, da der Chip per OTP-Programmierung an jedem

beliebigen Winkel permanent auf Null gesetzt werden kann.

Unempfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen

Durch die integrierte Hall-Technologie von austriamicrosystems ist die AS5000-Serie äußerst robust gegen Wasser, Öl, Schmutz, Staub, ja selbst gegen unerwünschte externe magnetische Störfelder.

Single-Chip Lösung

Die Integration von Hallelementen und Signalverarbeitung auf einem Chip erlaubt sehr enge Fertigungstoleranzen und somit eine hohe Präzision des Gesamtsystems. Da lange Leitungen zwischen Sensor und Auswertelektronik wegfallen, wird auch ein sehr gutes Signal-Rauschverhalten bei gleichzeitig kleiner Bauform erreicht.

Unempfindlichkeit gegenüber schlechter horizontaler Ausrichtung des Magneten

Durch die Platzierung der Hallelemente im linearen Bereich eines Magneten und differentielle Messung der Hallspannungen ergibt sich eine große Toleranz gegenüber der lateralen Verschiebung des Magneten (siehe Bild 6).

Unempfindlichkeit gegenüber Abstandsschwankungen des Magnets

Mathematisch betrachtet kürzt sich durch die Division von Sinus- und Cosinussignal [2] der Einfluss der Amplitude und somit der Einfluss des Abstands zwischen Magnet und IC heraus. In der Praxis sind Abstände von 0 bis 3 mm (empfohlen: 0,5 bis 1,8 mm für einen NdFeB-Referenzmagneten) ohne signifikante Einbußen an Genauigkeit erreichbar. Geringere Abstände erlauben einen größeren Bereich für horizontale Verschiebung.

Unempfindlichkeit gegenüber Temperatur- oder Altersschwankungen des Magneten

Temperaturänderungen oder Alterung des Magneten bewirken eine Änderung der Magnetfeldstärke und haben somit denselben Effekt wie eine Änderung des vertikalen Abstands. Dieser wird wie oben beschrieben automatisch kompensiert. Die AS5000-Serie ist für -40 °C bis +125 °C Umgebungstemperatur spezifiziert.

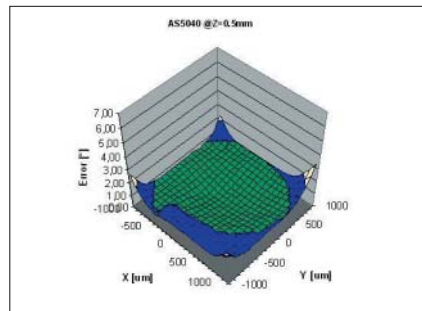


Bild 6: typische Fehlerkurve eines 6-mm-Magneten
Grafik: austriamicrosystems/Ineltek

Unempfindlichkeit gegenüber externen magnetischen Störfeldern

Obwohl es sich um ein magnetisches Messsystem handelt, ist die AS5000-Serie weitgehend unempfindlich gegen externe magnetische Störfelder. Dies wird durch mehrere Maßnahmen bewirkt: Zum einen sind die Hallelemente nur auf die vertikale Feldkomponente empfindlich. Sie sind also „blind“ gegen Felder die in der horizontalen Ebene einwirken. Zum anderen wirken externe magnetische Störfelder relativ gleichförmig auf alle Hallelemente. Durch eine gute Gleichtakt-Unterdrückung der Verstärker und die differentielle Messmethode werden die Wirkungen des externen magnetischen Störfeldes weitgehend unterdrückt.

Unzerstörbarkeit durch starke Magnetfelder

Die AS5000-Familie verwendet keine ferromagnetischen Materialien, wie z. B. Feldkonzentratoren. Selbst starke magnetische Felder können keine Vormagnetisierung oder irreversible Funktionsstörungen des Chips bewirken.

Kalibrierung nicht nötig

Das Design der AS5000-Familie ist auf hohe Genauigkeit des Gesamtsystems auch ohne umständliche Kalibrierung ausgelegt. Dies wird durch parallele Signalverarbeitung, gute Anpassung, aktive Offsetkompensation etc. erreicht. Selbst ohne Kalibrierung wird eine Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ bei zentriertem Magneten garantiert. Durch externe Kalibrierung ist noch eine dementsprechend höhere Genauigkeit erreichbar.

Hohe Rotationsgeschwindigkeit

Parallele Signalverarbeitung und ein Interpolator für die inkrementelle Schnittstel-

le (beim AS5040) garantieren Drehzahlen bis zu 10000 U/min und mehr ohne fehlerhafte Pulsfolge.

Zuverlässiger Herstellungsprozess

Die AS5000-Serie wird in der hauseigenen Waferfab von austriamicrosystems in einem Standard-CMOS-Prozess gefertigt. Zusätzliche produktspezifische Prozessschritte fallen für diese Produkte nicht an, wodurch die Sensor-Chips zusammen mit vielen anderen Produkten in hohem Durchsatz bei gleichzeitig hoher Prozessstabilität und -kontinuität gefertigt werden können.

Automotive-tauglich

Auch nach AEC-Q100 voll automotive-qualifizierte Varianten sind erhältlich – etwa der AS5040, der in vielen verschiedenen Fahrzeugbereichen vom Innenraum über Lenkwinkelsensoren bis zu Getriebesensoren eingesetzt werden kann. Die bekannten hohen Qualitätsstandards bei austriamicrosystems (Stichwort „zero defect strategy“) garantieren hohe Zuverlässigkeit.

Fazit: Die AS5000-Serie bietet für jede Anwendung das geeignete Produkt, von low-cost-8-bit-Applikationen über schnelle 10-bit-Inkremental- bis hin zu präzisen, rauscharmen 12-bit-Encoder-Anwendungen. Die hohe Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen und das kontaktlose Messprinzip machen sie ideal für Anwendungen, wo elektromechanische, induktive, optische oder andere Meßmethoden entweder zu anfällig oder zu teuer sind. Die kleinen Abmessungen und die geringe Anzahl von externen Bauteilen (üblicherweise nur zwei Stützkondensatoren für die Versorgungsspannung) erlauben es, präzise Encoder auf kleinstem Raum herzustellen. Die Encoderfamilie wird auch in Zukunft weiter wachsen. Neben anderen Produkten für den Automotive- und Industriebereich soll noch heuer eine Variante mit bis zu +150 °C Umgebungstemperatur auf den Markt kommen. (av)

Kontakt

- ▶ www.ineltek.com
- ▶ www.austriamicrosystems.com
- ▶ http://www.austriamicrosystems.com/o3products/20_rotary_encoders.htm