

**Neue magnetoresistive
Winkelsensoren
für erweiterte Einsatzbedingungen**

Uwe Loreit
Institut für Mikrostrukturtechnologie
und Optoelektronik
Wetzlar

Im Amtmann 6, 35578 Wetzlar
Tel. 06441 9788 18
Fax. 06441 9788 17

1. Grundlagen des anisotropen magnetoresistiven Effektes

Als magnetoresistiven Effekt bezeichnet man die Abhängigkeit des Widerstandes ferromagnetischer Materialien vom Winkel zwischen der Magnetisierung, welche sich durch äußere Magnetfelder beeinflussen lässt und der Stromrichtung. Da es ein reiner Winkelleffekt ist lässt er sich besonders gut für den Aufbau von Winkelsensoren nutzen.

Ein mechanisches Modell zur Beschreibung des Verhalten der Magnetisierung einer anisotropen Schicht ist in Bild 1 zu sehen. Ein äußeres Magnetfeld H dreht die Magnetisierung M um den Winkel β aus der Richtung der Anisotropieachse A . Die Rückstellkraft ist die Anisotropiefeldstärke H_0 welche durch eine Feder deren Befestigungspunkt an A frei beweglich ist. Dieses Modell gibt das magnetische Verhalten exakt wieder. In Bild 2 hat das äußere Feld die gleich Richtung wie die Anisotropieachse A . In diesem Fall stimmen die Winkel von H und M überein. Das gilt auch für den Fall, daß Magnetfeld H senkrecht dazu steht und größer ist als die Anisotropiefeldstärke H_0 , welcher in Bild 3 zu sehen ist. Für alle anderen Magnetfeldwinkel gibt es einen Winkelfehler dessen Größe sowohl von der Magnetfeldstärke als auch deren Winkel abhängt.

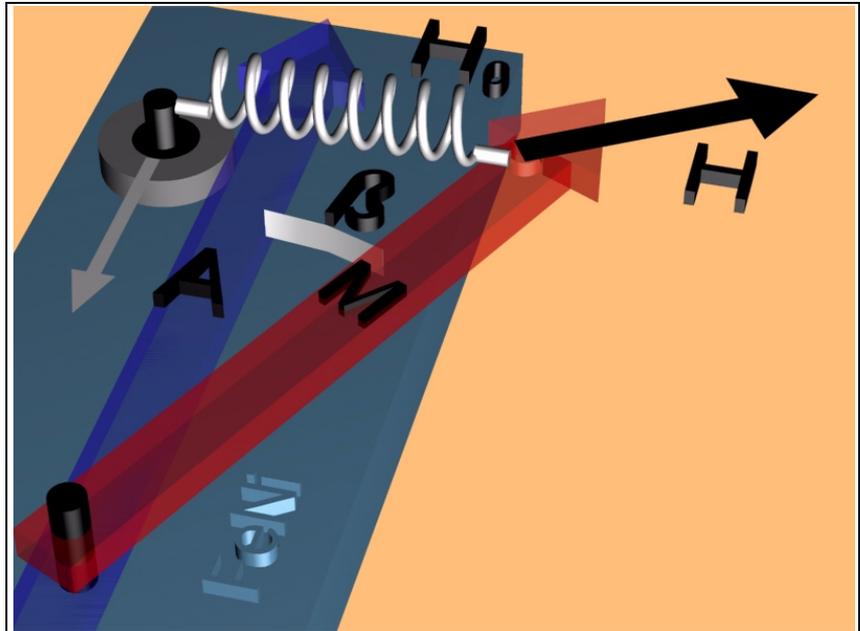


Bild 1

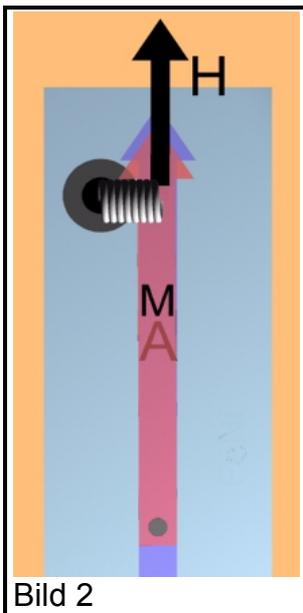


Bild 2

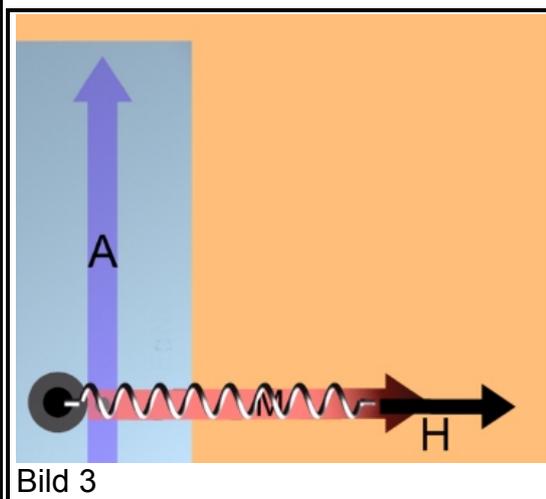


Bild 3

Das äußere Feld die gleich Richtung wie die Anisotropieachse A . In diesem Fall stimmen die Winkel von H und M überein. Das gilt auch für den Fall, daß Magnetfeld H senkrecht dazu steht und größer ist als die Anisotropiefeldstärke H_0 , welcher in Bild 3 zu sehen ist. Für alle anderen Ma-

gnetfeldwinkel gibt es einen Winkelfehler dessen Größe sowohl von der Magnetfeldstärke als auch deren Winkel abhängt.

Bild 4 zeigt den Verlauf des Winkelfehlers als Funktion des Magnetfeldwinkels für verschiedene Anisotropiefeldstärken. Allgemein gilt folgender Zusammenhang zwischen dem Winkel der Magnetisierung β und den Komponenten des Magnetfeldes (H_x in Richtung

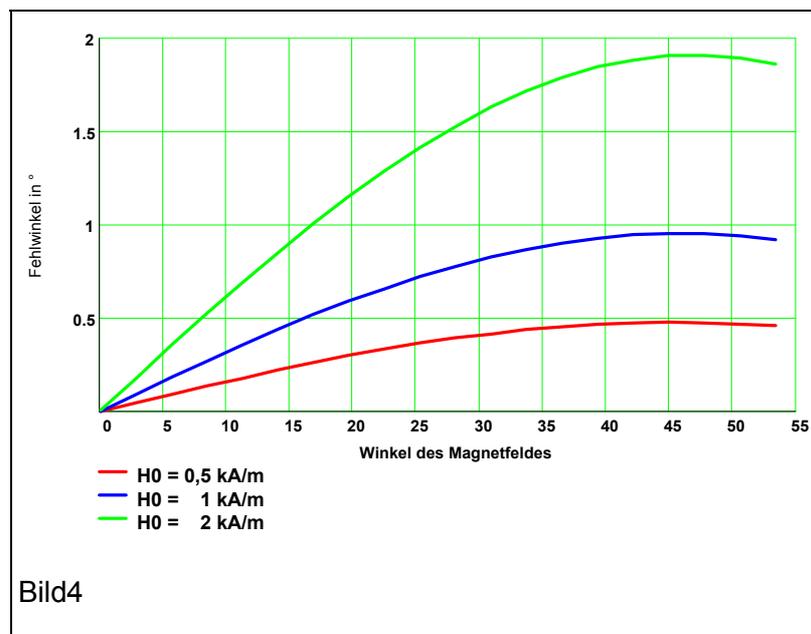


Bild 4

von A und H_y senkrecht dazu)

$$\frac{H_x}{H_0} * \tan(\beta) + \sin(\beta) - \frac{H_y}{H_0} = 0$$

In Bild 5 ist der Betrag des maximalen Fehlerwinkels als Funktion des Magnetfeldes bei verschiedenen Anisotropiefeldstärken dargestellt. Wie aus dieser Darstellung zu erkennen ist, muß man bei der Konstruktion von Sensoren für den Einsatz bei geringen Magnetfeldstärken ein möglichst kleines H_0 erreichen.

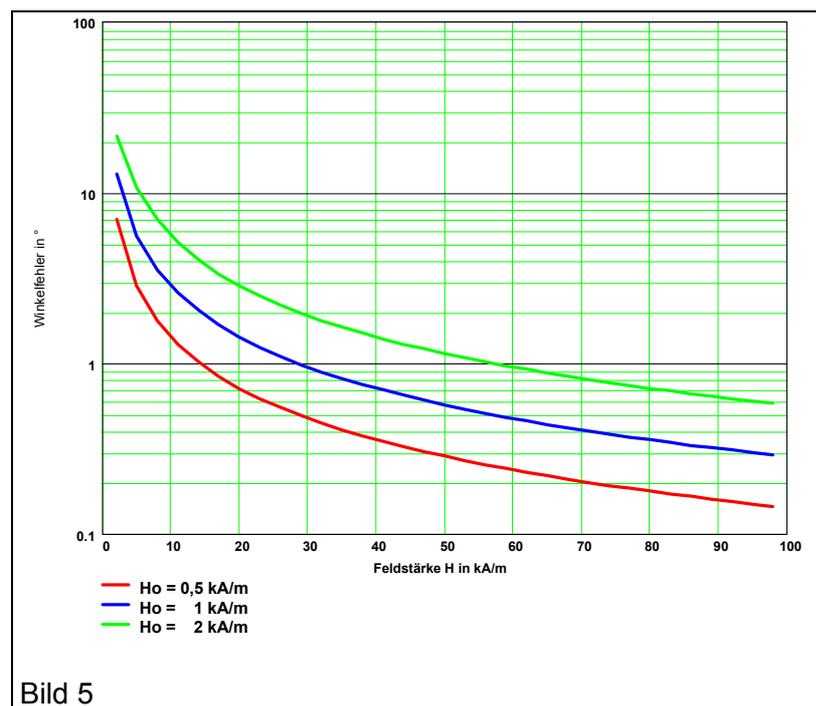


Bild 5

feldstärken ein möglichst kleines H_0 erreichen.

Diese Anisotropiefeldstärke setzt sich aus einer vom Material und einer von der Geometrie abhängigen Komponente zusammen. Bei der für magnetoresistive Sensoren üblichen Legierung NiFe 81/19 erreicht man für die Materialanisotropie Werte von $<150 \text{ A/m}$ für die geometrieabhängige sogenannte Formanisotropie erhält man bei langen, schmalen Streifen Werte bis zu $>5000 \text{ A/m}$. Dieses zeigt, daß eigentlich

nur die Sensorgeometrie die erreichbare Sensorempfindlichkeit bestimmt. Die kleinste Formanisotropie ist mit kreisförmigen Strukturen erreichbar.

Um mit der Drehung einer Magnetisierung einen Sensor zu erhalten ist noch deren elektrische Wirkung wichtig. In den anisotropen magneto-resistiven Materialien gilt für den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und dem Winkel zwischen Stromrichtung und Magnetisierung α

$$R(\alpha) = R_{const} + \Delta R * \cos(2 * \alpha)$$

Da die elektrische Wirkung hierbei vom doppelten Winkel abhängt ist der magneto-resistive Effekt nur auf 180° eindeutig. Für eine gegenläufige Widerstandsänderung, wie sie in Brückenschaltungen notwendig ist, ist ein Winkeloffset von 90° notwendig.

2. Neues Winkelsensorkonzept

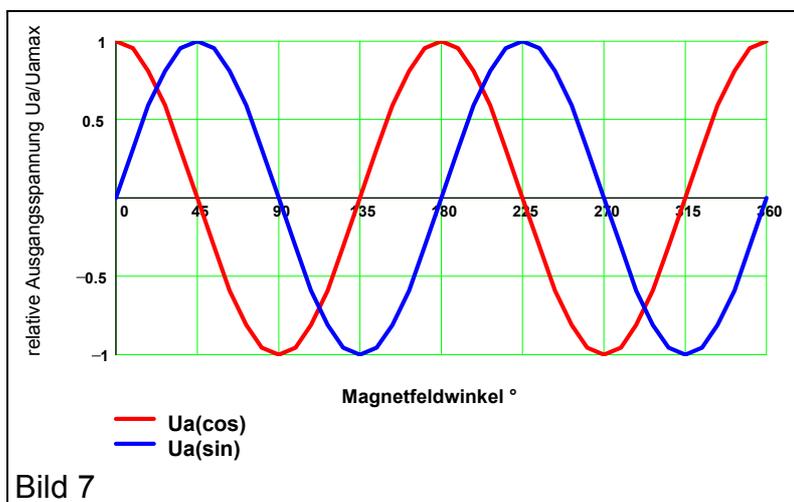
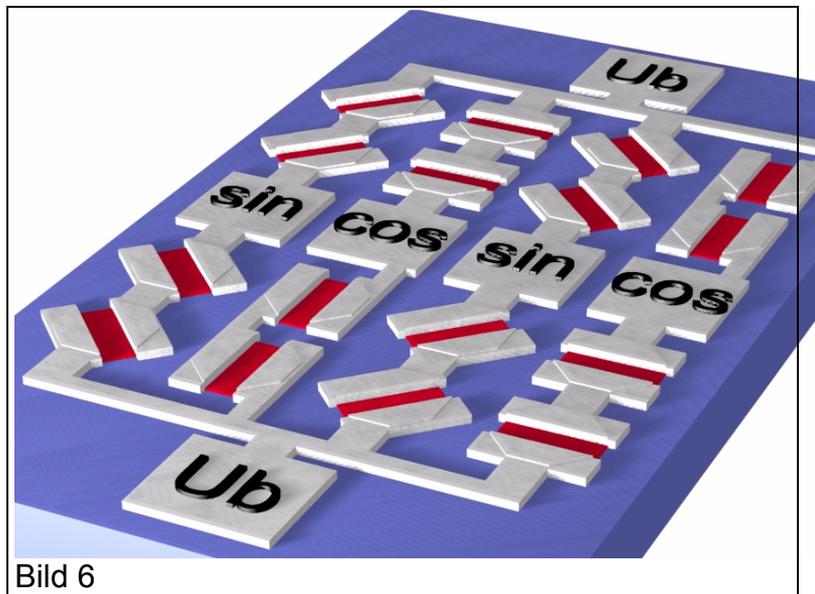
In Bild 6 ist die Anordnung eines solchen Sensors dargestellt. Dieser Sensor enthält zwei Wheatstonebrücken, welche gegeneinander um 45° gedreht sind.

In Bild 7 sind die Ausgangssignale diese Sensors in einem Magnetfeld $\gg H_0$ als Funktion des Winkel dargestellt. Aus diesem Bild ist sofort ersichtlich warum die beiden Ausgangssignale SIN bzw. COS genannt werden.

Mit einem solchen Sensor ist eine Winkelmessung nur über 180° eindeutig.

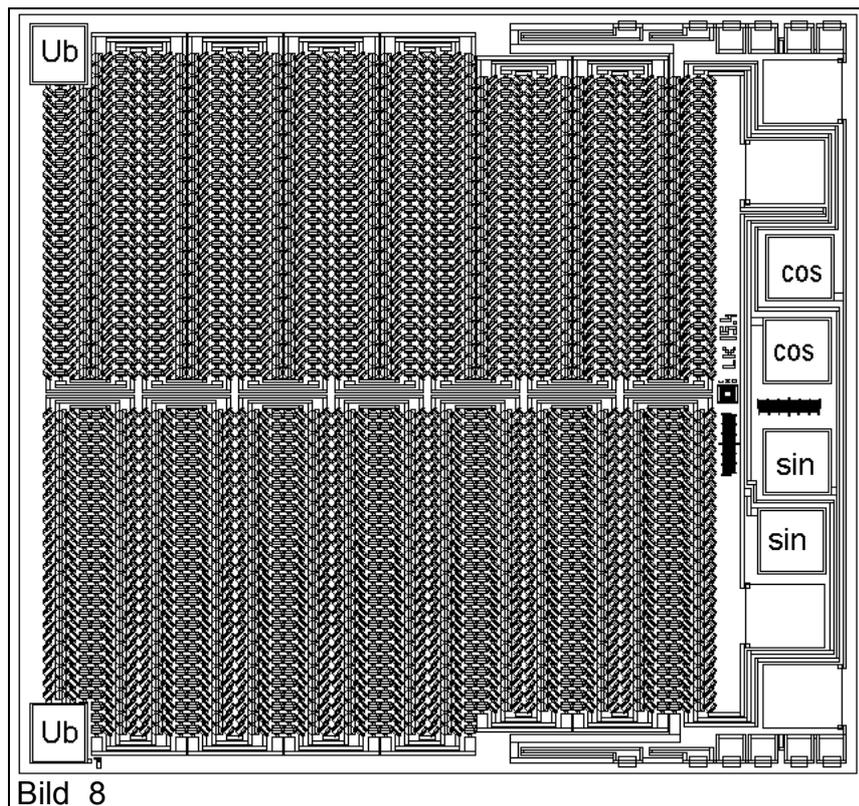
3. Der Winkelsensor

LK 15



Das Layout eines im IMO nach diesem Prinzip realisierten Sensors mit der Bezeichnung LK 15 ist im Bild 8 dargestellt.

Die Anordnung der beiden Sensorbrücken auf den Chip ist in Richtung Temperaturkoeffizient der Offsetspannung optimiert. Die wichtigsten der vorläufigen Daten dieses Sensors sind in einer Tabelle zusammengefaßt.



Mechanical Data / Mechanische Kenngrößen:

	Nominal value / Zielwert	Real value / Istwert
Chip dimensions / Chipfläche:	1,7 x 1,6 mm ²	
Chip thickness / Chipdicke:	520 µm ± 40µm	
Metallization / Leitbahnmaterial:	Al	
Bondability / Bondbarkeit:	US, TC, TS with Al- and Au-wires	tested with US bonding using AlSi1bond wire of 25 µm diam.

Absolute maximum ratings (preliminary) / Vorläufige Grenzdaten:

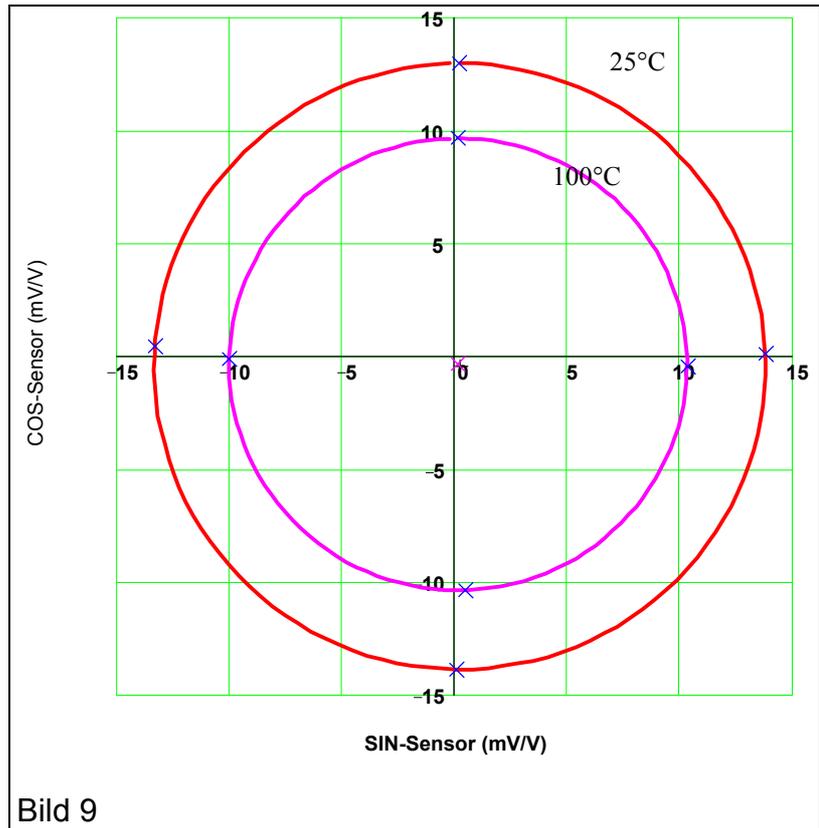
maximum voltage / Betriebsspannung	$ U_B $	≤ 6 V
Operating temperature range / Temperatureinsatzbereich	T	- 55...85 °C

Electrical Characteristics (25°C, preliminary) / Vorläufige Kenndaten bei 25 °C:

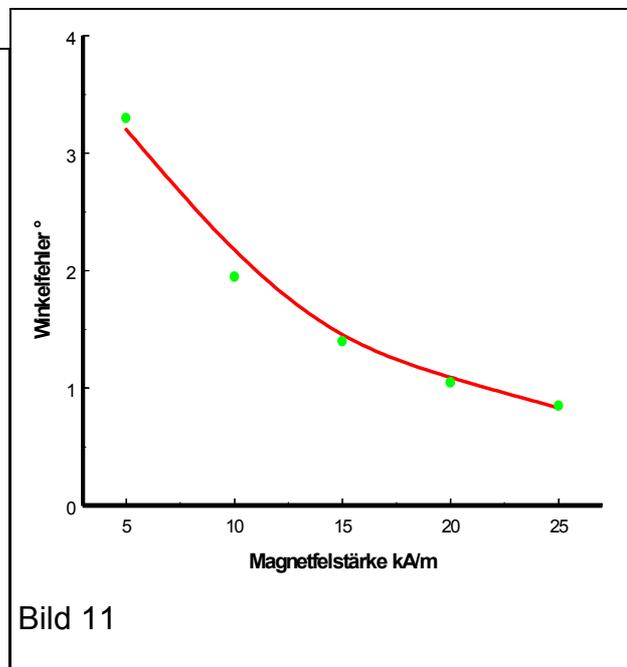
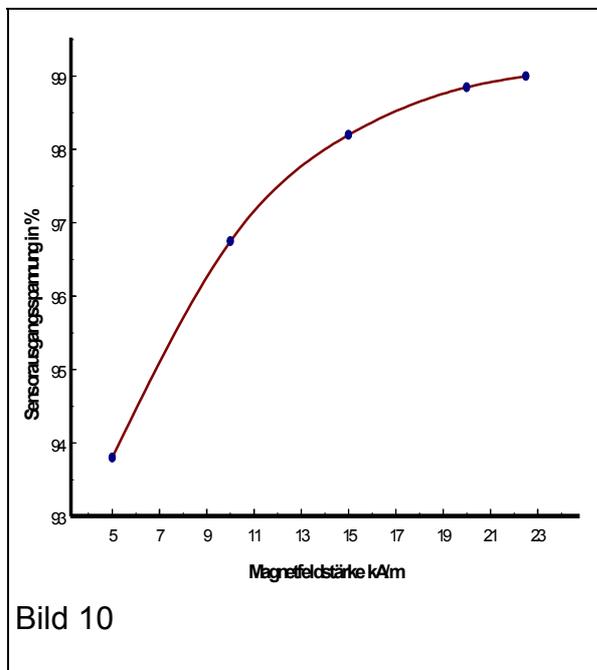
Sensor resistance / Sensorwiderstand	R_S	$0,8 \pm 0,3 \text{ k}\Omega$
Bridge resistance / Brückenwiderstand	R_B	$1,6 \pm 0,6 \text{ k}\Omega$
Signal amplitude in the operating distance / Ausgangssignalamplitude im Arbeitsbereich	U_a/U_B	≥ 8 mV/V
Offset / Offsetspannung	$ U_{\text{off}}/U_B $	≤ 2 mV/V
Temperature coefficient of signal amplitude / Temperaturkoeffizient der Signalamplitude	T_{KU}	$- 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Temperature coefficient of R_S / Temperaturkoeffizient von R_S	TK_{RS}	$3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

Technical specifications are subject to change without prior notice / Technische Änderungen vorbehalten.

In Bild 9 sind die Ausgangsspannungen U_{\sin} und U_{\cos} eines LK 15 bei 25°C und 100°C und Drehung des Magnetfeldes um 180° dargestellt. Die Magnetfeldstärke, die zum Betrieb des Sensors notwendig ist lässt sich aus den nächsten zwei Bildern ableiten. Sie ist natürlich abhängig von den Anforderungen an die magnetische Störsicherheit der Sensoranordnung und der geforderte Genauigkeit. Bild 10 zeigt den



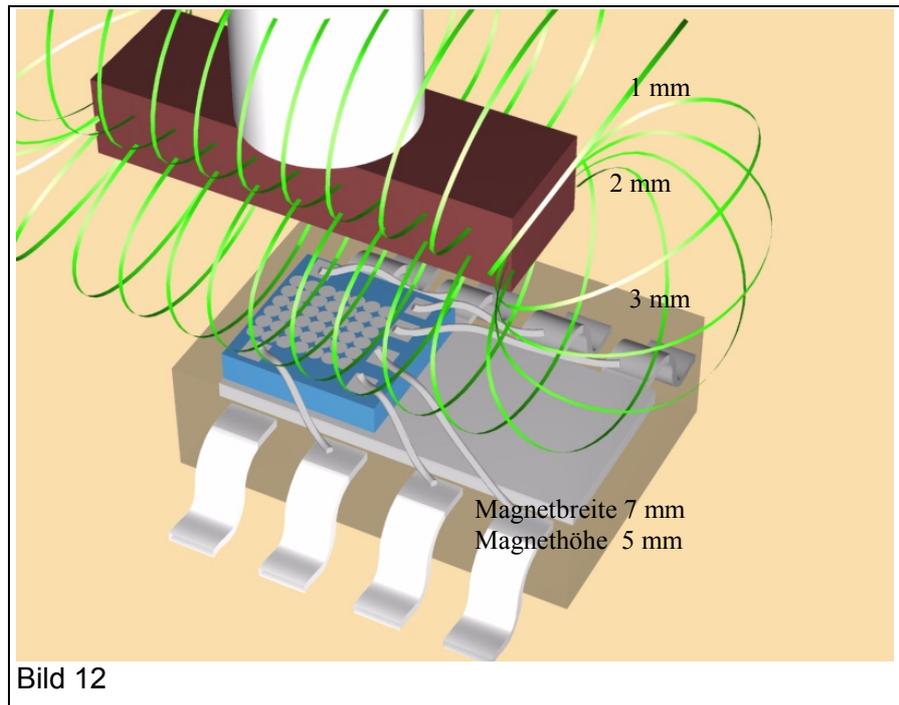
Zusammenhang zwischen Sensorausgangsspannung und der Feldstärke des angelegten Magnetfeldes. Den von der Feldstärke abhängigen Winkelfehler zeigt Bild 11.



4. Der Einsatz magneto-resistiver Winkelsensoren in Drehgebern

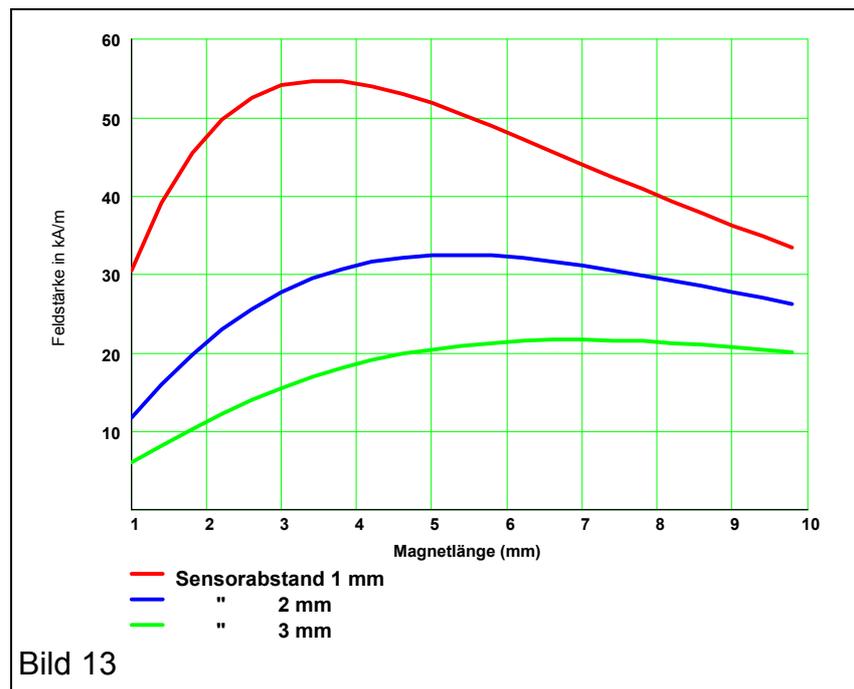
Bild 12 zeigt die Anordnung eines drehbaren Magnet gegenüber einem Winkelsensorchip.

Der Magnet für einen solchen Drehgeber ist so zu dimensionieren, daß er bei möglichst kleinem Volumen (Preis) ein möglichst starkes und gleichzeitig Homogenes Magnetfeld an Ort des Sensors erzeugt. Die Forderung nach Homogenität ist notwendig um möglichst



große mechanische Toleranzen beim Einbau des Sensors zu ermöglichen.

In Bild 13 ist der Zusammenhang zwischen Feldstärke und Länge des Magneten in Richtung der Magnetisierung bei verschiedenen Sensorabständen dargestellt. Das Material



des Magneten ist Ferrit. Beim Einsatz anderer Materialien ist entsprechend anderen Werkstoffremanenzen ein einfache Umrechnung möglich. Es ist sofort ersichtlich, daß es für jeden Arbeitsabstand eine optimale Magnetlänge gibt. Kleinere Arbeitsabstände erhöhen die Feldstärke bei Verringerung des Magnetvolumens.

Die Homogenität des Magnetfeldes wird im wesentlichen durch die Breite des Magneten bestimmt, wie es in Bild 12 anschaulich abzuleiten ist. Auswirkung hat die

Inhomogenität nur wenn es einen Versatz der Drehachse des Magneten gegenüber dem Sensormittelpunkt gibt.

Bild 14 zeigt den Einfluß der Magnetbreite auf den bei 1 mm Achsversatz erzeugten maximalen Winkelfehler in verschiedenen Arbeitsabständen. Für Die Optimierung einer konkreten Winkelgeberanordnung gibt es natürlich noch eine Reihe weiterer Parameter wie magnetische Störfelder, Toleranzen der Geometrie, Homogenität und Remanenz der Magnete. Dazu kommen

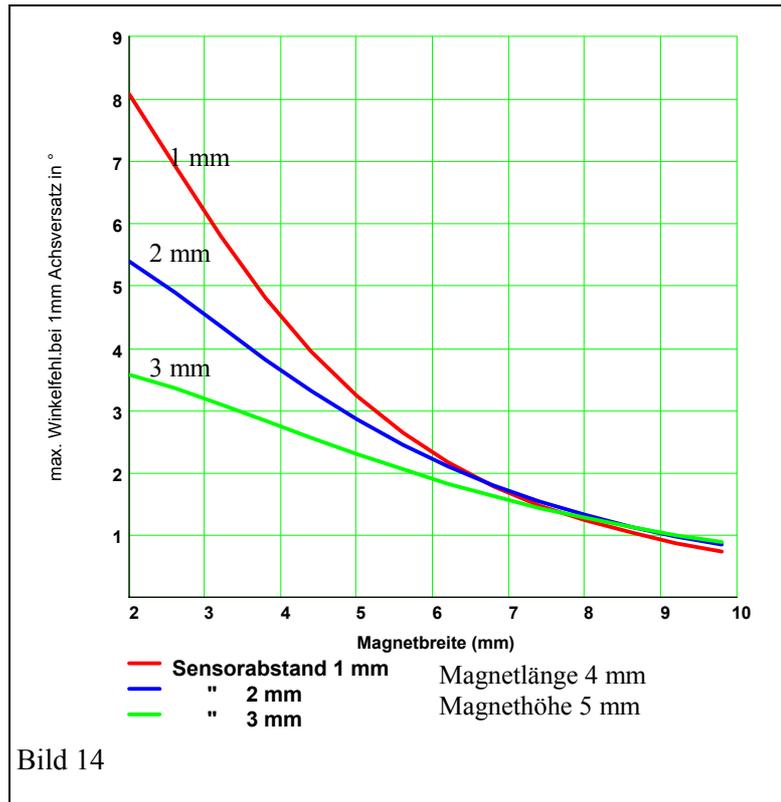


Bild 14

natürlich auch noch die sensorabhängigen Größen wie Offset, Offsettemperaturkoeffizient usw.

6. Abtastung regelmäßiger Magnetstrukturen mit Winkelsensoren

Die Anordnung eines magnetoresistiven Winkelsensors an einem Magnetpolrad ist in Bild 15 dargestellt. Die Größenverhältnisse sind Absichtlich etwas extrem gewählt um die bei solchen Anwendungen auftretenden Probleme zu veranschaulichen. Die durch die Magnetstruktur erzeugten

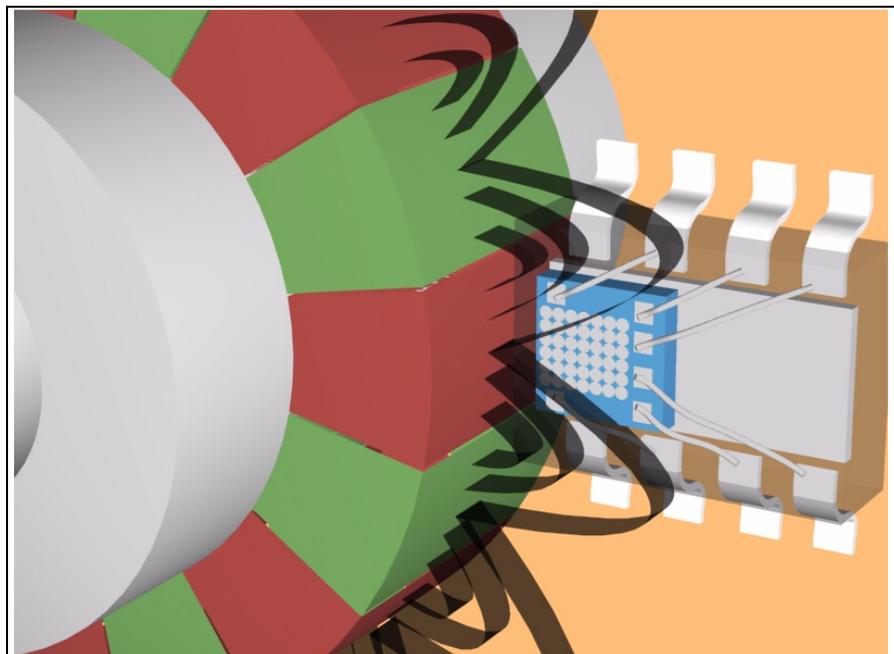


Bild 15

Feldverteilungen führen im Sensorbereich zu Feldinhomogenitäten.

Die Feldkomponenten an einer periodischen Magnetstruktur sind in Bild 16 für zwei verschiedenen Arbeitsabstände in % Polbreite entlang eines Poles berechnet. Dargestellt sind jeweils die Parallel- und Senkrechtkomponente des Feldes. Es ist deutlich sichtbar, daß bei kleinen Abständen die Feldstärke größer ist aber leider auch die Abweichung von der Sinusform stark ansteigt. Damit verringert sich die Interpolationsgenauigkeit.

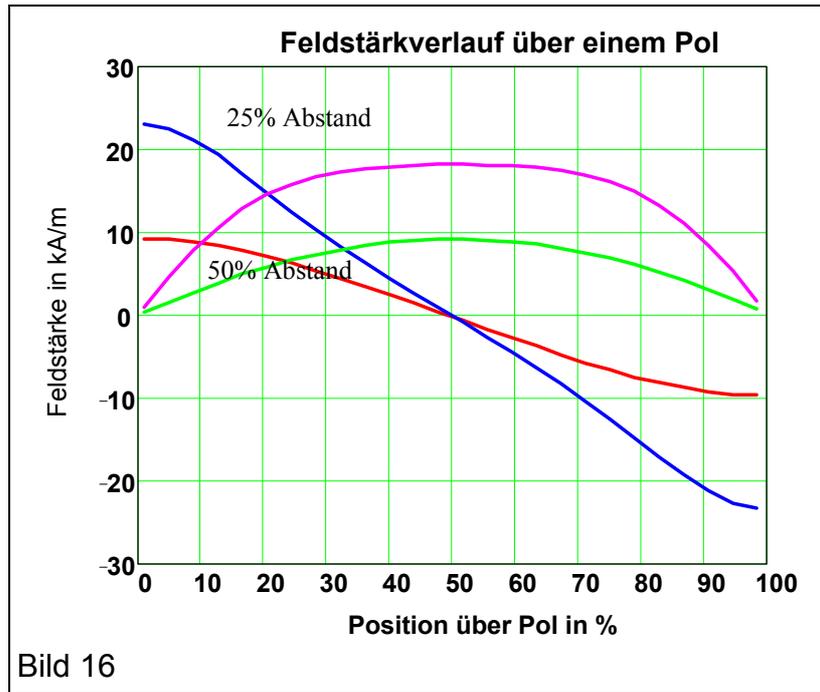


Bild 16

Es ist aber leider auch die Abweichung von der Sinusform stark ansteigt. Damit verringert sich die Interpolationsgenauigkeit.

Die erreichbare Feldstärke in der Mitte eine radial magnetisierten Poles als Funktion des Arbeitsabstandes ist in Bild 17 für verschieden Magnetlängen (Magnetisierungstiefen, Polradwandstärken) in % Polbreite dargestellt. Es ist zu erkennen, das eine Magnetisierungstiefe von mehr als 0,5 * Polbreite kaum noch einen

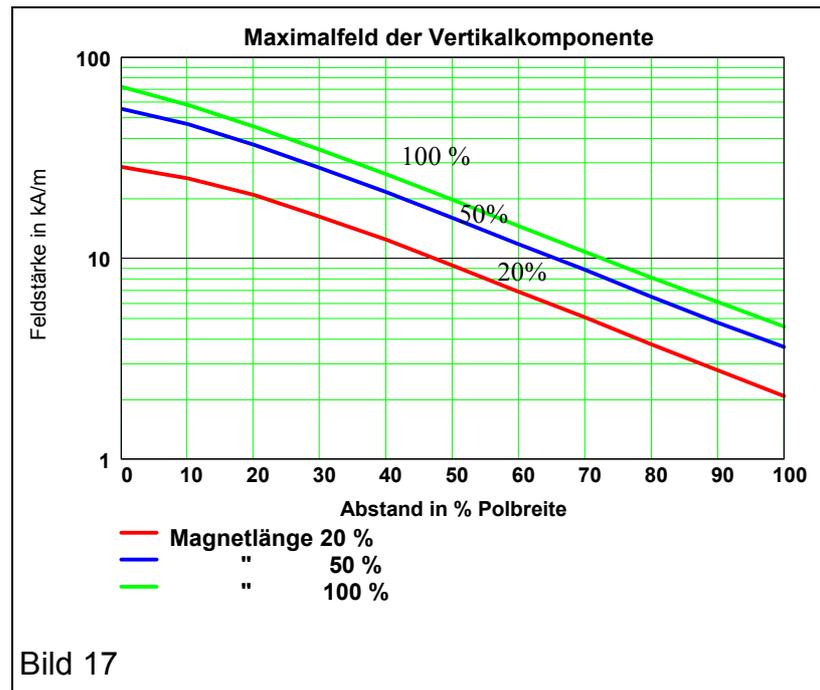


Bild 17

Zuwachs an Magnetfeld bringt und der Arbeitsabstand ein wesentlich größerer Einfluß auf die Feldstärke hat.

Der durch die in Bild 16 zu erkennende Signalverformung bei keinen Arbeitsabständen hervorgerufene Interpolationsfehler als Funktion der Position über einem Pol ist in Bild 18 für mehrere Abstände berechnet.

Mit dem Sensor LK 15 durchgeführte Messungen an Polräder mit verschiedenen Polbreiten ergaben die in Bild 19 abgebildeten Zusammenhang zwischen Interpolationsgenauigkeit und Polbreite. Es zeigte sich, daß bei kleinen Polbreiten von etwa 2,2 mm ein Fehlerminimum erreicht wird. Die Erklärung dafür liegt in der Sensorbreite von 1,5 mm. Der Sensor integriert über diese Breite. Zur Erklärung dieses Effektes ist in Bild 20 ein typischer (nichtsinusförmiger Feldverlauf) mit seinem Oberwellenanteilen dargestellt. Der Hauptfehler wird durch die 3. Oberwelle des Magnetfeldverlaufes verursacht. Diese hat aber eine Länge

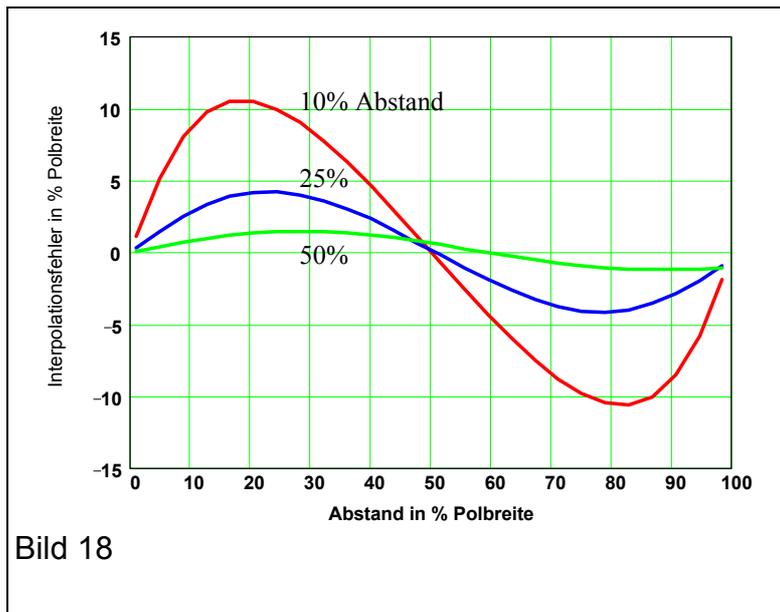


Bild 18

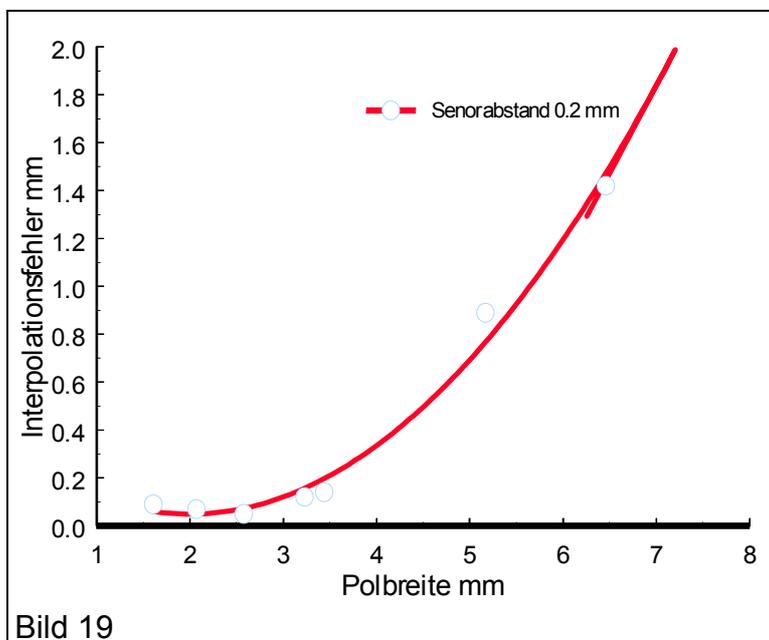


Bild 19

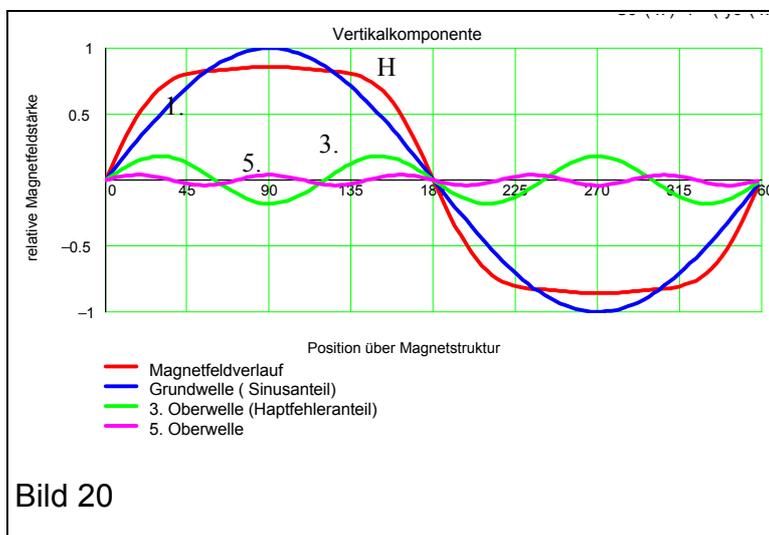


Bild 20

von 66% der jeweiligen Polbreite und ein Sensor muß um sie zu unterdrücken über diese Breite mitteln. Für den Lk 15 ist die optimale Breite deshalb 2,25 mm. Da der Sensor auch eine Länge von 1,5 mm kann die Feldstärke im hinteren Chipbereich aber infolge der Feldverringerng mit dem Abstand (Bild 17) bei zu kleinen Polbreiten zu gering werden. Deshalb liegt die untere Grenze je nach Magnetmaterial bei 1,5 bis 2,0 mm. Eine weitere Folge der Mittelung über der Sensorfläche ist eine bei kleinen Polteilungen verringerte Signalausgangsspannung.