

4. Fachtagung
Sensoren zum Messen mechanischer Größen
im KFZ

Haus der Technik
Essen 23.-24. 2. 1999

Magneto-resistive Winkelsensoren für extreme Einsatzbedingungen

Dipl. Phys. Uwe Loreit
IMO – Wetzlar

Gliederung:

1. Einleitung
2. Funktionsprinzip von MR- Winkelsensoren
3. Eigenschaften bekannter Winkelsensoren
4. Neues Winkelsensorprinzip des IMO mit verbesserten Eigenschaften
5. Erreichte Kenndaten und erste Einsatzerfahrungen

1. Einleitung

Seit einigen Jahren gibt es magneto-resistive Winkelsensoren von verschiedenen Herstellern wie Philips, HL-Planartechnik und natürlich auch IMO /1,2,3,4,5/. Alle diese Sensoren haben eine stark mit der Magnetfeldstärke zunehmende Genauigkeit. Im IMO wurde vor einigen Jahren ein Sensor entwickelt und auf der vorigen Tagung vorgestellt, der schon bei relativ geringen Magnetfeldern höhere Genauigkeiten erreicht. Wegen eines großen Chipflächenbedarfs und geringen Innenwiderstandes war dieser für Massenanwendungen weniger geeignet. Durch eine neue, patentierte Sensoranordnung ist nun die Herstellung von Sensoren möglich geworden, die gegenüber den von andern Herstellern bekannten Sensoren auf nur 25% der Fläche den doppelten Sensorwiderstand aufweisen und mit nur 25% der Magnetfeldstärke bis zu 150°C stabil und genau arbeiten. Die geringe Magnetfeldstärke ermöglicht den Einsatz kostengünstiger kunststoffgebundener Ferritmagnete. Es ist deshalb mit einer starken Verringerung der Systemkosten zu rechnen.

2. Funktionsprinzip

Die Funktion der magnetoresistiven Winkelsensoren wurde bereits auf der vorigen Tagung /3/ ausführlich dargestellt. Zum Verständnis der Arbeitsweise der neuen Sensoren und wegen der vielen neuen Teilnehmer soll an dieser Stelle eine Zusammenfassung des Aufbaus und der Funktion dieser Bauelemente erfolgen.

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

Ein mechanisches Modell zur Beschreibung des

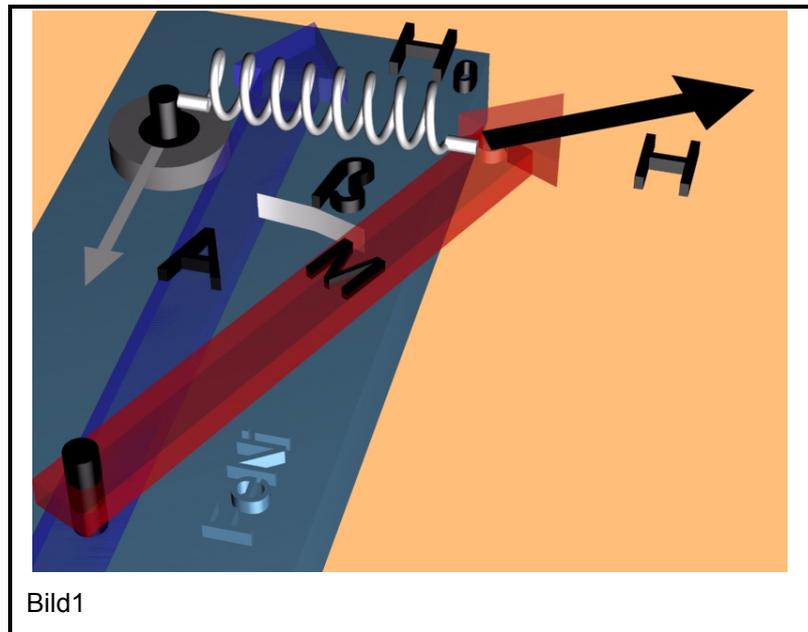


Bild1

Verhaltens 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 entspricht der Anisotropiefeldstärke H_0 , welche durch eine Feder dargestellt wird, deren Befestigungspunkt an A frei beweglich ist. Dieses Modell

gibt das magnetische Verhalten exakt wieder.

In Bild 2 hat das äußere Feld die gleiche Richtung wie die Anisotropieachse A . In diesem Fall stimmen die Winkel von H und M überein. Das gilt auch für den Fall, daß das Magnetfeld H senkrecht zu A steht

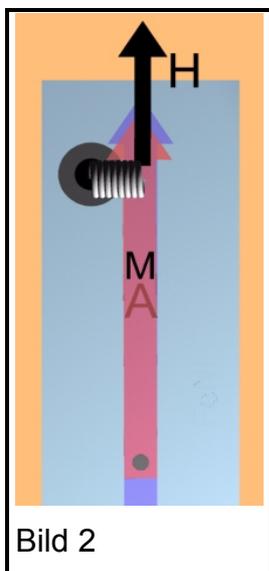


Bild 2

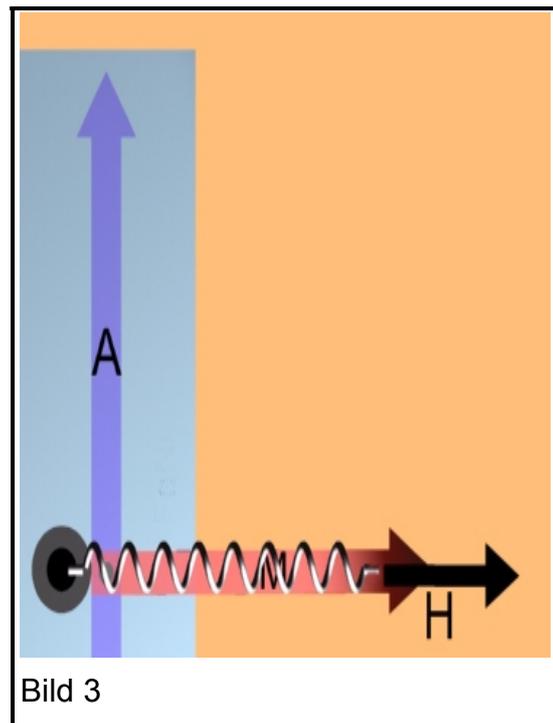


Bild 3

und größer ist als die Anisotropiefeldstärke H_0 , wie 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 4 zeigt den Verlauf des maximalen Winkelfehlers als Funktion der Magnetfeldstärke für verschiedene Anisotropiefeldstärken. Allgemein gilt folgender Zusammen-

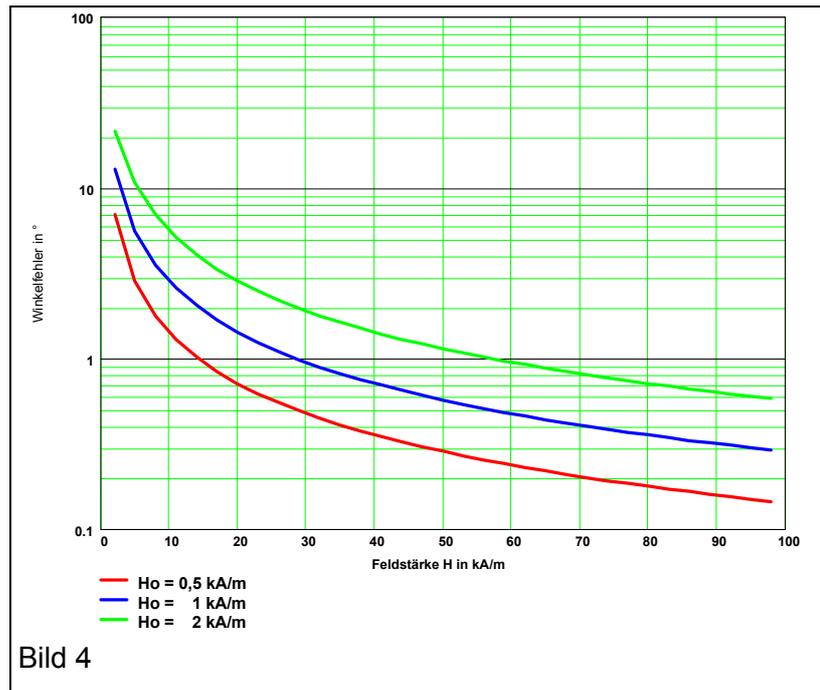


Bild 4

menhang zwischen dem Winkel der Magnetisierung β und den Komponenten des Magnetfeldes (H_x in Richtung von A und H_y senkrecht dazu):

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

Wie aus Bild 4 zu erkennen ist, tritt beim Einsatz einfacher Sensorstrukturen besonders bei geringen Magnetfeldstärken im Verhältnis zur Anisotropie ein erheblicher Winkelfehler auf. Die Anisotropiefeldstärke H_0 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 $H_k < 150 \text{ A/m}$. Für die geometrieabhängige Formanisotropie erhält man bei langen, schmalen Streifen Werte über 5000 A/m .

Um aus der Drehung der Magnetisierung einen verwertbaren Sensoreffekt zu erhalten, muß noch deren elektrische Wirkung betrachtet werden. In den anisotropen magnetoresistiven Materialien gilt für den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und dem Winkel zwischen Stromrichtung und Magnetisierung β

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

Da der elektrische Widerstand hier vom doppelten Winkel abhängt, ist eine Winkelbestimmung aus dem magnetoresistiven Effekt nur in einem Winkelbereich von 180° eindeutig. Für eine gegenläufige Widerstandsänderung, wie sie in einer Brückenschaltung notwendig ist, ist ein Winkeloffset von 90° notwendig.

Bild 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Winkelsensors in Brückenschaltung. Enthalten sind zwei Wheatstone-Brücken, deren Widerstandsstreifen um 45° gegeneinander verdreht sind. Dadurch ergibt sich nach obiger Formel ein Phasenversatz von 90° im Widerstandsverlauf. Innerhalb der einzelnen Brücken haben die Widerstandsstreifen zueinander einen Winkel von 90° und weisen gegenläufige Widerstandsänderungen auf. So erreicht man die maximal mögliche Brückenausgangsspannung. Der Verlauf der beiden Sensorsignale als Funktion des Magnetfeldwinkels ist in Bild 6 dargestellt.

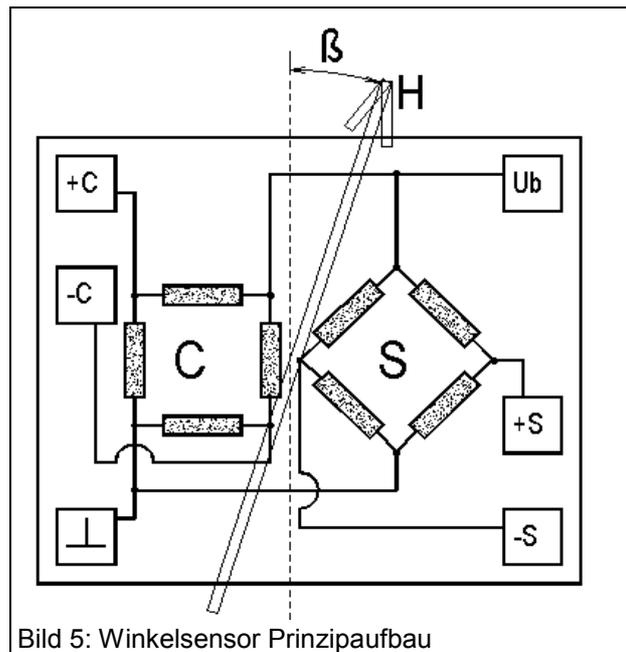


Bild 5: Winkelsensor Prinzipaufbau

3: Eigenschaften bekannter Winkelsensoren

Alle am Markt erhältliche MR-Winkelsensoren haben diesen Aufbau. Sie unterscheiden sich allerdings in der Geometrie der MR-Sensorstreifen und deren

Verteilung auf der Chipfläche. Ein im IMO entwickelter Sensor mit der Bezeichnung LK 15, der schon bei sehr kleinen Magnetfelder arbeitet, wurde vor 2 Jahren auf Tagungen /3,5/ vorgestellt. In den letzten Jahren wurde eine Reihe weiterer Winkelsensorstrukturen untersucht.

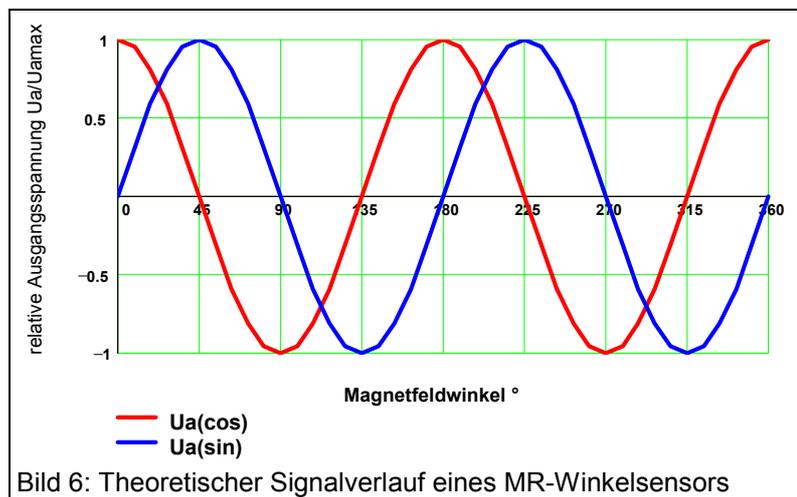


Bild 6: Theoretischer Signalverlauf eines MR-Winkelsensors

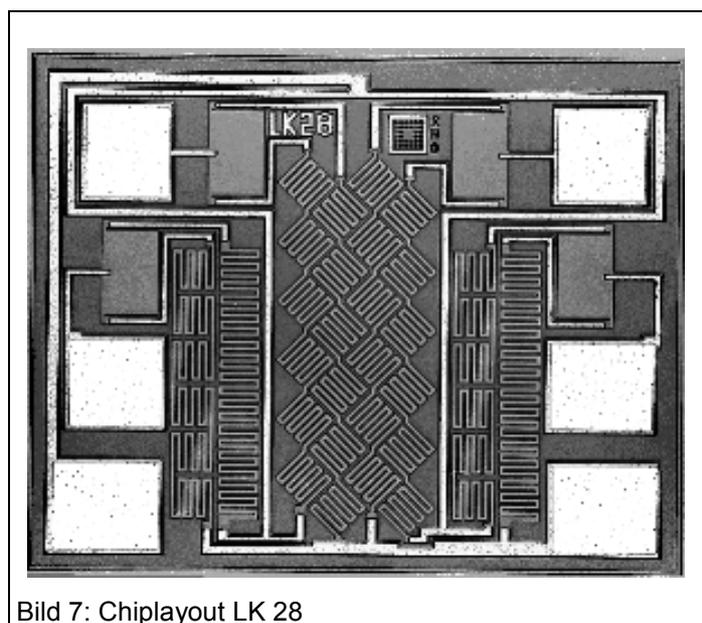
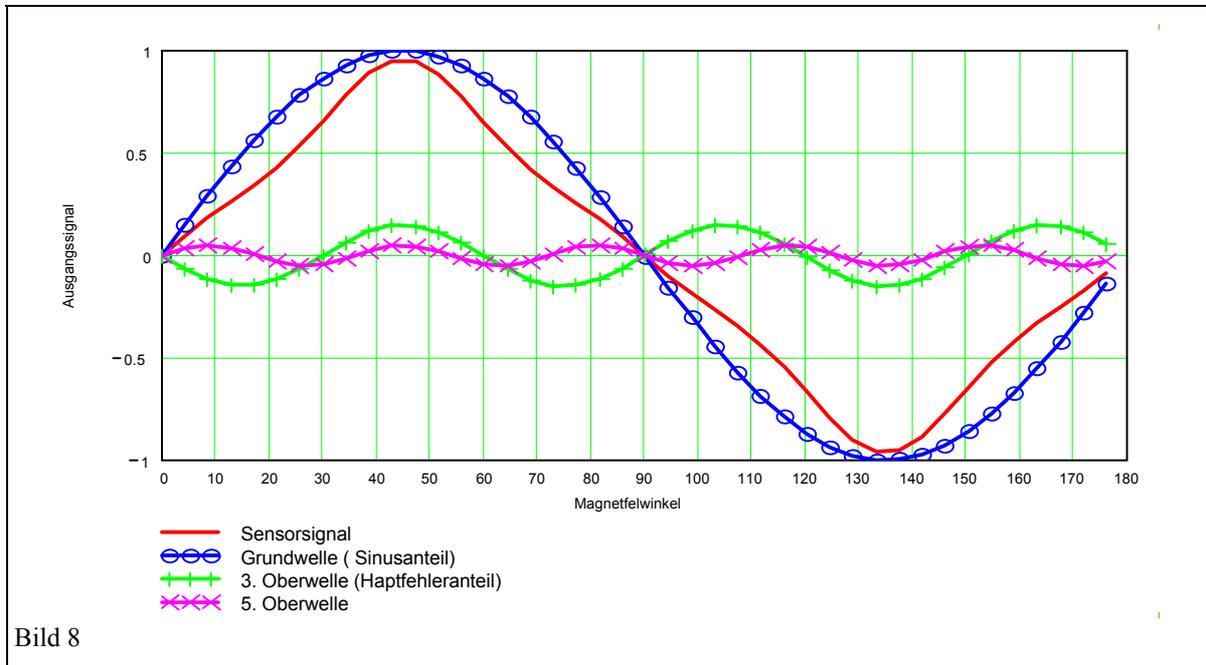


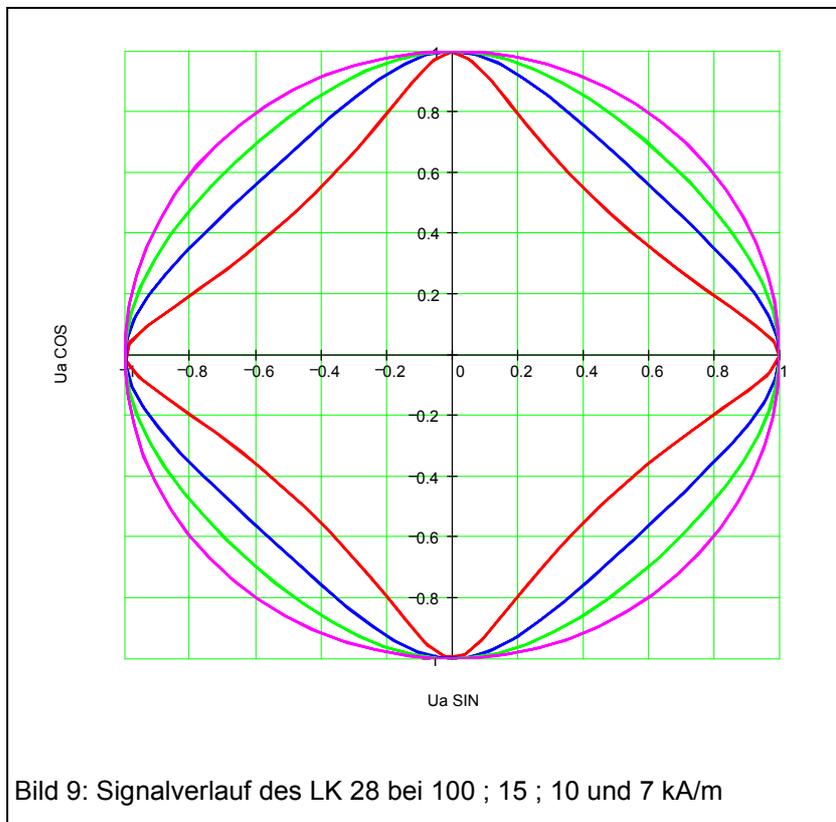
Bild 7: Chiplayout LK 28

Der erste Sensor dieser Serie war der LK 28, dessen Layout in Bild 7 zu sehen ist. Ziel dieser Entwicklung war es, einen Low Cost Winkelsensor auf einer Chipfläche von etwa $0,5 \text{ mm}^2$ zu realisieren. In diesem Sensor wurden $4 \mu\text{m}$ breite Sensorstreifen verwendet. Dadurch erreicht man Sensorwiderstände über $2 \text{ k}\Omega$, hat aber durch die große Formanisotropie



von etwa 5 kA/m bei kleinen Magnetfeldstärken sehr große Winkelfehler.

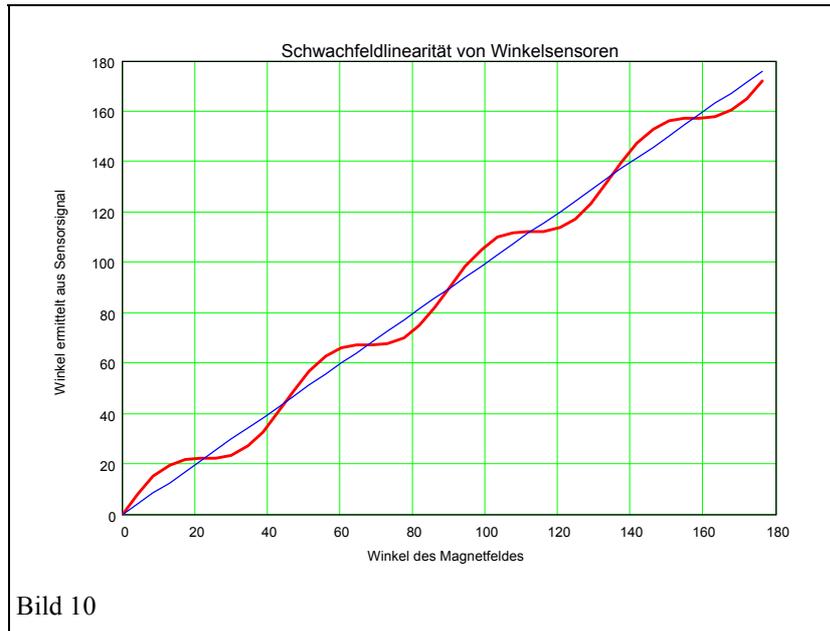
Bild 8 zeigt den prinzipiellen Sensorsignalverlauf von Winkelsensoren mit magnetoresistiven Streifen bei schwachen Magnetfeldern. Das Sensorsignal zeigt eine große Abweichung von der Sinusform, es enthält eine Reihe von Oberwellen, die ebenfalls in dem Bild dargestellt sind. Berechnete Sensorsignale der beiden Brückenausgänge für verschiedene Magnetfeldstärken zeigt Bild 9 als X-Y Darstellung. Deutlich sichtbar ist die Abweichung von der Kreisform.



Benutzt man solche Sensorsignale zur Winkelmessung, ergibt sich eine Übertragungskennlinie wie sie in Bild 10 dargestellt ist. Durch die Abweichung von der Sinusform entsteht eine Fehlerperiodizität von

45°. Das ergibt 8 Fehlermaxima auf 180°.

Die Fehleramplitude hängt natürlich direkt von der Magnetfeldstärke ab und ist somit kaum durch eine einfache Korrektur zu beseitigen. Hat man sich die Aufgabe gestellt, kleine, hochohmige und genaue Winkelsensoren zu entwickeln, so scheint



das aus physikalischen Gründen nicht möglich zu sein, da dazu die Verwendung sehr schmaler MR-Streifen unumgänglich ist.

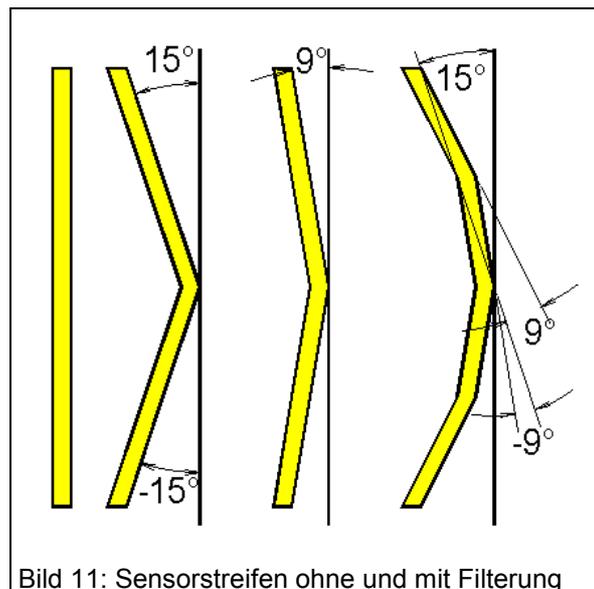
Trotzdem ist IMO durch weitere Bearbeitung eine Lösung dieses Problems gelungen.

4. Neues Winkelsensorprinzip des IMO mit verbesserten Eigenschaften

Das neue Sensorkonzept verbessert die Sinusform der Sensorsignale durch eine Veränderung der Form der magnetoresistiven Widerstände auf den Sensorchip.

Zum Verständnis des Prinzips betrachten wir noch einmal das Bild 8 mit der Signalform. Man erkennt, daß die Länge der 3. Oberwelle 60° und die der 5. Oberwelle 36° beträgt. Würde man über das Signal von zwei Sensoren

mitteln, die um einen Winkel verdreht sind, der der halben Wellenlänge einer Oberwelle entspricht, so könnte diese aus dem Signal entfernt werden. Das würde für die 3. Oberwelle 30° und für die 5. Oberwelle 18° bedeuten. Wie aber mittelt man über zwei um 30° verdrehte Sensoren? Die Lösung dieses Problems erscheint im nachhinein natürlich einfach zu sein. Dazu muß man nur Teilbereiche der Widerstandsstreifen gegeneinander zu verdrehen. Bild 11 zeigt das Prinzip der Oberwellenfilterung an einfachen MR-Streifen für die 3., die 5. und beide Oberwellen gleich-



zeitig. Durch das Verdrehen von gleichen Teilbereichen der Sensorstreifen um jeweils den halben Winkel der entsprechenden Oberwelle bleibt die mittlere Stromrichtung erhalten. Bei einer Struktur, die mehrere Oberwellenanteile filtern soll, muß die jeweilige Winkelteilung für die verschiedenen Oberwellen nacheinander durchgeführt werden. Im Bild 11 ist dieses für die 3. und 5. Oberwelle dargestellt. Die jeweils im Mittel um $\pm 15^\circ$ gedrehten Streifen werden wieder geteilt und nochmals

um $\pm 9^\circ$ gedreht. Für jede weitere Oberwelle könnte man dieses fortsetzen. In Bild 12 ist das Layout eines Sensors mit Oberwellen zur Verbesserung der Sensorsignale dargestellt. Bild 13 zeigt die durch diese Struktur zu erreichende Signalverbesserung.

Die Simulationsbedingungen sind die gleichen wie in Bild 9. Man erkennt eine deutlich verbesserte Annäherung an die Kreisform. Allerdings hat sich die Ausgangssignalamplitude um etwa

15 % verringert. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß durch die Winkelverdrehung nicht alle Sensorbereiche gleichzeitig ihre maximale Widerstandsänderung erreichen.

Erste Messungen an LK 28/2 zeigten, daß der Fehler dieser Sensoren deutlich unter dem des LK 28 nach Bild 7 lag. Nun lieferte allerdings die noch vorhandene 5. Oberwelle, die von

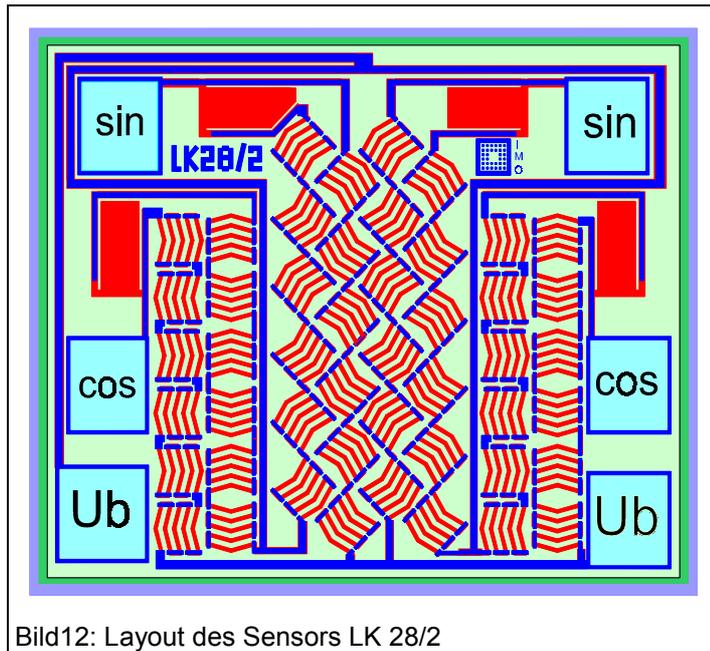


Bild12: Layout des Sensors LK 28/2

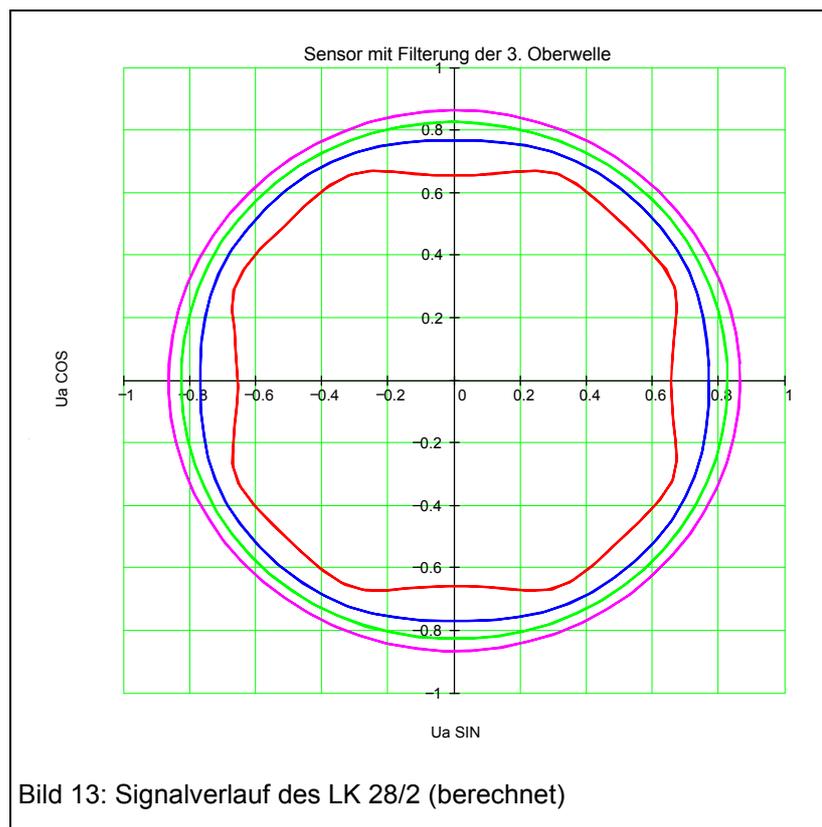


Bild 13: Signalverlauf des LK 28/2 (berechnet)

uns zu diesem Zeitpunkt unterschätzt wurde, den größten Fehleranteil. Deshalb wurde der oben beschriebene Weg zur Filterung höherer Oberwellen weiter verfolgt.

Berechnungen der Kreisform für die Filterung der 3. und der 5. Oberwelle, die in Bild 14 dargestellt ist, und der berechnete Fehlerverlauf zeigten, dass noch eine weitere Signalverbesserung möglich ist.

Deshalb wurde in einer weiteren Entwicklungsstufe der LK 28/3 hergestellt, dessen Layout in Bild 15 gezeigt wird. Man erkennt aber bei diesen Strukturdimensionen auch die Grenzen des Verfahrens. Wenn die Länge der einzelnen Teilbereiche der Sensorstreifen nicht mehr viel länger sind als ihre Breite, dann ist die Stromverteilung nicht mehr homogen, da die Streifen nur aus Ecken bestehen. Für diese Chipgröße und Struktur scheint damit eine neue Grenze erreicht zu sein.

Messungen an den LK 28/3 zeigten nochmals eine deutliche Verbesserung der Sensorsignale gegenüber dem LK 28/2. Der letzte Entwicklungsstand dieses Sensors ist der LK 28/4. Dieser wurde aber nur im Bereich der Bondstellen und in der Lasertrimmstruktur

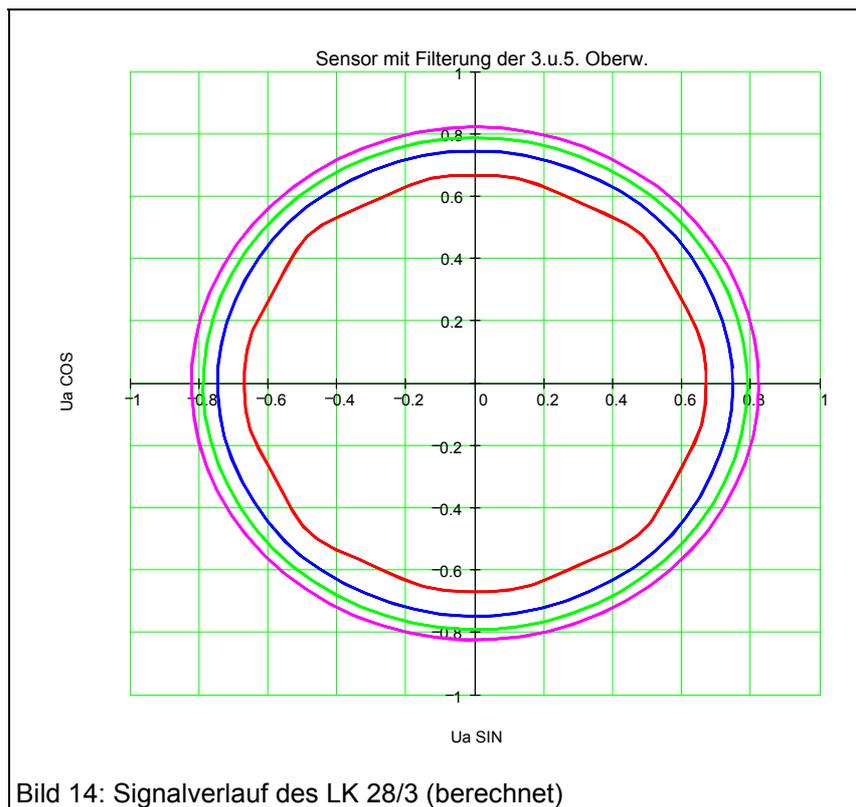


Bild 14: Signalverlauf des LK 28/3 (berechnet)

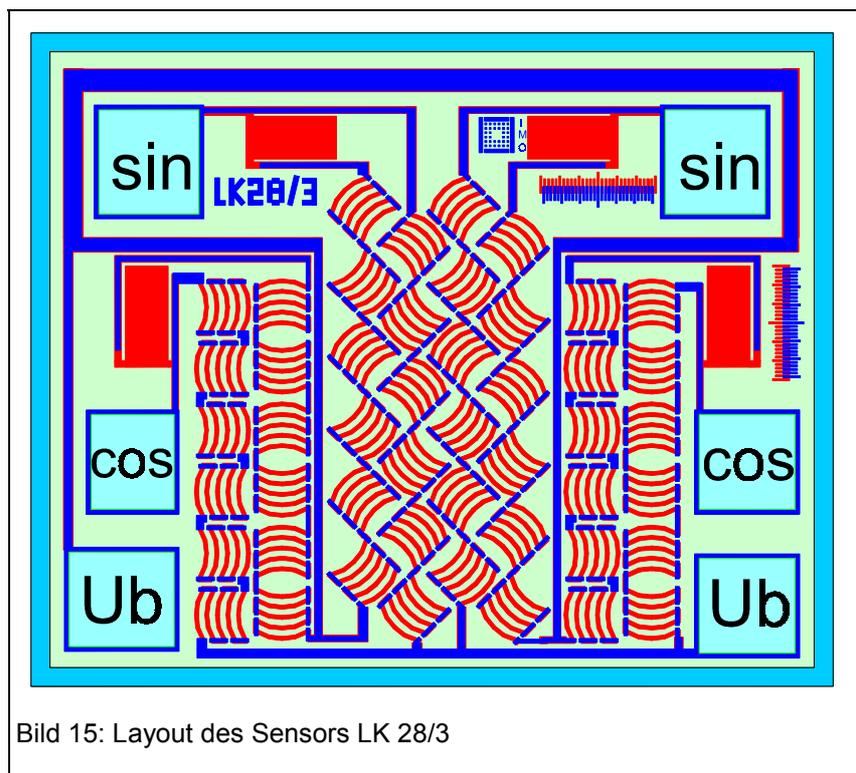
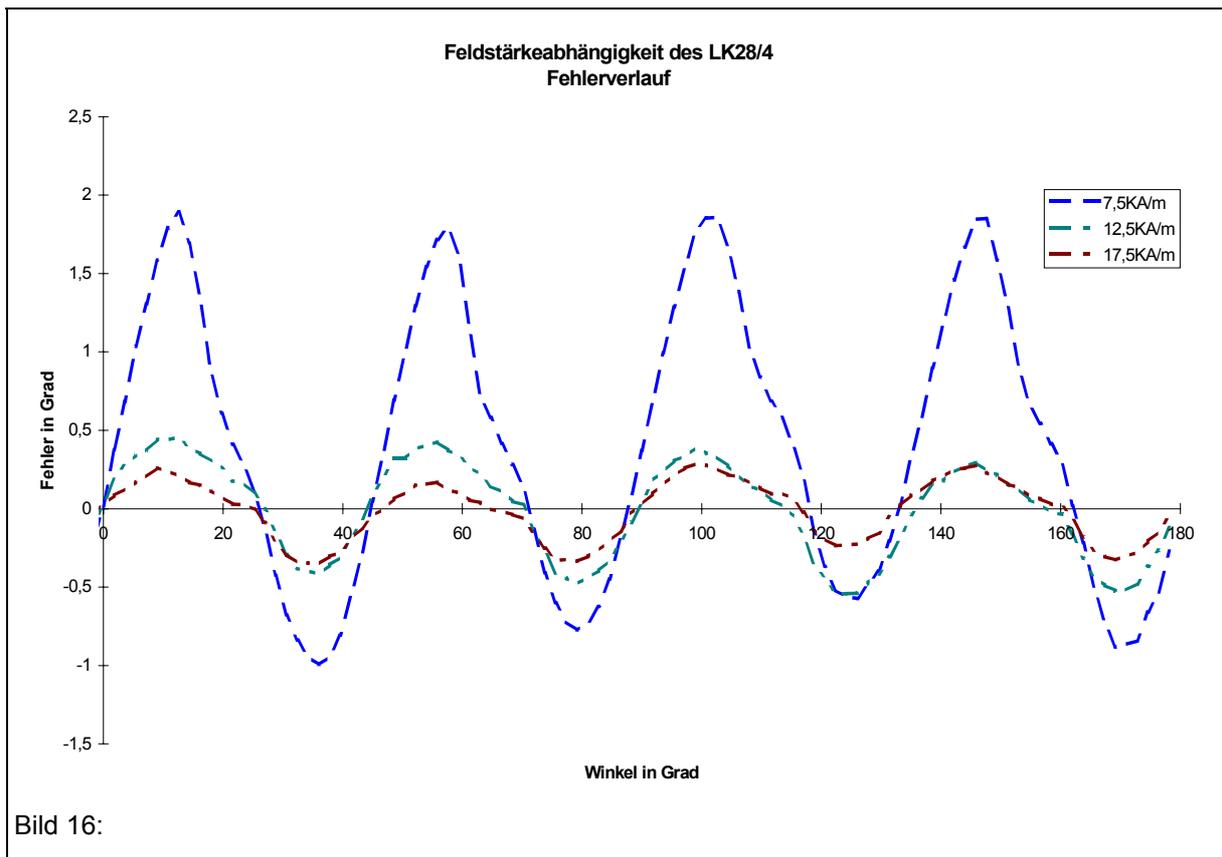


Bild 15: Layout des Sensors LK 28/3

korrigiert. Damit ist die Entwicklung des LK 28 abgeschlossen. Die von IMO produzierten Sensoren LK 28 entsprechen also dem Stand LK 28/4.

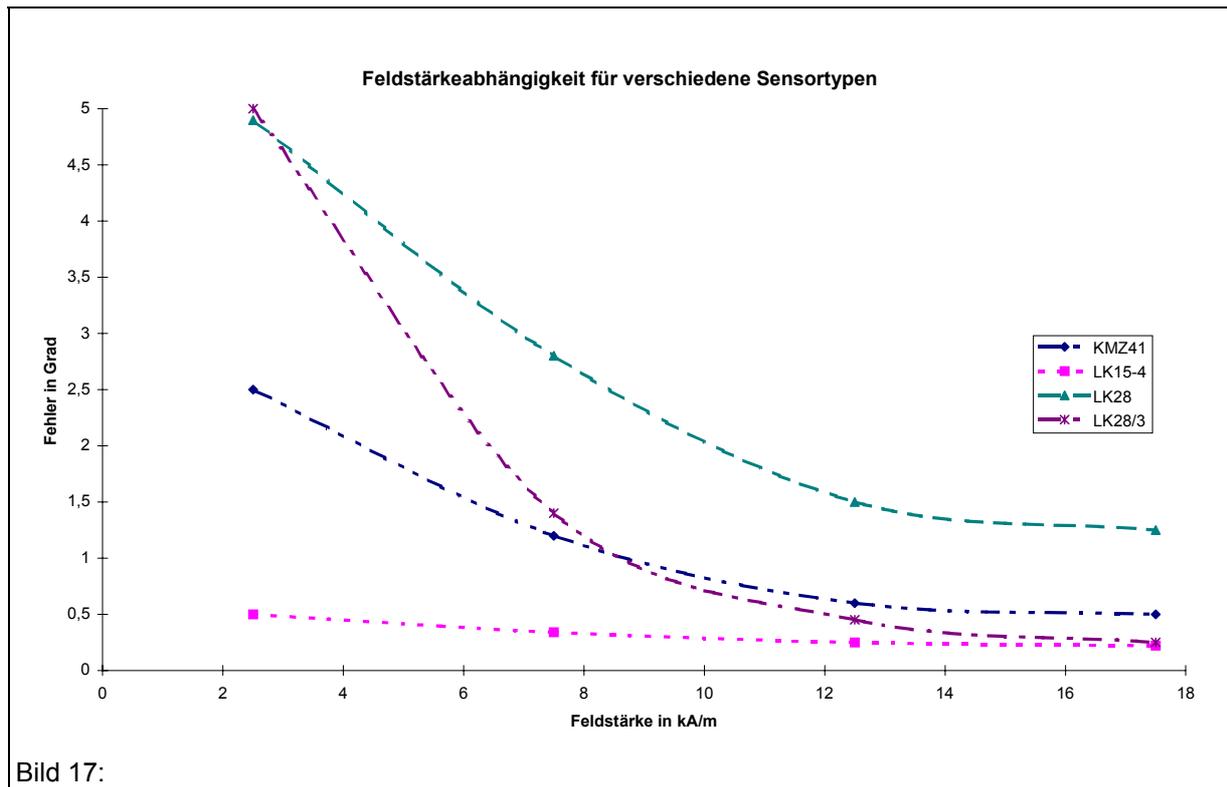
4. Erreichte Kenndaten und erste Einsatzerfahrungen

Da das Ziel der Entwicklung ein Sensor ist, der bei relativ kleinen Magnetfeldstärken einen kleinen Fehler liefert, waren die Messungen dazu natürlich sehr wichtig. In Bild 16 ist der Fehlerverlauf eines LK 28/4 dargestellt der bei verschiedenen Magnetfeldstärken gemessen



wurde. Man erkennt, daß die Fehleramplitude mit steigender Feldstärke stark abnimmt. Zum Vergleich wurden weitere Messungen auch an anderen Sensoren durchgeführt. Die zusammengefaßten Ergebnisse zur Fehlermessung als Funktion der Magnetfeldstärke sind in Bild 17 dargestellt.

Man sieht, daß der LK 28 mit MR-Streifenbreiten von 4 µm den größten Fehler aufweist. Der KMZ 41 (Philips), ein Winkelsensor mit größerer Streifenbreite zeigt einen wesentlich besseren Fehlerverlauf. Dazu ist aber eine um den Faktor 4 größere Chipfläche notwendig. Ähnlich verhält es sich mit dem Sensor LK 15, dessen Vorteile bei sehr kleinen Feldstärken besonders hervortreten. Der LK 28/3 benötigt zwar eine Mindestfeldstärke von etwa 8 kA/m, da die 4 µm breiten MR-Streifen eine Anisotropiefeldstärke von etwa 5 kA/m haben, hat aber bei < 20 kA/m schon einen Winkelfehler unter 0,3°.



Die erreichten elektrischen Kenndaten des LK 28/4 sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Erreichte Daten des LK 28 (Vollständige Datenblätter auf Anfrage) :

Chipfläche	0,9 x 9,75	mm ²
Brückenwiderstand	4 ±1,6	kΩ
Signalamplitude	8 – 13	mV/V
Offsetspannung	≤ 3	mV/V
Offsetdrift	≤ 100	nV/V h
TK der Offsetspannung	≤ 3	μV/V K

Literatur:

- /1/ A. Petersen „Berührungslose Winkelmessung“
Design & Elektronik Sensortechnik
Sonderheft Mai 1995, S. 64 – 66
- /2/ M. Schneider „Einsatz des magnetoresistiven Sensors als Schalter und Winkelsensor:
Positionserkennung und Durchflußmessung“
Symposium „Magnetoresistive Sensoren IV“ 11.-12.März 1997, Wetzlar
- /3/ U. Loreit „Magnetoresistiver Winkelsensorchip mit hoher Genauigkeit bei geringer
Feldstärke“
Symposium „Magnetoresistive Sensoren IV“ 11.-12.März 1997, Wetzlar
- /4/ Patentschrift DE 195 21 617
- /5/ U. Loreit „Neue magnetoresistive Winkelsensoren für erweiterte Einsatzbedingungen“
HDT, „Sensoren zur Messung mechanischer Größen im KFZ“,
Essen 17.-18. Febr. 1997