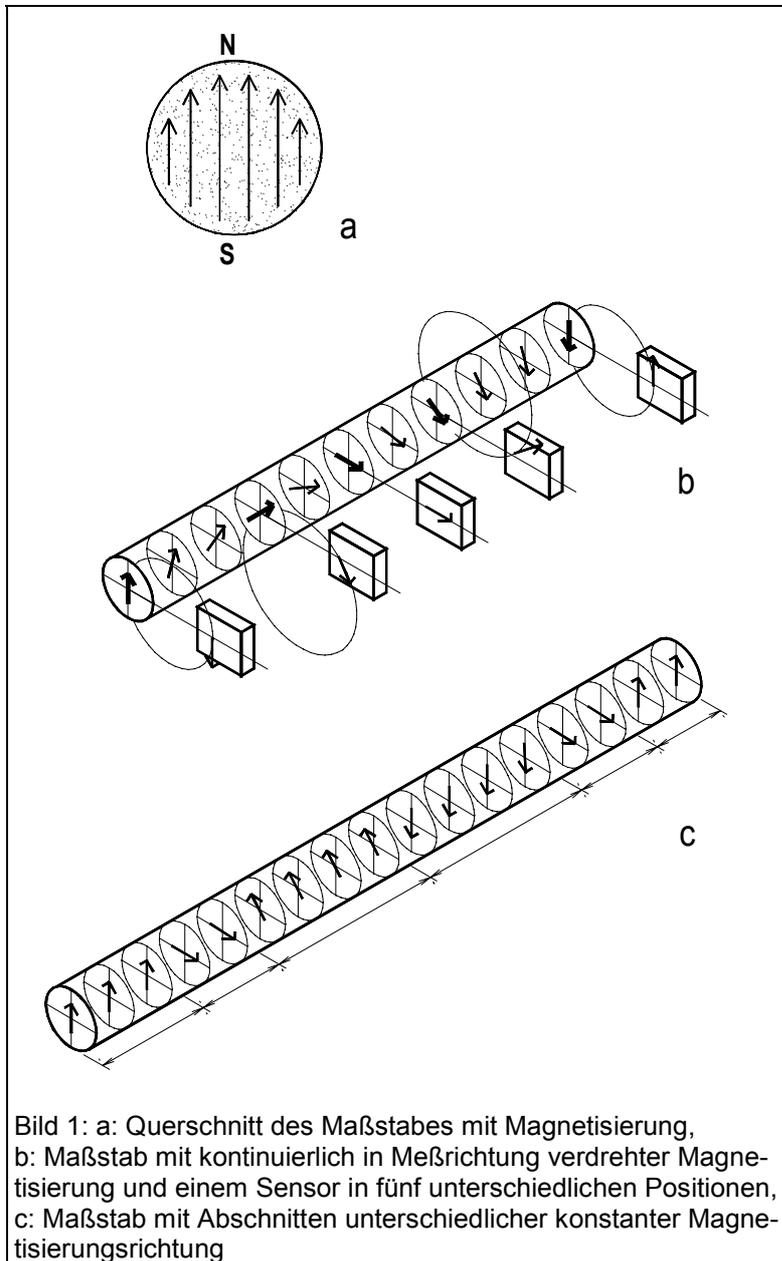


**I
M
O**

**Kostengünstiges magnetisches
Meßsystem
zur Bestimmung der Absolutposition**

Kostengünstiges magnetisches Meßsystem zur Bestimmung der Absolutposition

Das Meßsystem besteht aus einer stabförmigen Maßverkörperung, deren Magnetisierungsrichtung in der Ebene ihres Querschnitts liegt, aus magnetoresistiven Sensorelementen, die die Richtung des Magnetfeldes in Maßstabsnähe in der Ebene des Querschnitts feststellen,



und aus der Auswerteschaltung.

1. Meßprinzip

In Bild 1 sind Maßstäbe mit kreisförmigen Querschnitten dargestellt. Die eingestellte Magnetisierungsrichtung wird durch Pfeile angezeigt. Bild 1 a zeigt einen Querschnitt durch den Maßstab. Die Magnetisierung ist in der gesamten Kreisfläche parallel.

In Bild 1 b ist ein Maßstab dargestellt, bei dem der Winkel der Magnetisierung zur Senkrechten linear mit fortschreitender Position in Meßrichtung zunimmt. Neben dem Maßstab befindet sich in einem bestimmten Abstand ein magnetoresistiver Magnetfeldsensor, dessen Sensorebene mit der Ebene des Kreisquerschnittes des Maßstabes übereinstimmt. Der Sensor ist in fünf Positionen gezeichnet,

die er bei seiner Bewegung gegenüber dem Maßstab nacheinander einnehmen kann. Für diese Positionen ist jeweils eine Magnetfeldlinie, wie sie vom Maßstab an der jeweiligen Stelle erzeugt wird, dargestellt. Daraus läßt sich die Richtung des Magnetfeldes in der Sensorebene erkennen. Sie ist jeweils durch einen Pfeil gekennzeichnet. Mit Fortschreiten in der Meßrichtung ändert sich der Winkel der Magnetfeldrichtung weitgehend linear. Ist der verwendete magnetoresistive Sensor zur Bestimmung des Winkels des Magnetfeldes geeignet, kann er in diesem Fall auch zur Messung der Position entlang des Maßstabes benutzt werden.

2. Eigenschaften magnetoresistiver Winkelsensoren

Die magnetoresistiven Sensoren LK 15.4 und LK 28 des IMO Wetzlar sind zur Bestimmung des Winkels der Magnetfeldrichtung gegen eine Kante des Sensorchips geeignet. Jeder dieser Sensoren enthält zwei Wheatstonebrücken aus magnetfeldabhängigen Widerständen.

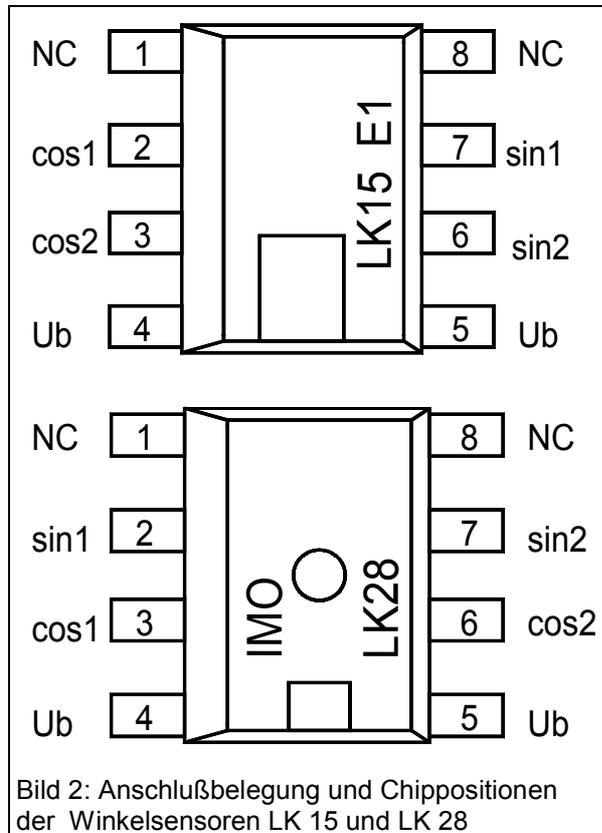


Bild 2: Anschlußbelegung und Chippositionen der Winkelsensoren LK 15 und LK 28

Die erste Brücke liefert ein Ausgangssignal, das proportional zum Sinus des zweifachen Winkels zwischen Magnetfeldrichtung und Kante ist. Aus der zweiten Brücke erhält man das entsprechende Kosinussignal des doppelten Winkels. Die Daten der beiden Sensortypen sind den beigefügten vorläufigen Datenblättern zu entnehmen. Die Sensoren sind im SM8-Gehäuse von IMO lieferbar. Die Anschlußbelegungen sind Bild 2 zu entnehmen. Ohne Anschlüsse haben die SM8-Gehäuse Breiten von 3,5 mm und Längen von 6,5 mm. Das Raster der Anschlüsse beträgt 1,53 mm. Die Lage der Sensorchips im Gehäuse ist ebenfalls eingezeichnet.

zeichnet.

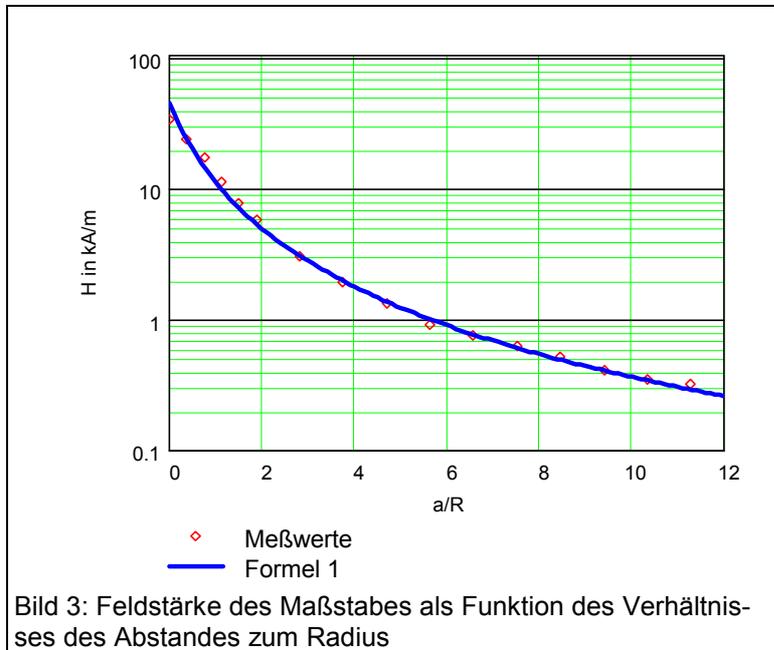
Die Sensoren LK 15 und LK 28 unterscheiden sich in der Form und Größe der die Widerstände bildenden magnetoresistiven Bereiche und in der benötigten Chipgröße (s. Datenblätter). Die schmalen Leiterstreifen des LK 28 führen dazu, daß eine geringere Chipfläche benötigt wird. Allerdings ist für diesen Sensor die erforderliche Mindestfeldstärke höher. Um den Winkelfehler des Sensors LK 28 unter ein Grad zu bringen, ist eine Feldstärke von etwa 10 kA/m anzulegen. Um denselben Fehler zu unterschreiten, ist für den LK 15 eine Feldstärke von 3 kA/m ausreichend.

3. Dimensionierung des Maßstabes und des Sensorabstandes

Da die magnetoresistiven Winkelsensoren bestimmte Mindestfeldstärken benötigen und die Stärke des vom kreisförmigen Maßstab erzeugten Magnetfeldes mit dem Abstand sinkt, ergeben sich für die verwendbaren Durchmesser der Maßstäbe und für die Abstände der Sensoren von der Maßstabsoberfläche Einschränkungen. Für einen runden Maßstab aus kunststoffgebundenem Ferrit wurde die Feldstärke in unterschiedlichen Abständen zur Maßstabsoberfläche gemessen. Die Ergebnisse zeigt Bild 3. Ist die Länge des Maßstabes groß gegen seinen Durchmesser, kann die Abhängigkeit der Feldstärke vom Verhältnis des Abstandes a zum Radius R des Maßstabes angegeben werden mit

$$H(a, R) \cong \frac{H_0}{(a+R)^2 / R^2} \quad (1)$$

mit H_0 als der Feldstärke auf der Oberfläche. Bild 3 zeigt die gute Übereinstimmung der gemessenen und nach Formel 1 berechneten Werte ($H_0 = 44 \text{ kA/m}$). Es zeigt sich, daß die An-



wendung eines LK 28, der Feldstärken von mehr als 10 kA/m benötigt, bis zu einem Abstand möglich ist, der dem Radius des Maßstabes entspricht. Der Sensor LK 15 kann bis zum dreifachen Wert des Radius benutzt werden. Es muß darauf hingewiesen werden, daß der Abstand neben der Strecke, die das Sensorgehäuse von der Maßstabsoberfläche entfernt ist, auch noch die halbe Chipab-

messung in dieser Richtung enthält.

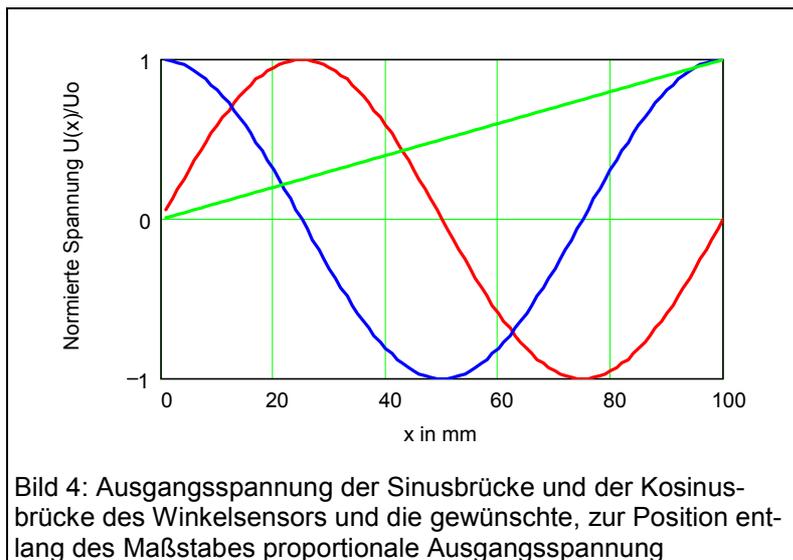
Große Abstände sind bei großen Radien des Maßstabes möglich. Es besteht auch noch die Möglichkeit, die Feldstärke durch Einsatz von Materialien mit höherer Remanenz zu erhöhen. So sind die Feldstärken bei Einsatz von gesintertem Ferrit etwa um den Faktor 1,5 höher, kunststoffgebundenes SmCo liefert um den Faktor 2 höhere Feldstärken, bei reinen SmCo-Magneten liegt der Erhöhungsfaktor bei 4 und im Falle von NdFeB bei etwa 5. Der Preis der Materialien steigt mit zunehmender Remanenz stark an. Die Herstellung der Maßstäbe ist bei Materialien mit höherer Remanenz aufwendiger.

Beim Aufbau des Meßsystems ist darauf zu achten, daß der Maßstab gegen Verdrehung gesichert sein muß und daß die Führung des Sensors bei Verschiebung in Meßrichtung gegenüber dem Maßstab eine Winkelveränderung ausschließt, denn jede Winkeländerung führt in diesem Fall zu einem Fehler der Längenangabe.

4. Beispiele für Auswerteschaltungen

4.1 Einsatz des integrierten Schaltkreises UZZ 9000

Die genannten Sensoren liefern an den entsprechenden Ausgängen Spannungen, die dem Sinus und dem Kosinus des doppelten Winkels zwischen Magnetfeldrichtung und Sensor-kante proportional sind. Wird ein Maßstab, wie in Bild 1 b gezeigt, so hergestellt, daß der Winkel seiner Magnetisierungsrichtung gegenüber der Senkrechten über die gesamte Maßstablänge (beispielsweise 100 mm) linear mit der Position zunimmt und am Ende des Maß-

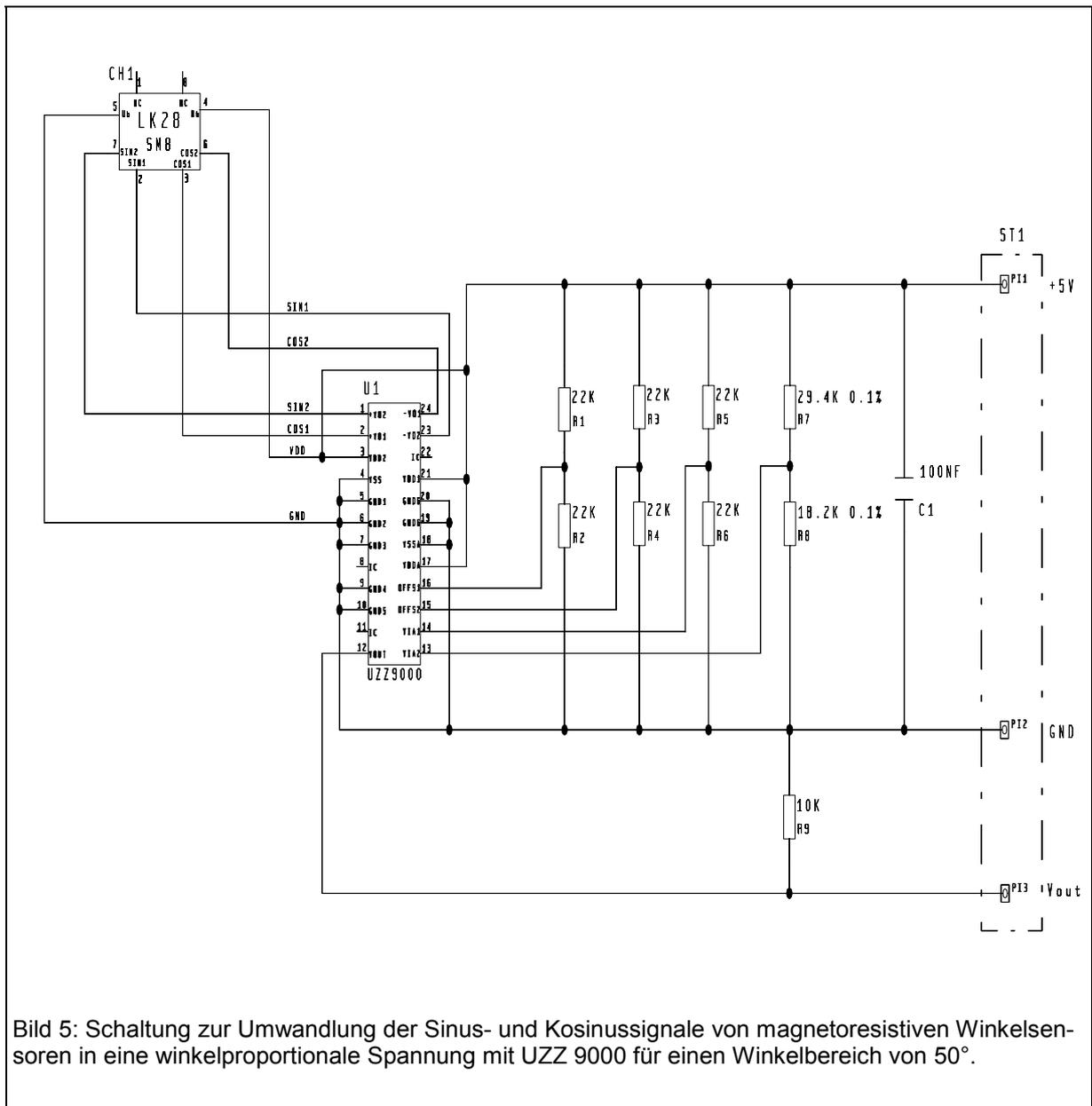


stabs um 180° gegenüber der Richtung am Anfang verdreht ist, liefern die Sinusbrücke und die Kosinusbrücke des magnetoresistiven Winkelsensors über der gesamten Länge des Maßstabes gerade jeweils eine vollständige Signalperiode (Bild 4). Für die Umwandlung der Werte dieser beiden periodischen Funktionen in das ge-

wünschte, zur Position entlang des Maßstabes proportionale Ausgangssignal des Meßsystems gibt es mehrere Möglichkeiten. Ein Beispiel wird mit der in Bild 5 gezeigten Schaltung gegeben.

Die Umwandlung der Sinus- und Kosinussignale der magnetoresistiven Winkelsensoren in eine winkelproportionale Spannung wird hier in dem eigens zu diesem Zweck entwickelten ASIC UZZ 9000 der Firma Philips Semiconductors vorgenommen (Informationen unter <http://www-us.semiconductors.philips.com/pip/UZZ9000>). Durch eine präzise vorgegebene Spannung an Pin 13 wird der Meßbereich des UZZ 9000 eingestellt. Es sind Meßbereichswerte von 30° bis 180° in 10°-Schritten für die Drehung des Magnetfeldes am Winkelsensor möglich. Da die magnetoresistiven Winkelsensoren Winkelfunktionen des doppelten Wertes des Winkels liefern, kann also maximal eine volle Periodenlänge des Sinus und Kosinus verarbeitet werden. Im in Bild 5 gezeigten Beispiel ist die Schaltung für einen Meßbereich von 50° dimensioniert. Da an die Genauigkeit der Einstellspannung für den Meßbereich hohe Ansprüche gestellt werden, sind Widerstände mit Widerstandstoleranzen von 0,1% zu verwenden. Mit den Spannungsteilern an Pin 15 und 16 können die Offsetspannungen der Sinus- bzw. der Kosinusbrücke des magnetoresistiven Winkelsensors abgeglichen werden. Durch die Spannung an Pin 14 kann die Ausgangsgerade des UZZ 9000 um bis zu $\pm 2,5\%$ der Versorgungsspannung in beide Richtungen verschoben werden, wodurch auch eine Offsetanpassung des ASIC-Ausganges durchführbar wird.

Der Arbeitstemperaturbereich des UZZ 9000 liegt zwischen -40°C und $+150^{\circ}\text{C}$. Solange die Mindestfeldstärken nicht unterschritten werden, führt sowohl die Abnahme der Magnetfeldstärke des Maßstabes als auch die Abnahme der Signalamplitude der magnetoresistiven Winkelsensoren mit steigender Temperatur in diesem Temperaturbereich nicht zu einer Beeinflussung des Ausgangssignales, da für die Messungen nur die Feldrichtungen und nicht die Feldstärken von Bedeutung sind.



4.2 Einsatz von magnetoresistiven Winkelsensoren mit geregelter Betriebsspannung

Das Funktionsprinzip der Schaltung ist in Bild 6 dargestellt. Der magnetoresistive Winkelsensor enthält eine Sinus- und eine Kosinusbrücke. Zum Signalverstärker gelangt die Ausgangsspannung der Sinusbrücke. Der Ausgang der Kosinusbrücke ist mit dem Regelverstärker verbunden. Ein dritter Verstärker dient der Erzeugung der Referenzspannung, die durch ein Widerstandsverhältnis $R_5/R_6 = 1$ auf den halben Wert der Betriebsspannung eingestellt wird. Der vierte Verstärker sorgt dafür, daß die Betriebsspannung der Brücken stets symmetrisch zur halben Betriebsspannung liegt. Damit liegt auch die Ausgangsspannung des Signalverstärkers bei einem Winkel von 0° zwischen der Chipkante des Sensorchips und der Magnetfeldrichtung bei der halben Betriebsspannung. Die Widerstände R_2 und R_3 dienen der Einstellung der Verstärkung des Signalverstärkers und damit des Spannungswertes des gesamten Meßbereiches.

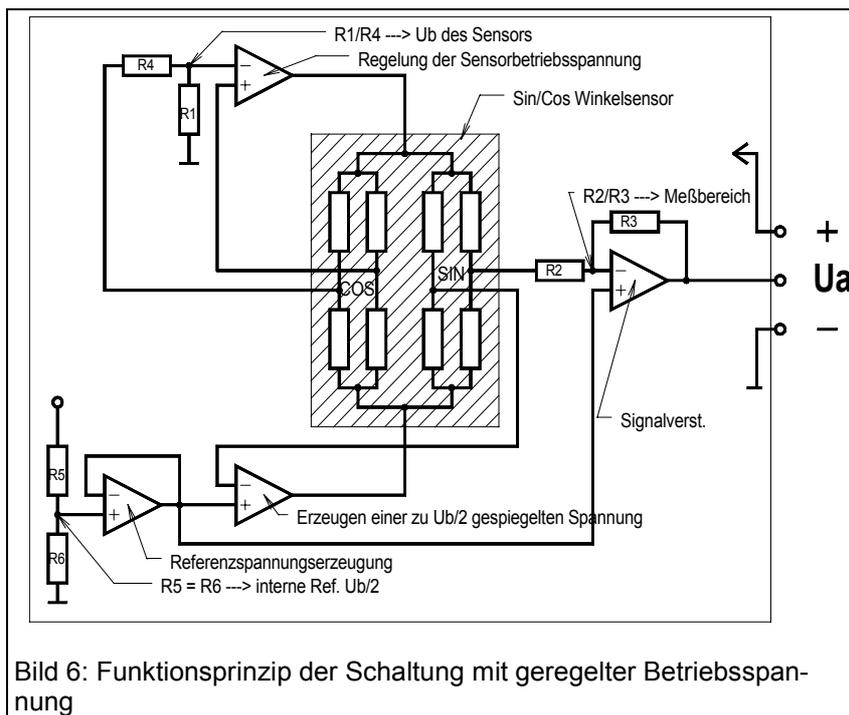


Bild 6: Funktionsprinzip der Schaltung mit geregelter Betriebsspannung

Im Bild 7 zeigt Kurve 1 den Verlauf der Ausgangsspannung der Sinusbrücke bei konstanter Betriebsspannung über dem Winkel zwischen Sensorkante und Magnetfeldrichtung. Kurve 3 gibt die Abhängigkeit der an den Brücken anliegenden Betriebsspannung bei wirksamer Regelung wieder. Die Regelung hält die Ausgangsspannung der Kosinusbrücke auf einem

konstanten Wert, der nur durch die Widerstände R_1 und R_4 bestimmt ist. Der Verlauf der Kurve 3 kann deshalb durch $U_b/U_0 = (\cos 2\alpha)^{-1}$ wiedergegeben werden. Die Ausgangsspannung der Kosinusbrücke würde bei konstanter Betriebsspannung nicht nur mit steigendem Winkel sondern auch wegen der Temperaturabhängigkeit des magnetoresistiven Effektes bei steigender Temperatur abnehmen. Vorteilhafterweise werden auch diese Änderungen durch die Regelung aufgehoben und machen sich in einer zusätzlichen Erhöhung der Betriebsspannung bemerkbar. Dem entspricht in der Formel ein mit der Temperatur steigendes U_0 . Die Ausgangsspannung U_a der gesamten Schaltung ist durch die Kurve 2 gegeben. Sie entspricht dem Tangens des doppelten Winkels zwischen Sensorkante und Magnetfeldrichtung ($\tan 2\alpha$) und ist bei geregelter Betriebsspannung der Brücken unabhängig von der Temperatur und hat ihren Nullpunkt bei der Hälfte der Betriebsspannung der Schaltung.

Die Nichtlinearität der Ausgangsspannung bezüglich des Winkels der anliegenden Magnetfeldrichtung kann beim Längenmeßsystem mit einem runden Maßstab, bei dem der Winkel der Magnetisierungsrichtung sich mit Fortschreiten in Meßrichtung kontinuierlich vergrößert, bezüglich der Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Position x einfach beseitigt und durch eine lineare Zuordnung ersetzt werden. Dazu ist nur eine Abhängigkeit des Winkels von der Position x zu wählen, die diese Linearisierung bewirkt. Im vorliegenden Fall ist die Funktion $\alpha(x) = \frac{1}{2} \cdot \text{atan}(x/(L/4))$ bei der Magnetisierung des Maßstabes zu realisieren, dessen Gesamtlänge sich von $x = -L/2$ bis $x = +L/2$ erstreckt.

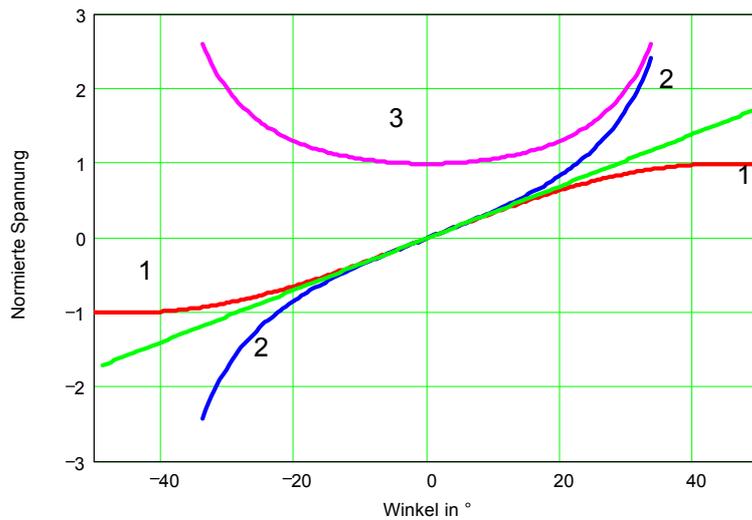


Bild 7: Verlauf von Spannungen der Schaltung nach Bild 6

Die für einen Winkelbereich von insgesamt 60° dimensionierte Schaltung zeigt Bild 7. Es wird der Vierfach-OP TLC279 verwendet. An die Widerstände werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Untersuchungen zur Genauigkeit des gesamten Längenmeßsystems wurden bisher

nicht durchgeführt. Das verwendete Meßprinzip und die verwendete einfache Schaltung, die mit minimalem Aufwand realisiert werden kann, sprechen jedoch dafür, daß es sich hier um ein Meßsystem handelt, das bei geringem Preis zum Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen geeignet ist, aber von begrenzter Präzision ist.

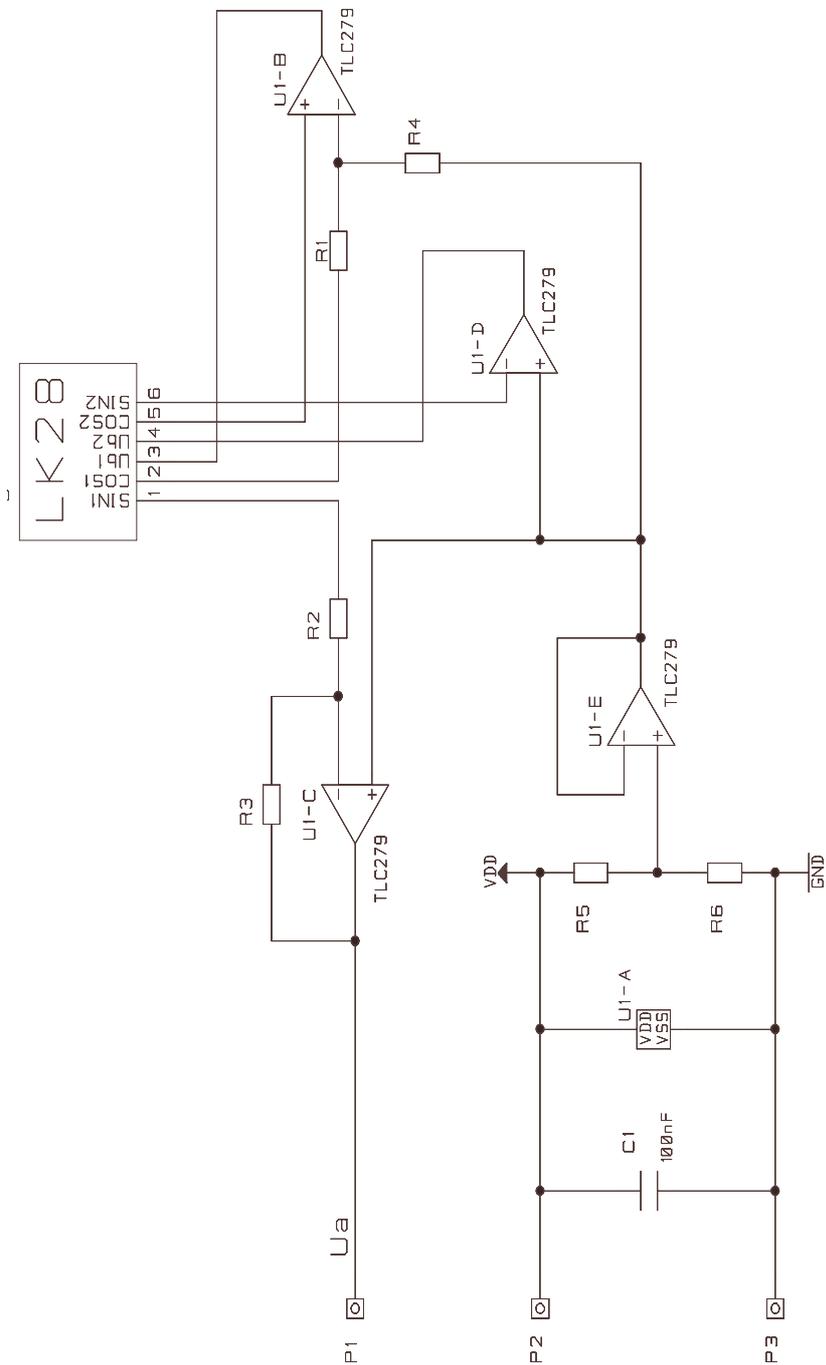
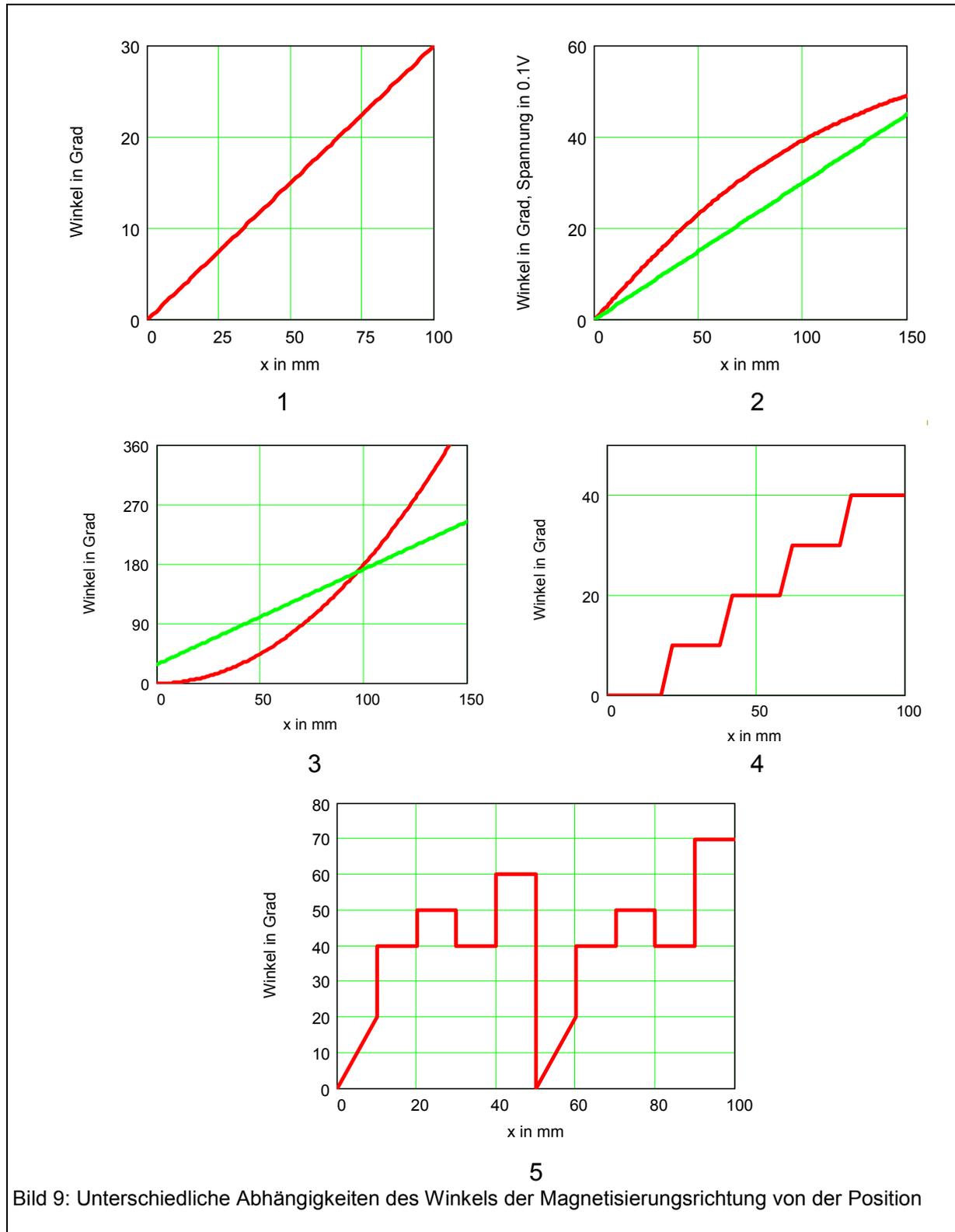


Bild 8: Magneto-resistiver Winkelsensor LK 28 in Auswerteschaltung mit geregelter Betriebsspannung. $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 43 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 620 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 10 \text{ k}\Omega$, Winkelbereich $\pm 30^\circ$.

5. Nutzung unterschiedlicher Magnetisierungsverläufe der Maßstäbe

Wie Bild 1c zeigt, ist es möglich, den magnetischen Maßstab im Bereich beliebig langer Abschnitte in beliebiger Richtung in der Querschnittsebene zu magnetisieren. Beispiele für unterschiedliche Abhängigkeiten des Winkels der Magnetisierungsrichtung zur Senkrechten in Bild 1 von der Position x wurden schon im Zusammenhang mit der Beschreibung der Aus-



werteschalungen genannt. Im einfachsten Fall wächst der Winkel linear mit der Position in x-Richtung an, wie Bild 9, 1 zeigt. Die Messung des Winkels mit den magnetoresistiven Winkelsensoren LK 15 bzw. LK 28 führt zu Sinus- und Kosinuswerten, die beispielsweise mit dem ASIC UZZ 9000 in eine analoge Spannung überführt werden, die der Position x proportional ist.

Bild 9, 2 zeigt eine Abhängigkeit des Winkels, die dem Arcustangens der Position x entspricht. Die Messung des Winkels der Feldrichtung mit den Winkelsensoren LK 15 bzw. LK 28 und deren Auswertung mit der im Abschnitt 4.2 beschriebenen Schaltung liefert eine Spannung, die dem Tangens des Winkels entspricht. Mit der dargestellten Verteilung der Winkel über der Position x ergibt sich eine zur Position proportionale Spannung, wie die im Bild 9, 2 eingezeichnete Gerade zeigt.

Eine quadratische Zunahme des Winkels der Magnetisierung mit der Position zeigt Bild 9, 3. Werden an einem solchen Maßstab mit einer Länge von etwa 150 mm in einem Abstand in x-Richtung von 40 mm zwei Winkelsensoren angebracht und die Differenz der Winkel der Feldrichtungen an den Orten der beiden Sensoren gebildet, so ergibt sich die eingezeichnete Gerade. Man erhält also wieder ein linear mit der Position x anwachsendes Ausgangssignal. In diesem Meßsystem darf der runde Maßstab beliebig verdreht sein, da es nur auf die Differenz der beiden Winkelwerte am Ort der in konstantem Abstand bewegten Sensoren ankommt.

Bild 9, 4 zeigt, wie durch eine treppenstufenförmige Abhängigkeit des Winkelwertes von der Position bestimmten Positionsbereichen konstante Spannungswerte zugeordnet werden können. Zwischen den konstanten Spannungswerten gibt es innerhalb einer Übergangsbreite aber noch Zwischenwerte.

Ein Ausschnitt aus einem sehr langen Maßstab ist in Bild 9, 5 dargestellt. Der Maßstab ist in jeweils 50 mm lange Bereiche unterteilt, die eine Zahl mit vier Stellen über eine Länge von 40 mm enthält und einen Abschnitt von 10 mm, in dem der Winkel linear mit der Position anwächst. Für die Stellen der Zahlen wird ein vierwertiger Code verwendet. Ein Winkel von 40° entspricht einer „0“, 50° sind der „1“ zugeordnet, 60° bedeutet „2“ und 70° ist der „3“ equivalent. Der Zahlenwert steigt mit zunehmender Position in jedem folgenden Bereich um 1 an. Neben dem Maßstab sind in Abständen von jeweils 5 mm in x-Richtung insgesamt zehn Winkelsensoren angeordnet. Damit stehen in beliebiger Position jeder Stelle der Zahl und dem linearen Abschnitt jeweils zwei Sensoren gegenüber. Zwei Sensoren pro Stelle sind erforderlich, um zu vermeiden, daß bei ungünstiger Position nicht nur Übergangswerte zwischen den Codewerten erhalten werden. Von den beiden Sensoren, die dem linearen Abschnitt gegenüberstehen, wird derjenige ausgewählt, dessen Meßwert dem mittleren Winkel des Abschnittes (10°) am nächsten ist. Dazu werden dann nur die um ganze 10 mm von diesem oder voneinander entfernten Sensoren zur Ermittlung der Codewerte ausgelesen. Aus den Codewerten wird die eingeschriebene Zahl und damit die Grobposition gewonnen. Der

Winkelwert des Sensors für den analogen Abschnitt dient der Korrektur der Grobposition. Wird beispielsweise eine Meßgenauigkeit von 2° erreicht, kann die Position auf 1 mm genau ermittelt werden. Die vierstellige Zahl mit den jeweils vier Codewerten in jeder Stelle erlaubt es, 256 Positionen voneinander zu unterscheiden. Da jede Position eine Länge von 50 mm hat, ist eine Gesamtmeßlänge von 12,8 m möglich. Bei der Herstellung des Maßstabes entstandene Positionsfehler sind zusätzlich zu berücksichtigen.

Die angeführten Verteilungen der Magnetisierungswinkel des Maßstabes entlang der Position sind Beispiele zur Erläuterung der Anwendungsmöglichkeiten ohne jeden Anspruch auf Vollständigkeit.