

A8.3

Hochauflösende Absolutpositionsmessung mit magnetoresistiven Längenmeßsensoren

U. Loreit, F. Dettmann, Institut für Mikrostrukturtechnologie und Optoelektronik, Im Amtmann 6, 35578 Wetzlar, Tel. 06441/71054, Fax. 06441/77181

Abstract

Any application of methods for absolute position measurement known from optical gauges to magnetic systems is impeded by the strong local variations of the magnetic field strength produced by the encoded information. Starting from a theoretical evaluation of distance dependency of the magnetic field strength arising from a track being magnetized in an irregular manner, a new measurement system for absolute position using magnetoresistive length gauges is presented. Information about a specialized method for position encoding is given. This new type of encoding is based on just two magnetic tracks. One of these tracks is magnetized periodically, while the second track carries the magnetic pattern of a position code. The sensor structure developed for reading both tracks is integrated into a chip $1.7 \times 3.6 \text{ mm}^2$ in size. It makes possible to construct a length measurement system with a resolution of better than 10 nm at a total measured length of 1000 mm. The system can be used in temperatures up to 150°C and will operate in stray fields up to 10 mT without any problem.

Kurzfassung

Die Übertragung der bei optischen absoluten Längenmeßsystemen bekannten Verfahren auf magnetische Längenmeßsysteme erfordert die Berücksichtigung der starken Ortsabhängigkeit der Feldstärke der magnetisch codierten Information. Ausgehend von der theoretischen Betrachtung der Abstandsabhängigkeit der Feldstärkeverteilung an einer unregelmäßig magnetisierten Spur wird ein neues absolutes Längenmeßverfahren mit einem neuen Längenmeßsensor auf magnetoresistiver Basis und einer speziell dafür entwickelten Codierung vorgestellt. Dazu werden lediglich zwei Magnetspuren benötigt, eine davon ist periodisch magnetisiert, die andere enthält das Magnetmuster des Codes. Die zur Abtastung beider Spuren entwickelte Sensorstruktur ist auf einem Chip von $1,7 \times 3,6 \text{ mm}^2$ integriert. Mit diesem Sensor ist es möglich, ein Längenmeßsystem aufzubauen, das Auflösungen von weniger als 10 nm bei einem Meßweg von 1000 mm erreicht, bis 150°C einsetzbar ist und durch magnetische Störfelder bis zu 10 mT nicht störbar ist.

1. Einleitung

Es bestand die Aufgabe, ein möglichst kleines, kostengünstiges, absolutes Längenmeßsystem auf magnetoresistiver Basis zu realisieren. Die Hauptkostenanteile sind dabei die Preise der Sensoren, der Maßstäbe und der Auswertelektronik, sowie die Montagekosten. Um die Kosten der Sensoren niedrig zu halten, ergab sich für die Sensorentwicklung die Forderung nach einer geringen Sensorchipgröße, die im wesentlichen die Chipkosten bestimmt. Um minimale Montagekosten zu erreichen, wurde ein Verfahren gesucht, das möglichst geringe Anforderungen an die Justage von Sensor und Maßstab stellt. Die Übertragung der Absolutcodierverfahren aus der optischen Längenmessung /1/ auf magnetische Systeme erweist sich als sehr problematisch. Die Verfahren, die die Ortsinformation in einer größeren Anzahl von Spuren enthalten, würden durch die Anzahl der notwendigen Sensoren und die damit verbundene Chipfläche oder den Justageaufwand bei Einzelsensormontage zu hohen Systemkosten führen. Verfahren, die mit einer Spur und darin codierter Ortsinformation arbeiten, erscheinen für eine integrierte magnetoresistive Sensorlösung besser geeignet. Die vorgesehene Anordnung von Magnetmaßstab und Sensor ist in Bild 1 zu sehen. Die verwendeten Sensorelemente sind magnetfeldabhängige Dünnschichtwiderstände, die ihren Widerstand infolge des anisotropen magnetoresistiven Effektes ändern. Für diese Anordnung werden im 2.

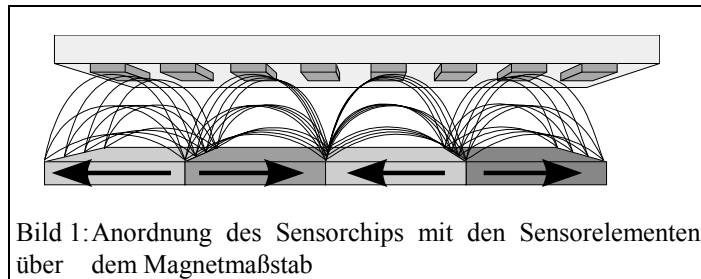


Bild 1: Anordnung des Sensorchips mit den Sensorelementen über dem Magnetmaßstab

Abschnitt einige theoretische Betrachtungen dargestellt. Bei einem gleichmäßigen magnetischen Muster mit gleichgroßen Pollängen sind die Positionen der Nullpunkte der magnetischen Feldstärke unabhängig vom Abstand zum Maßstab und somit für eine hochgenaue Ortsbestimmung geeignet. Aus dieser Sicht schien ein Verfahren, das mit der Kombination einer periodischen Spur und mit einer parallelen Codespur arbeitet am besten zur Lösung der gestellten Aufgabe geeignet zu sein. Bei der Erarbeitung des neuen Sensorkonzeptes wurde auch berücksichtigt, daß der Einfluß äußerer Störmagnetfelder so gering wie möglich gehalten wird. Das neue Sensorkonzept bildet die Voraussetzung für die hochgenaue Positionsbestimmung in der periodischen Spur. Durch eine neuartige Codierung kann dieses Sensorkonzept auch zur Abtastung des Codes in der zweiten Spur verwendet werden.

2. Ergebnisse der Simulation

Zunächst werden Ergebnisse vorgestellt, aus denen sich die Grenzen der Anwendbarkeit der bekannten Arctan- Interpolationsverfahrens bei Verwendung von zwei um ein Viertel der Periodenlänge gegeneinander verschobener Sensoren abschätzen läßt.

Bild 2 zeigt die Abstandsabhängigkeit der Ausgangsspannungsamplitude eines magnetoresistiven (MR) Sensors an einem Maßstab mit einem Polwechselabstand von 100μ

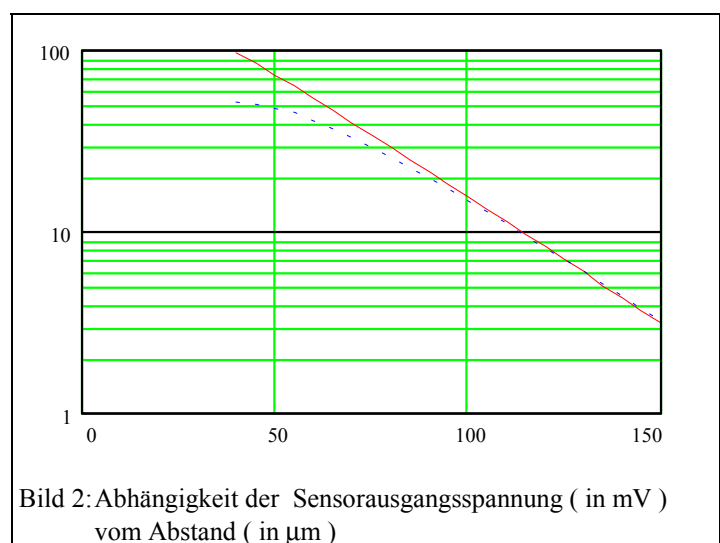


Bild 2: Abhängigkeit der Sensorausgangsspannung (in mV) vom Abstand (in μ)

m auf einer 10 μm dicken Magnetschicht für einen idealen linearen Magnetsensor und einen realen MR- Sensor. Es ist deutlich zu sehen, daß in dem Abstandsbereich von $< 100 \mu\text{m}$, in dem Signalspannungsamplituden über 10 mV erreicht werden, die Unlinearität der Sensorkennlinie zu berücksichtigen ist. Zu beachten ist außerdem noch ein abstandsabhängiger Fehler, der sich aus der Abweichung der Feldstärkeverteilung von der Sinusform ergibt. Das ist in Bild 3 dargestellt. Diese beiden Fehlerkomponenten wachsen mit Verringerung des Abstandes, der eigentlich wegen der großen

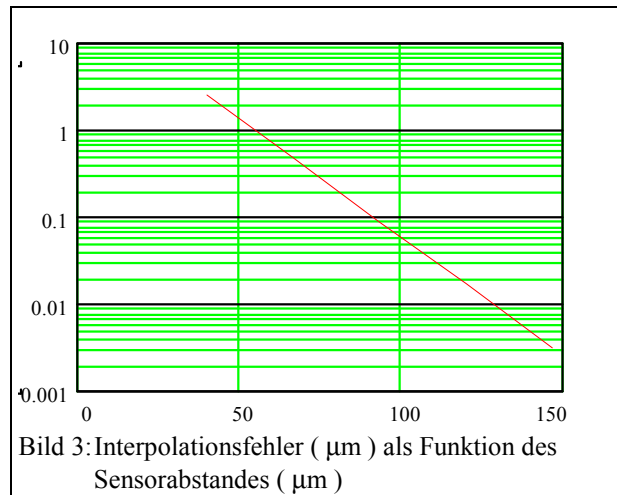


Bild 3: Interpolationsfehler (μm) als Funktion des Sensorabstandes (μm)

Signalamplituden wünschenswert wären. Die einzigen Stellen, die bei einer regelmäßigen Magnetstruktur von der Sensorkennlinie und Abstand Maßstab-Sensor unabhängig sind, sind die Nullstellen des Magnetfeldes. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wurde ein neues Interpolationsverfahren und ein dazugehöriger Sensor entwickelt. Diese werden im Abschnitt 3 vorgestellt

Sind die Magnetpolabstände auf dem Maßstab nicht mehr gleichmäßig, wie es bei einer codierten Spur unabdingbar ist, so ergibt sich sogar eine Abstandsabhängigkeit der Nullstellenlage. In Bild 4 ist das Simulationsergebnis der Magnetfeldverteilung in verschiedenen Sensorabständen für ein unregelmäßiges Magnetmuster dargestellt. Der verwendete Ausschnitt einer längeren Magnetspur ist Teil der in einem späteren Abschnitt beschriebenen Codierung. Die starke Abhängigkeit der Lage der Nulldurchgänge bei verschiedenen Sensorabständen ist klar erkennbar. Eine genaue Positionsbestimmung aus den Nullstellen eines Muster mit ungleichen Magnetisierungslängen ist also ausgeschlossen, wenn mit einer Abstandstoleranz gearbeitet werden soll. Für die Abtastung eines solchen unregelmäßigen Magnetmusters wurde ebenfalls eine Sensorstruktur entwickelt, welche im Abschnitt 5 vorgestellt wird.

3. Neue magnetoresistive Sensorstruktur zur Abtastung periodischer Magnetstrukturen

Bild 5 zeigt die prinzipielle Anordnung dieser neuen Lösung für periodische Magnetstrukturen. Der Sensor enthält eine Anzahl von magnetoresistiven Halbbrücken, die innerhalb einer Periode des magnetischen Maßstabes in einem gleichmäßigen Raster angeordnet sind, so daß die beiden zu einer Halbbrücke gehörenden Widerstände

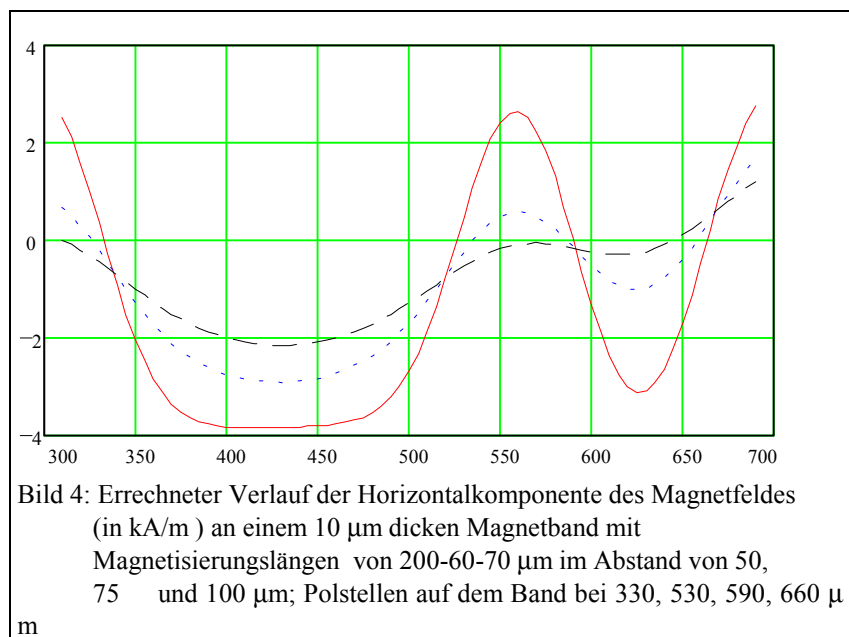


Bild 4: Errechneter Verlauf der Horizontalkomponente des Magnetfeldes (in kA/m) an einem $10 \mu\text{m}$ dicken Magnetband mit Magnetisierungslängen von $200\text{-}60\text{-}70 \mu\text{m}$ im Abstand von $50, 75$ und $100 \mu\text{m}$; Polstellen auf dem Band bei $330, 530, 590, 660 \mu\text{m}$

jeweils einen Phasenversatz von 180° haben. In der oberen Hälfte des Bildes 6 ist die Anordnung von drei Halbbrücken auf einem Sensorchip bezüglich des Verlaufes der Magnetfeldstärke eines Maßstabes zu sehen. Die untere Bildhälfte zeigt, wie eine dieser

Halbbrücken über drei Perioden der Magnetisierung erweitert wird. Diese Erweiterung verringert den Einfluß der statistischen Ungenauigkeiten des Magnetisierungsmusters und erhöht den Sensorinnenwiderstand.

Nach diesem Aufbauprinzip wurde ein Sensorchip für eine Maßstabsperiode von $160\ \mu\text{m}$ realisiert. Es enthält in einem Raster von $10\ \mu\text{m}$ acht magneto-resistive Halbbrücken, die sich über 8 Perioden der Magnetisierung erstrecken. Jede Sensorhalbbrücke besteht aus 16 mit gleicher Barberpolstruktur versehenen magneto-resistiven Streifen. Es sind also insgesamt 128 Streifen von $5\ \mu\text{m}$ Breite auf einem Sensorchip der Größe $1,8 \times 2,2\ \text{mm}^2$ untergebracht. Dieser Sensor hat die Bezeichnung LK 6. Da diese Sensorstruktur auch ein Teil des absoluten Längensensors ist, wird das Layout erst im letzten Abschnitt komplett dargestellt.

Entstanden ist ein magneto-resistiver 8-Kanalsensor mit einem Abtastraster von $10\ \mu\text{m}$ für ein Magnetmuster mit einer Periodenlänge von $160\ \mu\text{m}$, der über 8 Maßstabsperioden mittelt.

Durch eine Abfrage der 8 Sensorkanäle erhält man ein Abbild des Magnetfeldes über eine halbe Periodenlänge des dem Sensor gegenüberstehenden Maßstabs. Die graphische Darstellung des Ergebnisses eines solchen Meßvorganges ist in Bild 7 zu sehen. Die Meßergebnisse in Bild 7 wurden bei einer Betriebsspannung von $5\ \text{V}$ am Sensor gewonnen. Die Sensorausgangsspannungen sind in V angezeigt. Zur Ermittlung der Position des Sensorchips gegenüber dem Maßstab ist es notwendig, die genaue Lage des Nulldurchganges des magnetischen Feldes zu finden. Dieses geschieht im einfachsten Fall durch lineare Interpolation zwischen den Ausgangssignalen der beiden Sensoren, die sich in unmittelbarer Nähe des Nulldurchganges befinden.

Es ist zu sehen, daß in der Nähe des Nulldurchganges eine Signalsteilheit von etwa $10\ \text{mV} / 10\ \mu\text{m}$ vorhanden ist. Daraus sind mit relativ geringem Aufwand Auflösungen unter $10\ \text{nm}$ erreichbar. Messungen der Nullpunktstabilität des LK 6 ergaben einen Temperaturkoeffizienten der Sensoroffsetspannung von weniger als $0,2\ \mu\text{V}/\text{V}\cdot\text{K}$, welcher zu einem sensorbedingten Längenfehler von $1\ \text{nm}/\text{K}$ führen würde. Der von der Sensorjustage abhängige Längenfehler wird in Bild 8 dargestellt. Die Meßgenauigkeit des Sensors wird durch eine Verdrehung des Chips gegen die Maßstabsrichtung nur gering beeinflußt, da durch den geringen Sensorabstand die scheinbare Sensorverkürzung, die über die \cos -Funktion eingeht, nur gering ist. Die große Nullpunktstabilität und geringe Störbarkeit der Ausgangsspannungen wird durch die völlige Gleichheit aller Sensorelemente erreicht. Eine Aussteuerung der Einzelsensoren kann nur durch eine an den Sensor angepaßte

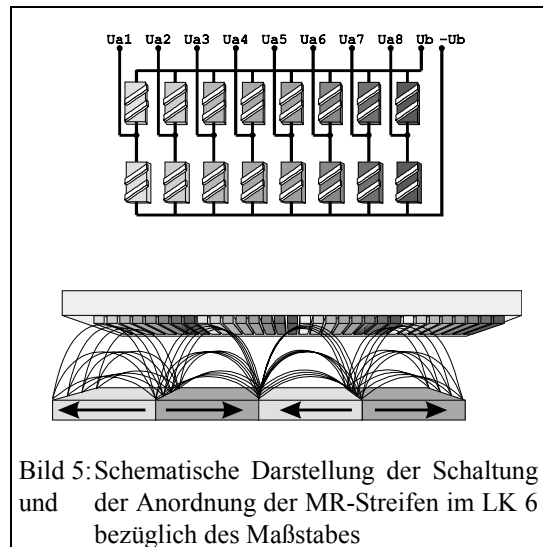


Bild 5: Schematische Darstellung der Schaltung und der Anordnung der MR-Streifen im LK 6 bezüglich des Maßstabes

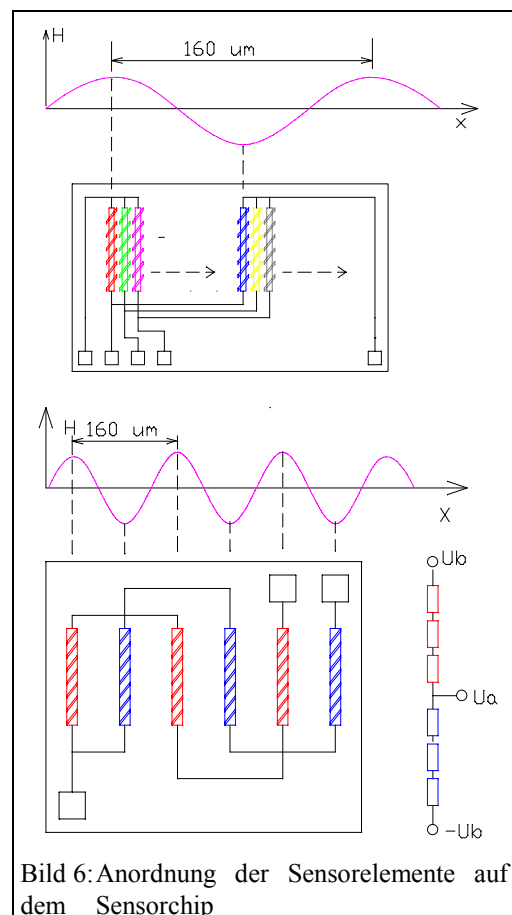


Bild 6: Anordnung der Sensorelemente auf dem Sensorchip

große Nullpunktstabilität und geringe Störbarkeit der Ausgangsspannungen wird durch die völlige Gleichheit aller Sensorelemente erreicht. Eine Aussteuerung der Einzelsensoren kann nur durch eine an den Sensor angepaßte

Magnetstruktur erfolgen. So ist es mit diesem Sensor sinnvoll mit Interpolationsfaktoren von mehr als 20000 zu arbeiten.

4. Neues Codierungskonzept für magnetische Maßstäbe

Aus den Untersuchungen am Sensor LK 6 läßt sich ableiten, daß die Voraussetzung für ein störarmes Auslesen die Differenzabtastung ist. Bei einer Magnetspur mit Codierung ist es deshalb notwendig, daß ein magnetisches Muster in einem definierten Abstand mit entgegengesetzter Polarität wiederholt wird. In dem hier diskutierten Beispiel ist die absolute Information über die Position in den Längen von 3 magnetisierten Bereichen (A, B und C) enthalten. Die ungerade Anzahl führt dazu, daß bei Wiederholung der 3 Bereiche diese eine entgegengesetzte Magnetisierung erhalten. Um diesen Code mit einem speziellen Sensor abtasten zu können, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- $A + B + C = \text{konstant}$ (im Beispiel: $330 \mu\text{m}$)
- A, B und C haben gequantelte Längen (im Beispiel: $10 \mu\text{m}$ Raster)
- Dieselbe Bereichslängenteilung wird mindestens einmal wiederholt
- Beim Übergang zur nächsten Information sind nur Längenveränderungen um ein Raster erlaubt
- Es gibt eine kleinste Pollänge (im Beispiel: $50 \mu\text{m}$)
- Ein Bereich ist erkennbar (im Beispiel: A ist immer am längsten)

In Bild 9 ist ein Codeverlauf dargestellt der diese Bedingungen erfüllt. Bei der Verwendung eines Coderaster von $5 \mu\text{m}$ anstelle der $10 \mu\text{m}$ wären statt der dargestellten 50 etwa 200 Positionen unterscheidbar. Für die Erkennung einer solchen Codierung müssen die Positionen der Nulldurchgänge des Magnetfeldes bestimmt werden. Die Längen A, B und C ergeben sich als Differenz der Positionen der Nulldurchgänge. Wie aus Bild 4 zu erkennen, sinken damit die Toleranzen der Sensorführung beträchtlich ab.

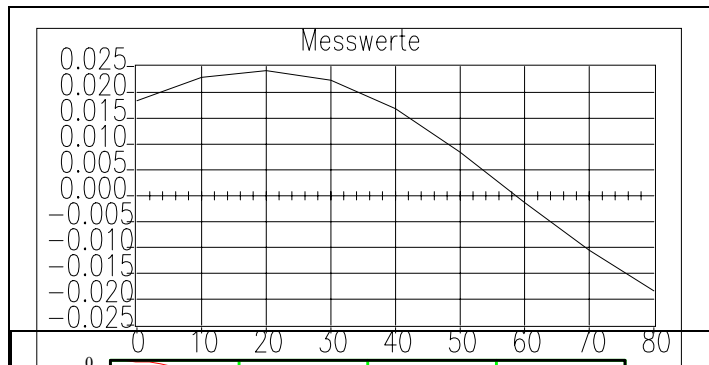


Bild 7: Beispiel des Verlaufes der Ausgangsspannungen der 8

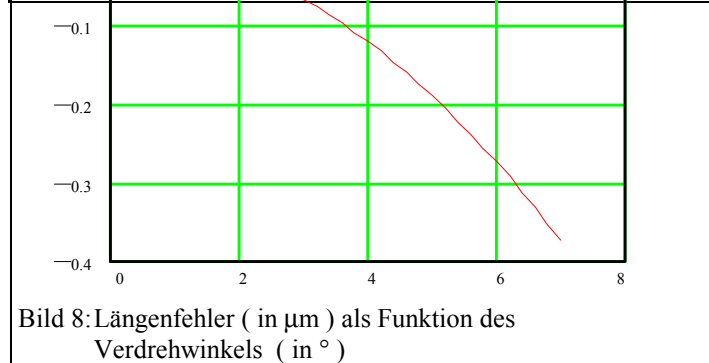


Bild 8: Längenfehler (in μm) als Funktion des Verdrehwinkels (in $^\circ$)

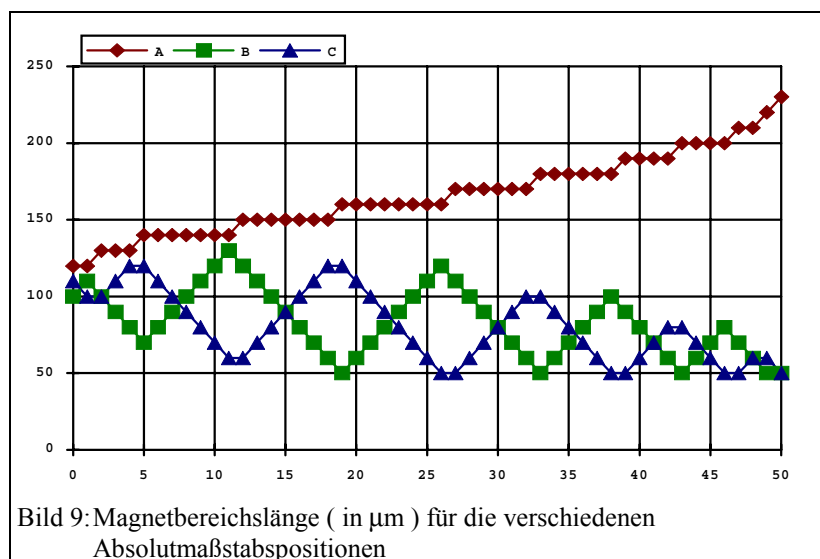


Bild 9: Magnetbereichslänge (in μm) für die verschiedenen Absolutmaßstabpositionen

5. Sensorkonzept zur Codespurabtastung

Zur Erkennung der Längen der magnetischen Bereiche der Codespur werden, wie schon bei dem im Abschnitt 3 vorgestellten Chip LK 6, magnetoresistive Halbbrücken verwendet. Eine Verteilung über mehrere magnetische Perioden ist dabei allerdings wegen der wechselnden Magnetisierungslängen nicht möglich. Die Anordnung der Sensorstreifen bezüglich der Codespur ist in Bild 10 zu erkennen. Bild 11 zeigt die Magnetisierungsrichtungen, den Magnetfeldverlauf und die relative Lage der entsprechenden Sensorelemente. Wie schon bei dem im Abschnitt 3 vorgestellten Sensorchip werden hier zur Codeerkennung auch 8 Sensorhalbbrücken eingesetzt. Dieser Sensor zur Codeerkennung wurde, um hohe Meßgenauigkeiten zu erreichen, mit einem Sensor hoher Auflösung nach Absatz 3 für eine periodische Spur von 160 μm Periodenlänge kombiniert. Da der Codespur auch eine Codeelementlänge von 660 μm zugeordnet ist, ergibt sich für die Absolutcodierung aus dem Versatz zwischen beiden Spuren noch eine weitere Ortsinformation. Man kann also jede der 50 Codekombinationen nach Bild 9 acht Mal verwenden, wenn der Versatz zwischen dem Anfang der Codekombination, dem Bereich A und dem Beginn der Periodenlänge der anderen Spur mit ausgewertet wird. Damit erreicht man einen Gesamtmeßbereich von $8 \times 50 \times 660 \mu\text{m} = 264 \text{ mm}$. Für die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist nur die periodische Spur entscheidend. Zur sicheren Erkennung und Auflösung des ortsabhängigen Codes ist in diesem dargestellten Beispiel für die Magnetisierungslängen der Codespur lediglich eine Meßgenauigkeit von 10 μm notwendig. Bei der Verwendung eines Coderasters von 5 μm würde sich ein Gesamtmeßweg von über 1 m ergeben. Zur Verbesserung der Codeerkennung ist es möglich nicht nur die Magnetisierungslängen, sondern auch den gesamten Signalverlauf der acht Sensorhalbbrücken in die Auswertung einzubeziehen. Damit ist man in der Lage, den Abstand des Sensors zum Maßstab zu ermitteln. Mit Kenntnis des Abstandes ist die Sicherheit der Codeerkennung auch bei größeren Abstandstoleranzen gegeben. Für bestimmte Meßanwendungen ist auch die Messung des Abstandes zwischen Sensor und Maßstab als zweite Koordinate interessant /3/.

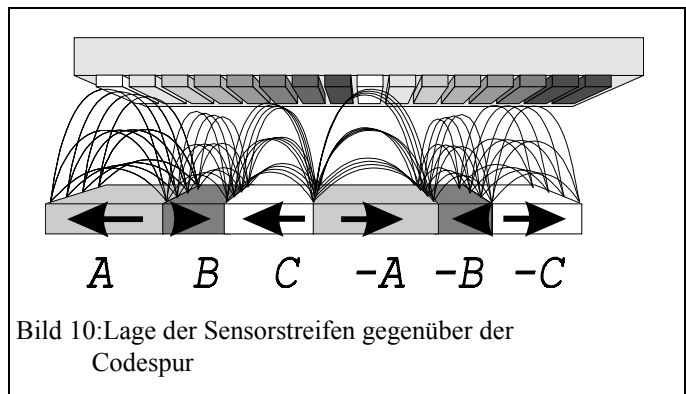


Bild 11 zeigt die Magnetisierungsrichtungen, den Magnetfeldverlauf und die relative Lage der entsprechenden Sensorelemente. Oben ist ein Diagramm des Magnetfeldverlaufs H über der Codespur x dargestellt. Die Codespur ist in Bereiche A, B, C, \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} unterteilt, die eine Periodenlänge von 660 μm aufweisen. Darunter ist die Anordnung der acht Sensorstreifen dargestellt, die über magnetoresistive Halbbrücken verbunden sind. Die Streifen sind farblich markiert (rot, grün, magenta, blau, gelb, grau) und sind über dem Magnetfeldverlauf positioniert.

Bild 11: Lage der Sensorstreifen bezüglich dem Magnetfeldverlauf

6. Aufbau des Sensorchips

Bild 12 zeigt einen Überblick über das Chiplayout des magnetoresistiven Längenmeßsensors LK 7. Es sind deutlich zwei Bereiche zu erkennen. Die magnetoresistive Streifenstruktur in der unteren Chiphälfte dient der Abtastung der, mit einer Periodenlänge von $160\ \mu\text{m}$, periodisch magnetisierten Spur. Schaltungsmäßig ist dieser Teil dem in Abschnitt 3 vorgestellten LK 6 identisch. In diesem Sensorbereich sind 8 magnetoresistive Halbbrücken mit Barberpolstruktur integriert. Die Anzahl der vom Sensor erfaßten Perioden beträgt 6. In der oberen Chiphälfte befindet sich die Sensorstruktur, die die Abtastung der im Abschnitt 4 beschriebenen Codespur übernimmt. Auch dieser Teil enthält acht magnetoresistive Halbbrücken mit Barberpolstruktur. Ein im Bild 12 gekennzeichnete Ausschnitt der Sensorstruktur ist in Bild 13 dargestellt. Zu erkennen sind hier die Barberpolstruktur und die Verbindungen der magnetoresistiven Schichtstreifen über Durchkontaktierungen. Für alle 16 im Chip integrierten Sensorhalbbrücken sind Bereiche zum Trimmen der Offsetspannung mittels Laser vorhanden. Die Länge der magnetoresistiven Schichtstreifen beträgt $900\ \mu\text{m}$. Sie stimmt mit der abgetasteten Spurbreite überein. Der Abstand der beiden Sensoren auf dem Chip liegt bei $600\ \mu\text{m}$. Bei einem Maßstabspurabstand von $400\ \mu\text{m}$

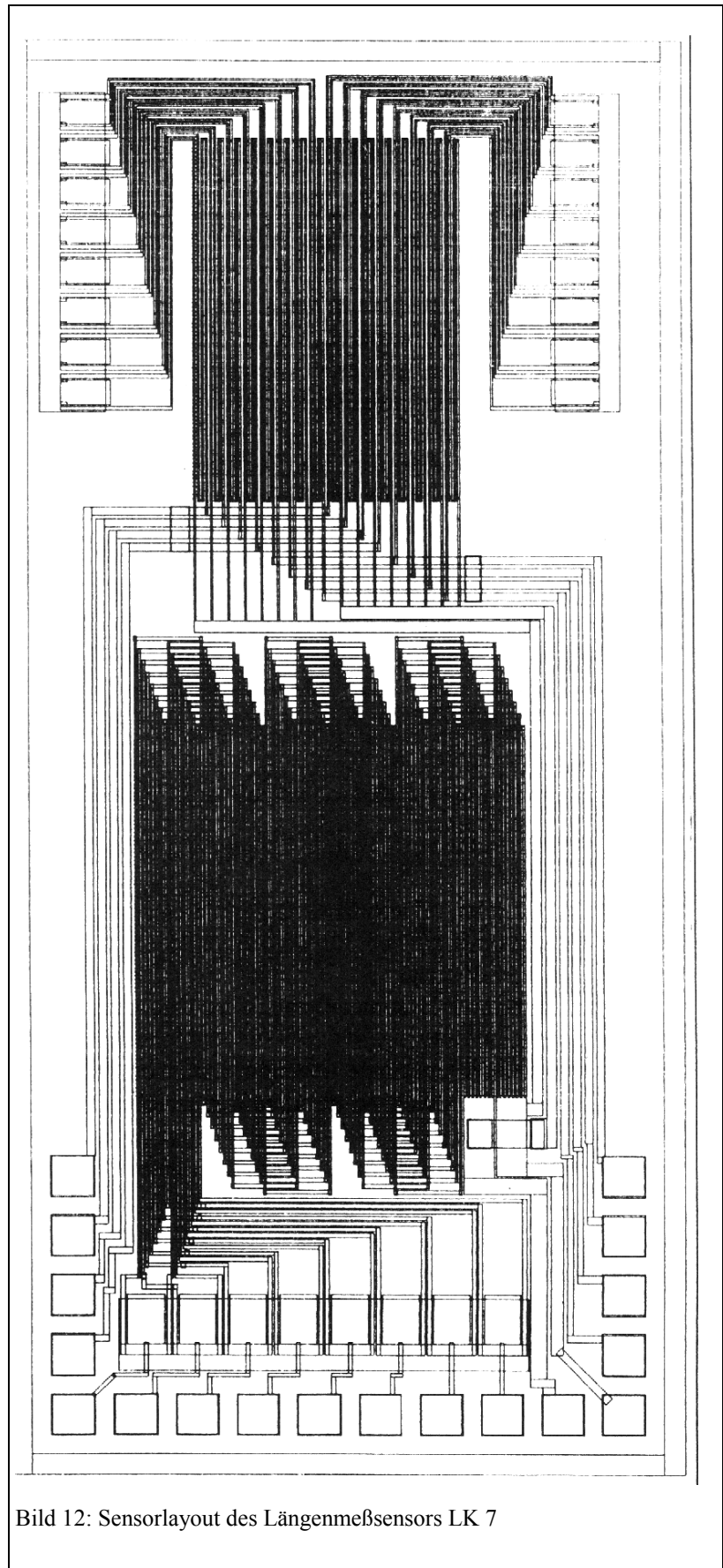


Bild 12: Sensorlayout des Längenmeßsensors LK 7

m ist damit ein Justagespielraum von $\pm 100\ \mu\text{m}$ vorhanden. Der Sensorarbeitsabstand liegt im Bereich von $75 \pm 25\ \mu\text{m}$, wobei ein Codespurraster von $10\ \mu\text{m}$ zugrunde gelegt ist. Eine mit der Vergrößerung des Arbeitsabstandes verbundene relative Verkürzung der kleineren

Magnetbereiche kann natürlich durch ein entsprechendes Beschreiben der Maßstabsstruktur korrigiert werden. Die Winkeljustage des LK 7-Sensorchips gegenüber der Maßstabsrichtung erfordert eine höhere Genauigkeit als die des Sensors LK 6, welche aus der Darstellung in Bild 7 abgeleitet werden kann. Für den LK 7 ist es notwendig, daß der Versatz zwischen den Sensorelementen für die beiden Spuren unter $\pm 10 \mu\text{m}$ bleibt um den Code fehlerfrei zu erkennen. Bei Anwendung einer Softwarekorrektur ist auch ein größerer Versatz zulässig, wenn er innerhalb des aufgebauten Meßsystemes nicht mehr geändert wird.

Mit dem Längenmeßsensor LK 7 lassen sich absolute Längenmeßsysteme mit Auflösungen unter 10 nm realisieren bei denen die Forderungen an die Justage und mechanische Fertigungstoleranzen relativ gering sind. Durch die Integration aller Sensorelemente in ein Chip mit Positionsfehlern unter $0,1 \mu\text{m}$ wird die Meßgenauigkeit des Gesamtsystemes von der Maßstabspräzision bestimmt.

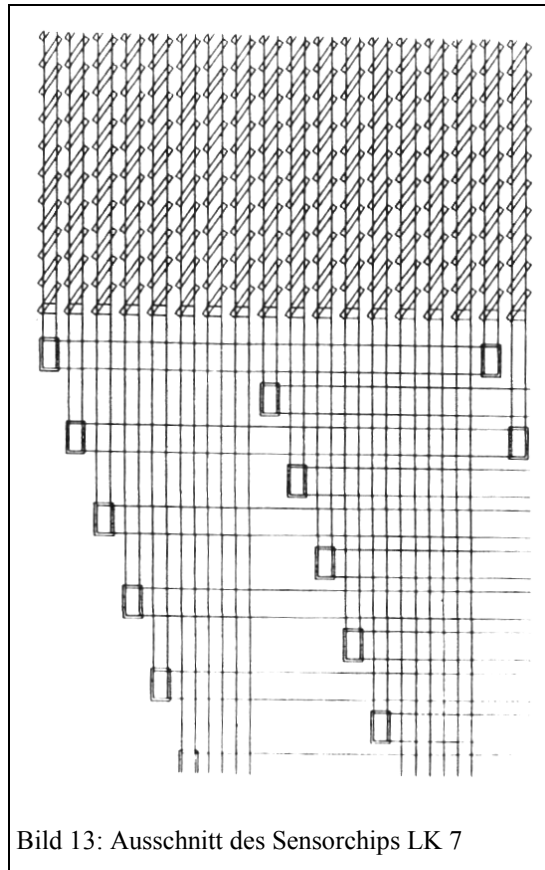


Bild 13: Ausschnitt des Sensorchips LK 7

/1/ Alfons Ernst, "Digitale Längen und Winkelmeßtechnik", verlag moderne industrie, 1991

/2/ U. Loreit, F. Dettmann, "Neuartige magnetoresistive Längenmeßelemente und Längenmeßkonzept für nm-Auflösungen", 2. Symposium "Magnetoresistive Sensoren" 18.3.93 Wetzlar

/3/ H. Kellner, "Raummaßstab in der Koordinatenmeßtechnik", Kontrolle, Juni 1991, 6-10