

Dr. Fritz Dettmann, Dipl.-Phys. Uwe Loreit
Institut für Mikrostrukturtechnologie und Optoelektronik
Im Amtmann 6, 35578 Wetzlar, 06441/978830

Magneto-resistiver Sensor mit großen Einbautoleranzen zur inkrementalen und absoluten Längenmessung

1. Einleitung

2. Aufbau des inkrementalen Meßsystems und des Längensensorchips

- 2.1 Geometrische Zuordnung
- 2.2 Erläuterung der Grundfunktion
- 2.3 Anordnung der Einzeistrukturalelemente

3. Diskussion systematischer Fehler

- 3.1 Fehler bei rechteckiger Magnetisierung des Maßstabes
- 3.2 Fehler bei sinusförmiger Magnetisierung des Maßstabes

4. Anwendbarkeit des Sensors für die Absolutlängenmessung

- 4.1 Mögliche Varianten
- 4.2 Meßsystem mit zwei Spuren unterschiedlicher Periodenlänge

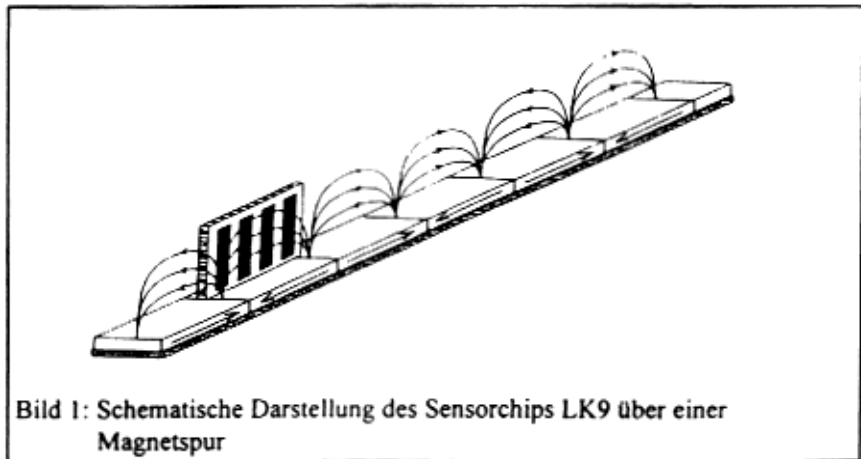
Magneto-resistiver Sensor mit großen Einbautoleranzen zur inkrementalen und absoluten Längenmessung

Dr. Dettmann, Fritz und Loreit, Uwe, Institut für Mikrostrukturtechnologie und Optoelektronik, 35578 Wetzlar, Im Amtmann 6

1. Einleitung

Die wesentlichen Bestandteile inkrementaler Längenmeßsysteme nach dem magnetischen Wirkprinzip sind periodisch magnetisierte Maßstäbe und zwei um ein Viertel der Periodenlänge gegeneinander versetzt angeordnete Magnetfeldsensoren. Als letztere werden wegen ihrer hohen Magnetfeldempfindlichkeit zur Zeit am Markt erhältliche magneto-resistive Sensoren verwendet. Die Sensorausgangssignale werden zur Zählung der Periodenzahl, um die sich der Maßstab gegenüber den Sensoren ausgehend von einer Ausgangsposition bereits verschoben hat und auch für die Interpolation zur Ermittlung der höher aufgelösten Position innerhalb einer Periodenlänge benutzt. Die fehlerfreie Positionsbestimmung durch Interpolation setzt oberwellenfreie sinusförmige Sensorausgangssignale als Funktion der Positionsordinate voraus. Die Signale der bisher verwendeten Sensoren weisen hier erhebliche Abweichungen auf.

Ein neu entwickeltes Sensorchip, daß in dieser Arbeit vorgestellt werden soll, enthält beide für die Signalgewinnung notwendigen magneto-resistiven Einzelsensoren. Für die genaue Lage der Einzelsensoren gegeneinander garantiert die hohe Präzision der zur Herstellung eingesetzten Mikrostrukturtechnologie. Die magneto-resistiven Schichtstreifen der Sensorelemente wurden so dimensioniert und auf dem Chip angeordnet, daß trotz der exponentiell mit dem Abstand vom Maßstab abnehmenden Magnetfeldstärke über einen beträchtlichen Abstandsbereich eine abstandsunabhängige Signalamplitude erhalten wird. Homogene Störmagnetfelder haben in einem weiten Bereich keinen Einfluß auf das Meßergebnis. Die realisierten Sensoren sind an eine Maßstabsperiode von 5 mm angepaßt. Sie können bis zu Temperaturen von 150 °C eingesetzt werden. Im folgenden werden zunächst der Aufbau des Magnetmaßstabes und die Funktion der Längensensoren erläutert. Danach werden Meßergebnisse vorgestellt und diskutiert.



2. Aufbau des inkrementalen Meßsystems und des Längensensorchips

2.1 Geometrische Zuordnungen

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der inkrementalen Längenmeßanordnung. Der Maßstab besteht aus auf einem weichmagnetischen Träger aufgebrachtem hartmagnetischen Material. In gleichmäßigen Abständen *ist* das Material abwechselnd in positiver und negativer Längsrichtung des Maßstabes bis zur Sättigung magnetisiert. Die Länge eines Bereiches mit

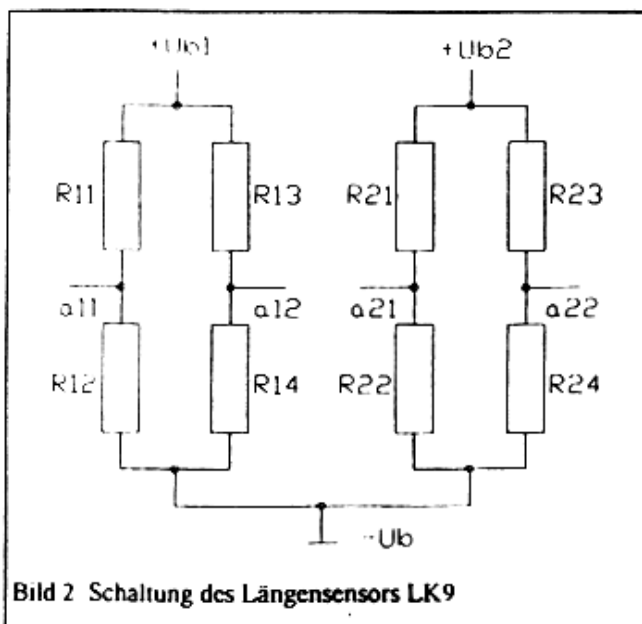
gleicher Magnetisierungsrichtung, im folgenden Polteilung genannt, beträgt im realisierten System 5 mm. Der Verlauf des Magnetfeldes über dem Maßstab ist schematisch durch entsprechende Feldlinien dargestellt. Über dem Maßstab ist ein Sensorchip eingezeichnet. Seine Chipebene steht auf der Maßstabsebene senkrecht und erstreckt sich in Maßstabs längsrichtung. Damit wirken auf magnetoresistiven Schichtstreifen, die sich auf dem Chip befinden, sowohl die x-Komponente als auch die y-Komponente des Magnetfeldes. Die magnetoresistiven Schichtstreifen stehen ebenfalls senkrecht zur Maßstabsoberfläche. Wie in Bild 1 erkennbar, sind Schichtstreifen in vier Flächenstücken angeordnet, die jeweils um ein Viertel der Polteilung gegeneinander verschoben sind.

2.2 Erläuterung der Grundfunktion

Die magnetoresistiven Schichtstreifen sind schwache Dauermagneten, deren Magnetisierungsrichtung ohne äußere Beeinflussung in Längsrichtung der Streifen zeigt. Ihr Widerstand wird durch den Winkel bestimmt, der jeweils zwischen der Stromrichtung, die mit der Streifenlängsrichtung übereinstimmt, und der Magnetisierungsrichtung eingestellt ist. Die Magnetisierungsrichtung liegt immer in der Schichtebene. In dieser stellt sie sich stets in Richtung des auf die Schichtstreifen einwirkenden Magnetfeldes ein, wenn von der geringen Eigenanisotropie der Schichtstreifen abgesehen wird. Der Widerstand eines Streifens kann durch die Beziehung

$$R(\varphi) = R_0 + \Delta R/2 \cdot \cos(2\varphi) \quad (1)$$

angegeben werden. Dabei ist R_0 der Mittelwert des Widerstandes des Streifens, ΔR ist die maximale Widerstandsänderung (der Widerstandshub), die durch ein Magnetfeld bewirkt werden kann und φ ist der Winkel zwischen der senkrecht nach oben zeigenden Streifenlängsrichtung und der jeweiligen, durch das Magnetfeld des Maßstabes bestimmten Magnetisierungsrichtung in den Schichtstreifen. Das Verhältnis des Widerstandshubes zum



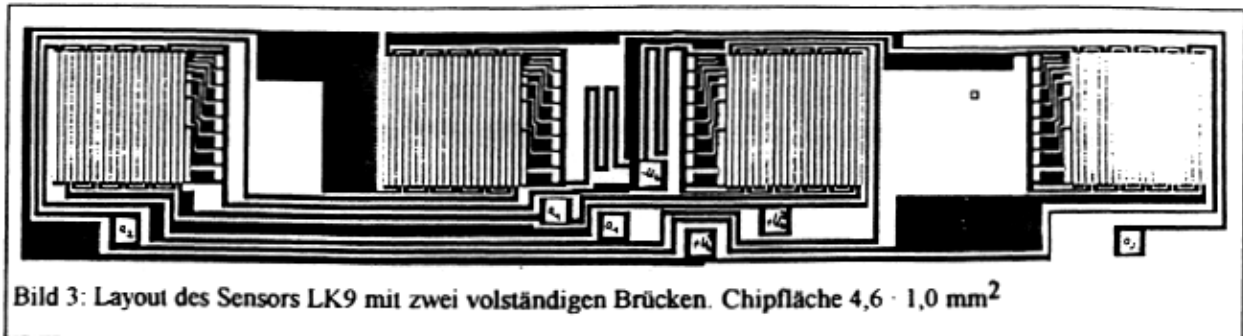
Widerstandsmittelwert liegt für die einsetzbaren magnetischen Schichtmaterialien bei wenigen Prozent. Gleichung (1) zeigt, daß der Widerstand der Streifen harmonisch vom Winkel zwischen Streifenlängsrichtung und Magnetfeldrichtung abhängt und daß wegen des Faktors 2 im Argument der Cosinusfunktion ein bestimmtes Magnetfeld und das genau entgegengesetzt gerichtete (also um 180° gedrehte) zum gleichen Ergebnis führen. Daraus ergibt sich, daß der Widerstandswert eines magnetoresistiven Schichtstreifens sich bei Bewegung über dem Magnetmaßstab in der Meßrichtung harmonisch ändert und zwar mit einer Periodenlänge, die mit der Polteilung übereinstimmt. Für das Ausgangssignal von Widerstands-

brücken, die aus solchen magnetoresistiven Schichtstreifen zusammengesetzt sind, gilt selbstverständlich entsprechendes.

2.3. Anordnung der Einzelelemente

Zur inkrementalen Längenmessung wird üblicherweise ein Sinussignal und ein Cosinussignal der Ortskoordinate des Maßstabes benötigt. Beim magnetoresistiven Längensensor LK9

werden diese beiden Signale als Ausgangsspannungen von zwei aus magnetoresistiver Schichtstreifen aufgebauten Wheatstone-Brücken erhalten (Bild 2). Der Gesamtaufbau des LK9 ist in Bild 3 dargestellt. In vier mit einem Mittenabstand von einem Viertel der Polteilung angeordneten Flächen sind die Widerstände der beiden Brücken R_{11} bis R_{24} untergebracht. Jeder Widerstand besteht aus der gleichen Anzahl einzelner zu einem Mäander verbundenen



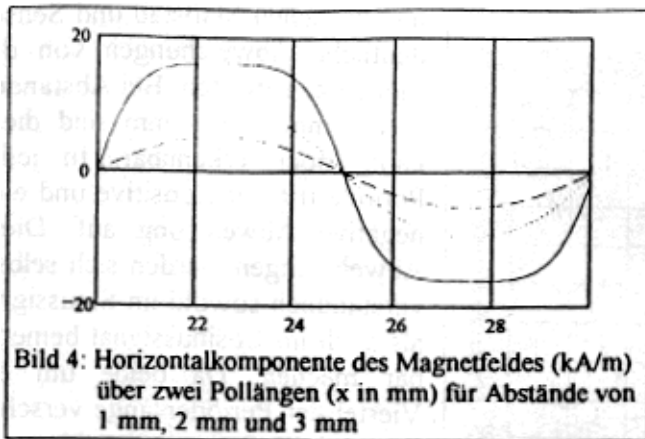
Schichtstreifen. In der ersten Fläche von links befinden sich die Widerstände R_{11} und R_{14} . Die dritte Fläche wird von den Widerständen R_{12} und R_{13} eingenommen. Die Streifen der Einzelwiderstände sind dabei jeweils paarweise abwechselnd nebeneinander angeordnet. Auf diese Weise wird von den beiden Widerständen einer Fläche im Mittel über dem Maßstab stets dieselbe Magnetfeldrichtung wahrgenommen. In der ersten und der dritten Fläche stehen die vom Maßstab erzeugten Magnetfelder senkrecht aufeinander. Da nach Gleichung (1) der Widerstandswert der Streifen mit der doppelten Empfindlichkeit auf die Richtungsänderungen reagiert, ändern sich die Widerstände in jedem Brückenweig gerade gegenläufig (um 180° versetzt), so daß die Spannungsamplitude der Brückenausgangsspannung maximal ist. Entsprechendes gilt für die zweite Brücke, deren Widerstände sich in der zweiten und vierten Fläche befinden. Beide Brücken werden über getrennte Bondflächen ($+U_{b1}$ und $+U_{b2}$) bei gemeinsamer Masse ($-U_b$) mit Betriebsspannung versorgt. Die Ausgangsspannung der ersten Brücke liegt an den Kontaktflächen a_1 , die der zweiten an den Kontaktflächen a_2 .

Die gemeinsame Nutzung jeder Fläche durch zwei Widerstände ist die Voraussetzung dafür, daß beide Brücken auf einer Gesamtbreite untergebracht werden können, die kleiner als die mit der Polteilung übereinstimmende Periodenlänge ist. Ohne diese Maßnahme wäre die benötigte Chipfläche doppelt so groß. Die Länge der magnetoresistiven Streifen wurde einmal wegen der geringen Chipfläche und andererseits zur Gewährleistung eines möglichst geringen Abstandes zwischen Maßstabsoberfläche und Chip auf einem kleinen Wert gehalten.

Neben den vier Flächen mit den magnetoresistiven Schichtstreifen sind im Bild 3 Strukturen für den Abgleich der Nullspannung der beiden Brücken ohne Magnetfeldeinfluß vorhanden.

Der Aufbau der Widerstände der Brücken aus völlig gleichen Schichtstreifen gleicher Längsrichtung ist die Voraussetzung dafür, daß homogene Magnetfelder zu keinem Sensorausgangssignal führen. Damit ist eine gewisse Störfeldunempfindlichkeit des Längenmeßsystems trotz seines magnetischen Wirkprinzips von vornherein gegeben. Die Anordnung der gesamten Sensorstruktur für die beiden Signale der inkrementalen Längenmessung auf einem Chip mit der hohen Positioniergenauigkeit der Mikrotechnologie, die bei Millimeterabmessungen nur Längenabweichungen im Bereich von $0,1 \mu\text{m}$ zuläßt, sorgt dafür, daß Längenfehler des Meßsystems, die dadurch bedingt sind, auf jeden Fall gegenüber den Fehlern der Maßstäbe und der gegenseitigen Positionierung vernachlässigbar sind.

Wie oben bereits dargestellt, sind die Ausgangsspannungen der beiden Brücken harmonische Funktionen des Winkels zwischen der Längsrichtung der magnetoresistiven Streifen und deren Magnetisierung, die im wesentlichen durch die Richtung des Magnetfeldes des Maßstabes gegeben ist. Sollen die Ausgangsspannungen der Brücken auch harmonische Funktionen der Ortskoordinate des Maßstabes sein, so ist dafür Voraussetzung, daß der Winkel der Magnetfeldrichtung des Maßstabes sich linear mit der Ortskoordinate ändert. Nur für diesen



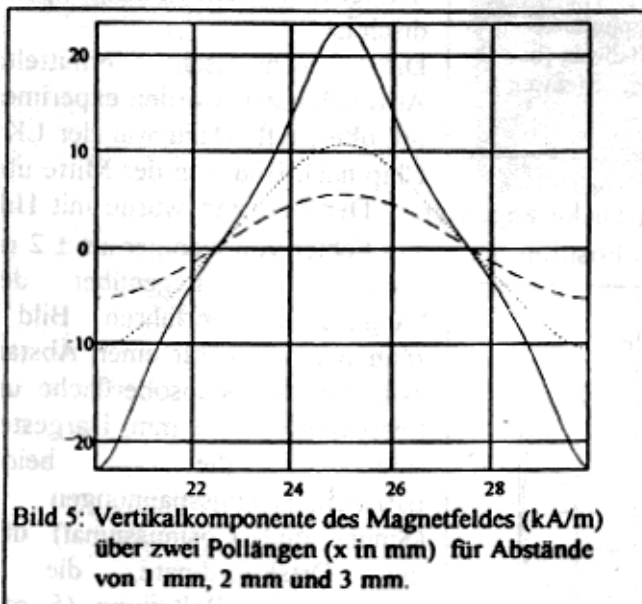
Fall führt die Anwendung der bekannten Arcustangens-Interpolation zu fehlerfreien Ergebnissen für die gemessene Position.

3. Diskussion systematischer Fehler

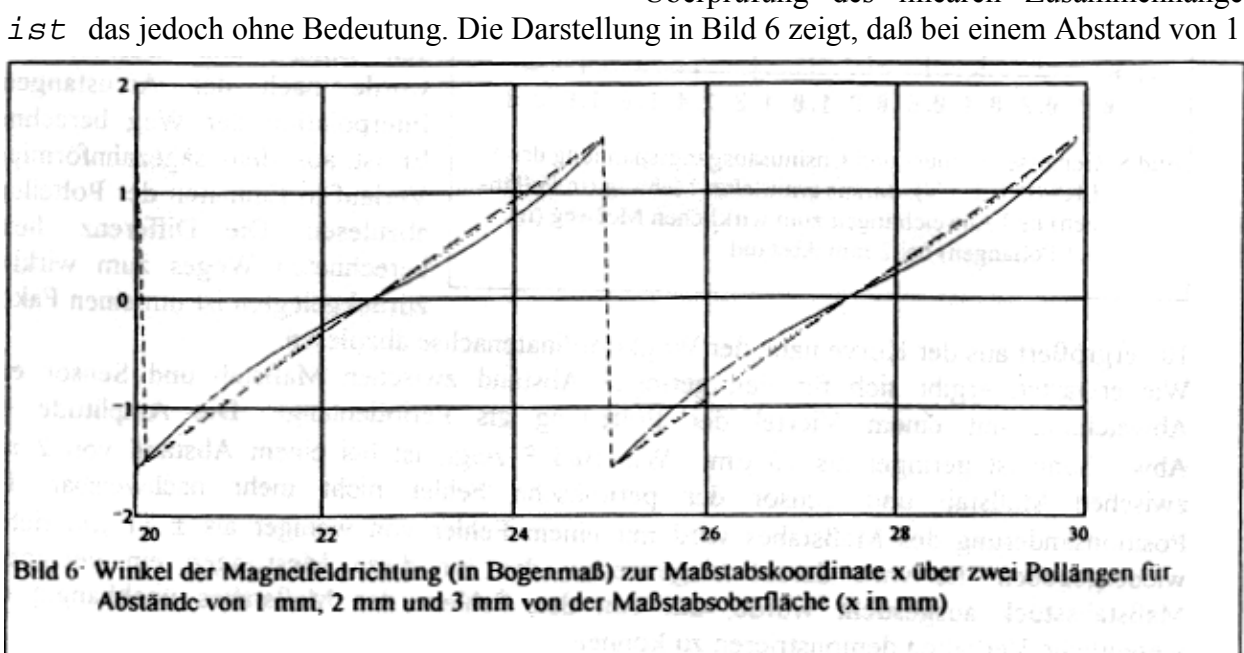
3.1 Fehler bei rechteckiger Magnetisierung des Maßstabes

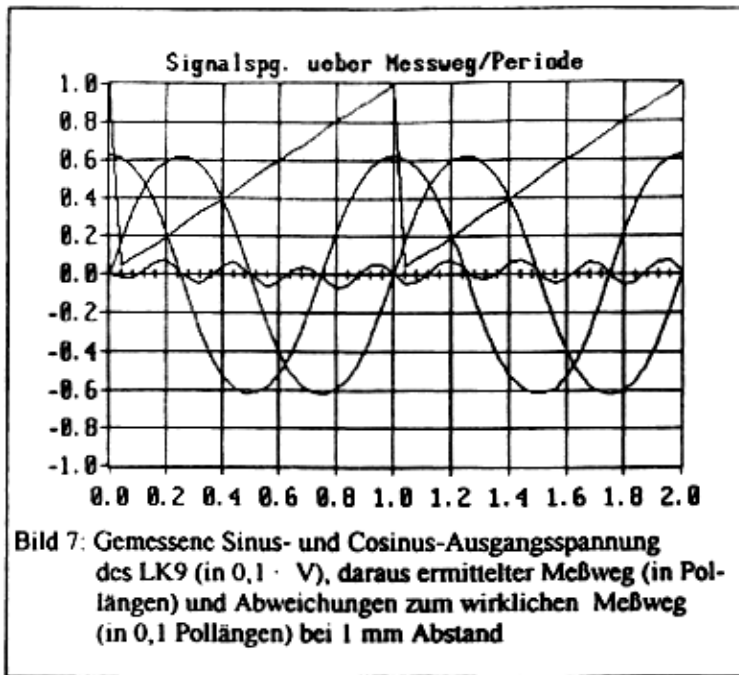
Es wurde rechnerisch überprüft, ob der lineare Zusammenhang zwischen dem Winkel der Magnetfeldrichtung und der Ortskoordinate besteht. Ausgehend von einem Modell, das die Oberflächenströme der bis zur Sättigung magnetisierten Maßstabsbereiche berücksichtigt, wurden die Horizontalkomponente (Bild 4) und die Vertikalkomponente (Bild 5)

des Magnetfeldes über dem Maßstab bei unterschiedlichen Abständen von der Maßstabsoberfläche berechnet. Für geringe Abstände sind deutliche Abweichungen beider Komponenten von der Sinusform vorhanden. Mit steigendem Abstand nähern sich die Kurven der Sinusform, gleichzeitig tritt jedoch eine starke Verminderung der Magnetfeldstärke auf. Der aus den Komponenten berechnete Winkel α der Feldrichtung zur Richtung der Koordinate als Funktion der Koordinate entlang der Maßstabsrichtung ist in Bild 6 dargestellt. Es muß darauf hingewiesen werden, daß dieser Winkel α von dem oben benutzten Winkel q um 90° oder $\pi/2$ verschieden ist. Für die Überprüfung des linearen Zusammenhanges



ist das jedoch ohne Bedeutung. Die Darstellung in Bild 6 zeigt, daß bei einem Abstand von 1

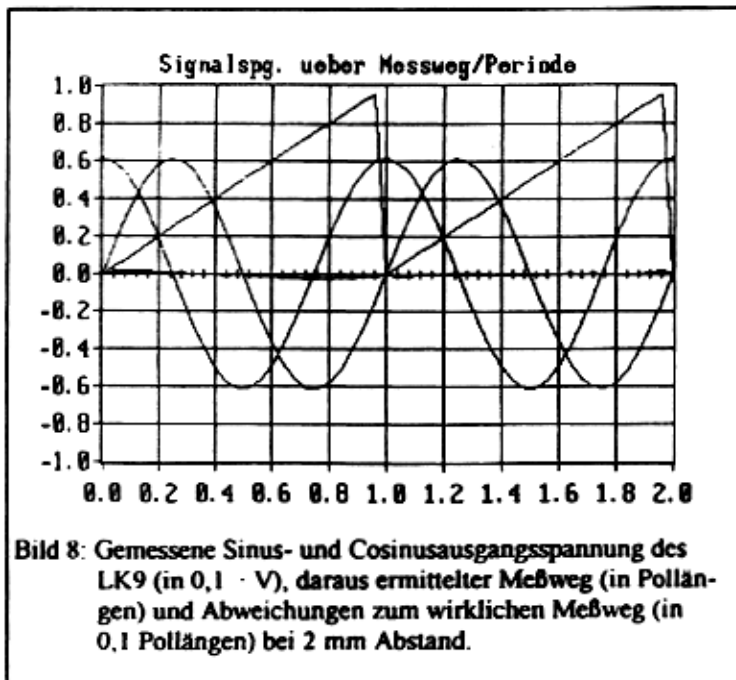




mm zwischen Maßstab und Sensor deutliche Abweichungen von der Linearität auftreten. Bei Abständen von 2 mm und 3 mm sind diese kaum noch erkennbar. In jeder Periode tritt eine positive und eine negative Abweichung auf. Diese Abweichungen werden sich selbstverständlich sowohl im Sinussignal als auch im Cosinussignal bemerkbar machen. Da beide um ein Viertel der Periodenlänge verschoben sind, ist ein Fehler zu erwarten, der auch mit einem Viertel der Periodenlänge periodisch ist.

Die rechnerisch ermittelten Abweichungen wurden experimentell überprüft. Dazu war der LK9-Chip nach Bild 1 in der Mitte über

einem 10 mm breiten Maßstab von 1 mm Dicke angeordnet. Der Maßstab wurde mit Hilfe eines steuerbaren Mikroskoptisches, dessen Position mit einem Fehler von weniger als $\pm 2 \mu\text{m}$ bekannt

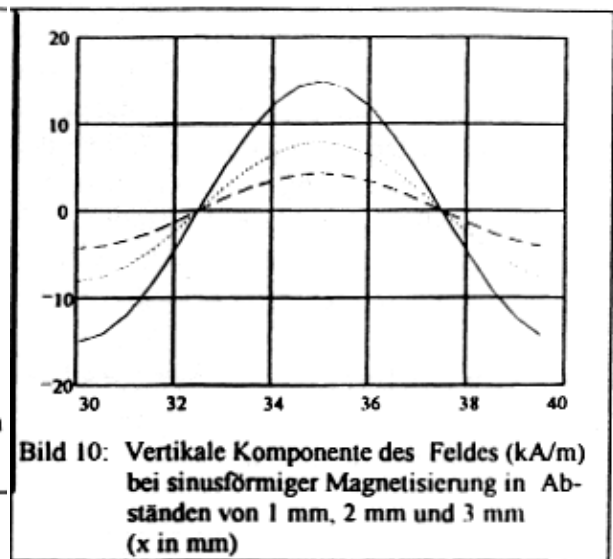
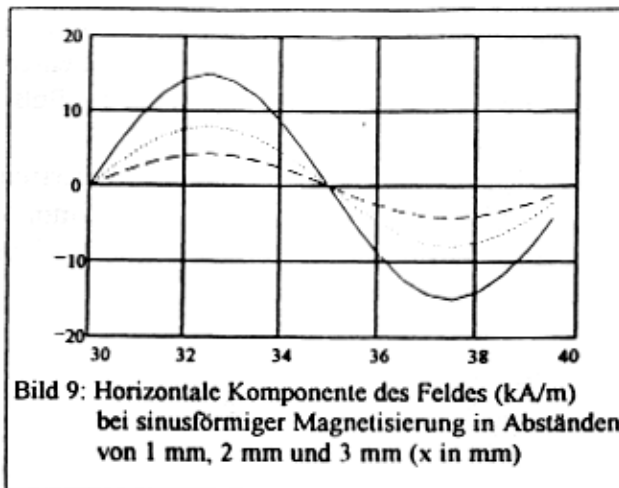


ist, gegenüber dem Längensensor verfahren. Bild 7 zeigt Meßwerte für einen Abstand zwischen Maßstabsoberfläche und Sensormitte von 1 mm. Dargestellt sind die beiden Brückenausgangsspannungen (Sinus- und Cosinussignal) über der Ortskoordinate, die in Einheiten der Polteilung (5 mm) angegeben ist (Spannungswert = 0,1 Ordinatenwert in Volt). Aus den Sinus- und Cosinuswerten wurde nach der Arcustangens-Interpolation der Weg berechnet. Er ist aus dem sägezahnförmigen Verlauf in Einheiten der Polteilung abzulesen. Die Differenz dieses berechneten Weges zum wirklich zurückgelegten ist um einen Faktor 10 vergrößert aus

der Kurve nahe der Wegkoordinatenachse abzulesen.

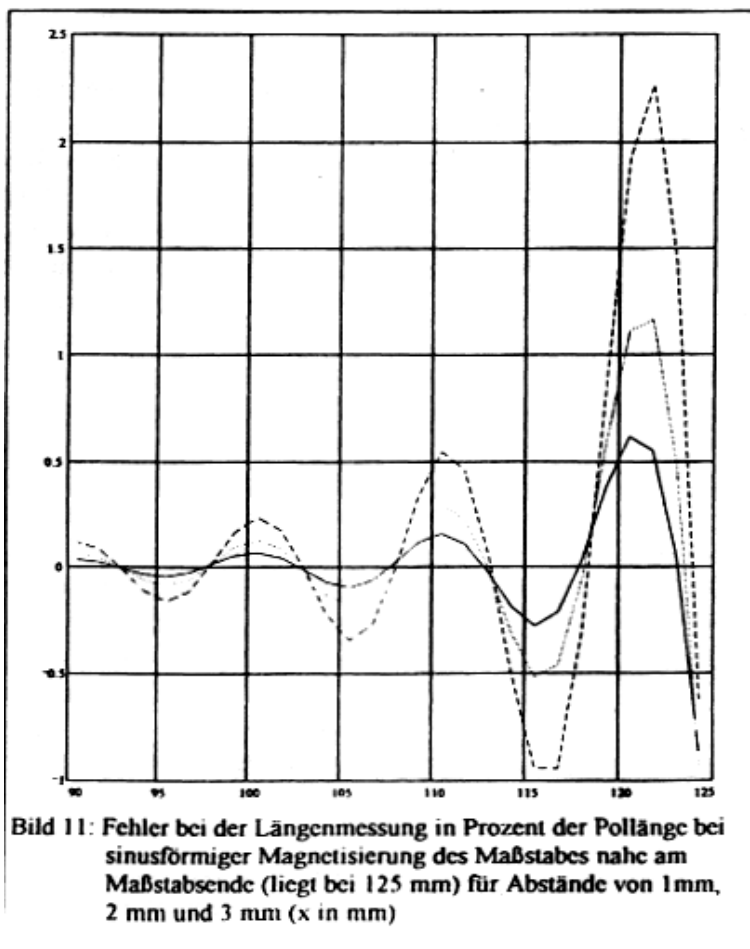
Wie erwartet, ergibt sich für den geringen Abstand zwischen Maßstab und Sensor eine Abweichung mit einem Viertel der Polteilung als Periodenlänge. Die Amplitude der Abweichung ist geringer als $70 \mu\text{m}$. Wie Bild 8 zeigt, ist bei einem Abstand von 2 mm zwischen Maßstab und Sensor der periodische Fehler nicht mehr nachweisbar. Die Positionsänderung des Maßstabes wird mit einem Fehler von weniger als $\pm 11 \mu\text{m}$ richtig wiedergegeben. Es wird darauf hingewiesen, das für diese Messungen ein geeignetes Maßstabsstück ausgesucht wurde, um von den Fehlern des Maßstabes unabhängig das wesentliche Verhalten demonstrieren zu können.

3.2 Fehler bei sinusförmiger Magnetisierung des Maßstabes



Für den Fall des geringen Abstandes zwischen Maßstab und Sensorelement können die Meßfehler wesentlich reduziert werden, wenn die Maßstabsspur nicht in jeder Polteilung bis zur vollen magnetischen Sättigung in abwechselnder Richtung aufmagnetisiert ist, sondern die Magnetisierung entlang der Maßstabskoordinate durch eine Sinusfunktion wiedergegeben werden kann. Der Verlauf der horizontalen und der vertikalen Feldkomponente über dem

Maßstab ist in Bild 9 bzw. Bild 10 für unterschiedliche Abstände zur Maßstabsoberfläche dargestellt. Abweichungen von der Sinusform sind für beide Komponenten aus den Darstellungen nicht zu erkennen. Es wurde rechnerisch ermittelt, daß solche Abweichungen für eine Maßstabsspur unendlicher Länge auch nicht vorhanden sind. Bei endlichen Maßstäben treten am Maßstabsende die größten Fehler auf. Wie Bild 11 zeigt, nimmt der Fehler zur Maßstabmitte hin schnell ab. Für den im Bild 11 dargestellten Fall eines Maßstabes mit 25 Pollängen tritt in der ersten Polteilung vom Rand hergesehen bei 3 mm Abstand zur Maßstabsoberfläche ein Fehler von mehr als zwei Prozent der Pollänge auf. Das sind bei 5 mm Pollänge 0,1 mm Fehler. In der fünften Pollänge vom Rand hergesehen ist der Fehler bereits auf 0,2 % oder 0,01 mm abgesunken. Bei geringeren



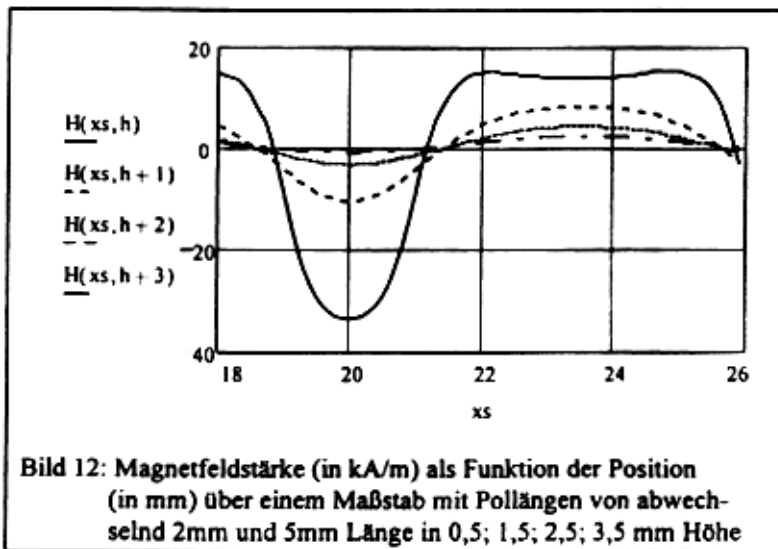
Abständen sind die entsprechenden Fehler deutlich kleiner.

Es muß noch darauf hingewiesen werden, daß bei großen Abständen des Sensor von der Maßstabsoberfläche wegen der dort vorhandenen geringen Magnetfeldstärke mit bisher nicht betrachteten Längenfehlern zu rechnen ist, die durch die Eigenanisotropie der magneto-resistiven Schichtstreifen bedingt sind. Die rechnerische Behandlung dieser Fehler ist möglich, erfordert aber einen größeren Aufwand. Es wird abgeschätzt, daß dieser Einfluß für Abstände unter 3 mm auf jeden Fall vernachlässigt werden kann.

Unsere Untersuchungen führen zusammenfassend zu dem Ergebnis, daß bei fehlerfreiem Magnetmaßstab und bei Einhaltung eines vernünftigen Abstandes von etwa 2mm die Längenfehler auf 10 µm begrenzt werden können. Für sinusförmig beschriebene Maßstäbe gilt diese Fehlergrenze für den Abstandsbereich von 0 bis 3 mm.

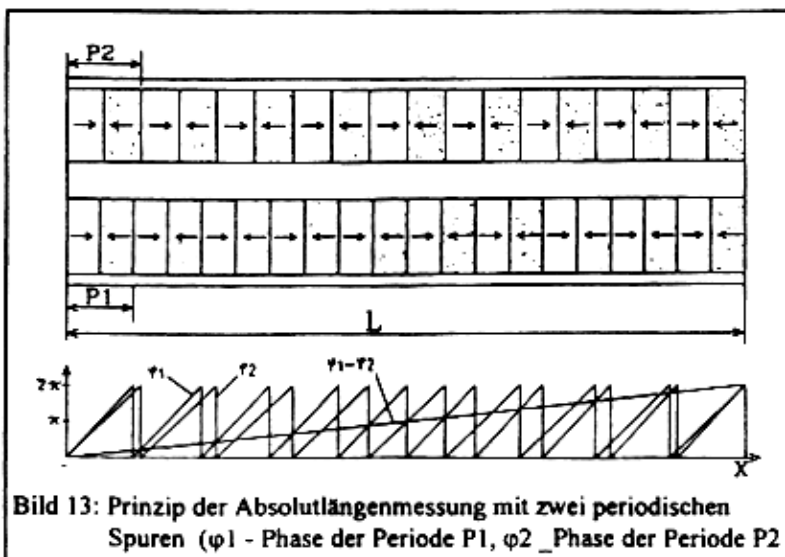
4. Anwendbarkeit des Sensors für die Absolutlängenmessung

4.1 Mögliche Varianten



Ist der Meßweg für ein Absolutlängenmeßsystem nur von der Länge einer Periode eines inkrementalen Systems, so kann dafür einfach der oben beschriebene Sensor mit dem zugehörigen Maßstab benutzt werden. Innerhalb der Periode ergibt die Arctan-Interpolation absolute Positionswerte. Wie die Diskussion der Beeinträchtigung der Meßgenauigkeit am Maßstabsende (s. Bild 11) gezeigt hat, muß der für diesen Fall zur Anwendung

kommende magnetische Maßstab für höhere Genauigkeitsansprüche jedoch trotzdem länger sein als eine Periode.



Natürlich können auch bei magnetischen Längenmeßsystemen zur Absolutmessung viele Spuren nebeneinander, die entsprechend einem Binärcode strukturiert sind, verwendet werden. So eine Anordnung ist aber nur mit einer der Spurzahl entsprechenden Sensorzahl realisierbar, wobei die Justage der Gesamtsensoranordnung immer mit einem größeren Aufwand verbunden ist. Bei einem Meßsystem mit dem

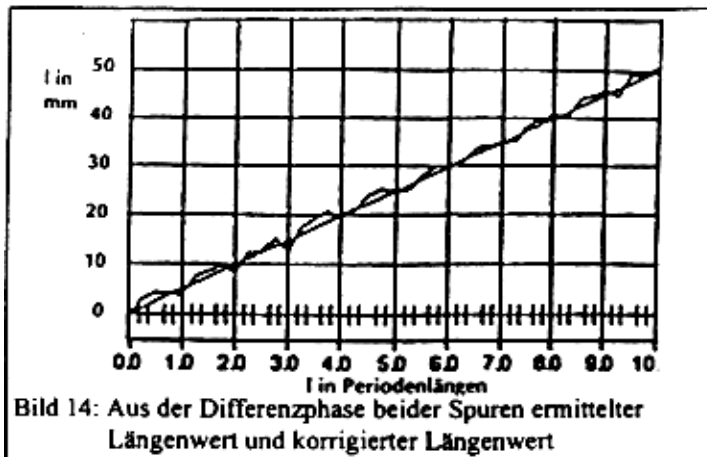


Bild 14: Aus der Differenzphase beider Spuren ermittelter Längenwert und korrigierter Längenwert

Sensorelement LK9 ist eine Sensoranordnung mit parallel versetzten Sensorebenen aufzubauen. So ein Aufbau ist kompliziert und aufwendig. Die Anwendung eines PseudoRandom-Codes erscheint zunächst günstiger, da hier die Positionsinformation in einer einzigen Magnetspur untergebracht ist. Hier sind genau so viele Sensorelemente notwendig, die sich jedoch in einer Ebene nebeneinander befinden. Ebenso könnte auch ein Codierv erfahren benutzt werden, bei dem die

Positionsinformation in den Längenwerten hintereinander angeordneter unterschiedlicher Pollängen steckt /1/.

Die drei zuletzt genannten Varianten weisen zunächst eine Längenauflösung auf, die mit der Länge eines Magnetpols übereinstimmt. Deshalb ist parallel zu der oder den Codespuren immer noch eine eindeutig in ihrer Lage zugeordnete periodische Spur nötig, in der wie im oben beschriebenen inkrementalen Fall eine hohe Längenauflösung erreicht wird.

Weiterhin ist bei allen magnetischen Maßstäben mit hintereinander folgenden ungleich langen Pollängen zu beachten, daß die Abstandstoleranz zwischen Maßstab und Sensorelement eingeschränkt wird. In Bild 12 wird der Verlauf der magnetischen Feldstärke über einem Maßstab mit abwechselnden Pollängen von 2 mm und 5 mm in Meßrichtung in unterschiedlichen Abständen gezeigt. Es ist feststellbar, daß mit variierendem Abstand der Nulldurchgang der Feldstärke verschoben wird. Die von den Sensoren festgestellte Pollänge wird damit abstandsabhängig.

4.2 Meßsystem mit zwei Spuren unterschiedlicher Periodenlänge

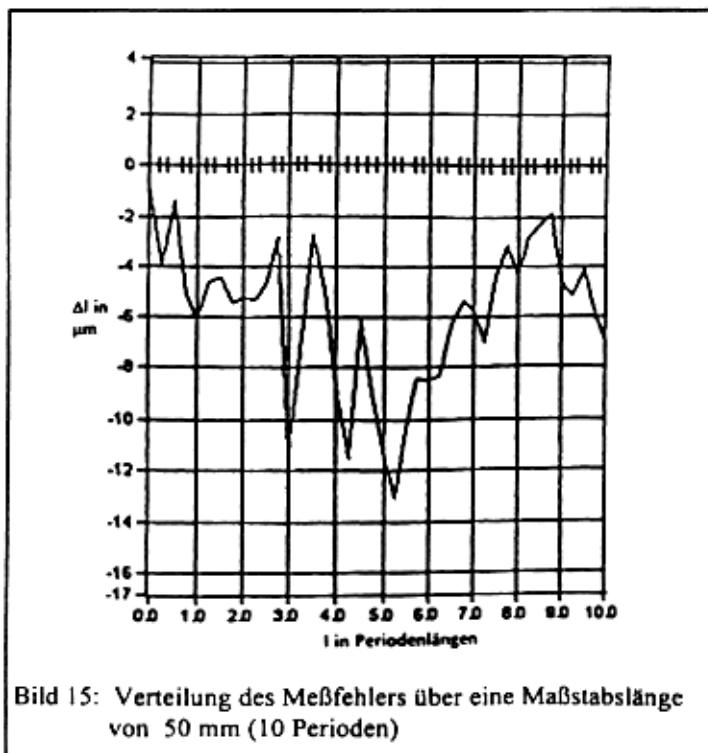


Bild 15: Verteilung des Meßfehlers über eine Maßstablänge von 50 mm (10 Perioden)

Ein Absolutmeßsystem mit großen Toleranzen wird deshalb mit periodischen Maßstäben auskommen müssen. Das Prinzip eines solchen Meßsystems zeigt Bild 13. Als Beispiel sind zwei Spuren gleicher Länge einmal mit zehn Perioden und einmal mit neun Perioden dargestellt. Die Differenz der in beiden Spuren mit dem gleichen Sensor gemessenen Phasen steigt linear mit der Absolutposition an. Letztere kann also direkt ermittelt werden.

Meßergebnisse an einem Testsystem sind in Bild 14 und Bild 15 wiedergegeben. Im Bild 14 zeigt die Kurve mit den erheblichen Schwankungen die direkt aus der Phasendifferenz ermittelten

Längenwerte, dargestellt über die mit einem genauen Meßsystem gewonnenen Längenwerte, die in Periodenlängen der Spur mit der höheren Periodenzahl angegeben sind. Benutzt man die so ermittelte Länge jedoch nicht als Ausgabewert, sondern nur dazu, festzustellen, in welcher Periode der zuletzt genannten Spur die gefragte Position liegt und addiert zu der sich daraus ergebenden Länge noch den Interpolationswert für die Phase der bei dieser Position liegenden letzten Periode dieser Spur, so wird ein wesentlich genauerer Wert erhalten. Meßwerte für dieses Auswerteverfahren zeigt Bild 15. Die Fehler liegen im Bereich von 10 µm. Die Toleranzen für die Justage der Doppelspur- Meßeinrichtung unterscheiden sich nicht von denen des inkrementalen Meßsystems. Der Abstand zwischen Maßstab und Sensor muß nicht besser als im mm-Bereich eingehalten werden. Die Erprobung ergab, daß die Herstellung von Maßstäben mit Fehlern im angegebenen Bereich noch das Hauptproblem darstellt.

Literatur:

/1/ Loreit, U., Dettmann, F. „Hochauflösende Absolutpositionsmessung mit magnetoresistiven Längenmeßsensoren“ Proc. Sensor 93, Bd. 3, S. 55-62

Weiter wurde verwendet:

Loreit, U., Dettmann, F. „Neuartige magnetoresistive Längenmeßelemente und Längenmeßkonzept für nm-Auflösungen“ 2. Symposium Magnetoresistive Sensoren am 18.03.1993, Tagungsband S. 87-97

Dettmann, F., Loreit, U. „Magnetoresistive Sensoren maßgeschneidert für Anwendungen“ Tagung. Sensoren zum Messen mechanischer Größen im KFZ, Essen 1993