

Laborpraktikum
Messtechnik und Messtechnik/Sensorik

Versuch
Wegsensoren
S3

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Versuchsziel	3
2. Grundlagen.....	3
2.1 Kopplung zwischen Messmittel und Normal bzw. Referenz.....	3
2.2 Wirbelstromsensor	5
2.3 Induktiver Wegaufnehmer (Differentialtransformator)	5
2.4 digitale Wegaufnehmer (Wegsensoren)	6
2.4.1 direkte Kodierung (reine Parallelumsetzung)	7
2.4.2 Inkrementalverfahren (serielle Umsetzung)	8
2.4.3 Interferometer	10
2.5 Widerstandsaufnehmer zur Längenmessung	11
2.6 Lichtwellenleiter-Reflex-Sensoren (Glasfasersensoren)	12
3. Versuchsanordnung und Hinweise zur Messwerterfassung.....	13
4. Vorbereitung.....	15
5. Aufgabenstellungen.....	16
Literatur	18

Betreuer: **M.Sc. Falco Edner**
E-Mail: falco.edner@ovgu.de
Stand vom 12.10.2020

Hinweis: Die hier in der Anleitung zum Praktikumsversuch verwendeten Zeichnungen und Bilder sind **urheberrechtlich geschützt** und dürfen nicht anderweitig verwendet werden, dürfen also auch **nicht Bestandteil des Versuchsprotokolls** sein. Kopien, Vervielfältigungen oder die Verwendung in anderen Veröffentlichungen bedürfen der Genehmigung durch den Autor.

1. Versuchsziel

Ziel des Laborversuches „Wegsensoren“ ist es, verschiedene Messaufnehmer bzw. Sensoren für die Längen- und Wegmessung kennen zu lernen und deren messtechnische Eigenschaften, das Verhalten ihrer Ausgangssignale sowie die Entstehung systematischer und zufälliger Messabweichungen (Messfehler) zu untersuchen. Weiterhin sollen die Kopplung zwischen Prüfling und Normal, der Vorgang des Prüfens von Messmitteln, die Begriffe statische Übertragungsgleichung, statischer Übertragungsfaktor und Messempfindlichkeit durch praktische Messungen und der Umgang mit den Messergebnissen vermittelt und geübt werden. Aus diesem Grund wird auf die **protokollarische Aufzeichnung der Messwerte** als auch auf die **Ausführung des Versuchsprotokolls** besonderer Wert gelegt.

Der Darstellung der physikalischen Größe Länge dienen ein inkrementelles Auflichtlängenmesssystem (IAL) und ein interferentielles Längenmesssystem als Normal (Referenz), die an das zu untersuchende Längenmessmittel unter Einhaltung des Abbéschen Komparatorprinzips anzukoppeln sind.

2. Grundlagen

2.1 Kopplung zwischen Messmittel und Normal bzw. Referenz

Der allgemeine „messtechnische Grundsatz“ besagt, dass das Messmittel die zu messende physikalische Größe nicht beeinflussen und nicht verändern darf. Es stellt sich somit die Aufgabe, ein Messmittel, hier in diesem Versuch handelt es sich um Längenmessmittel, so mit der Messgröße zu verbinden bzw. zu koppeln, dass ideal betrachtet keine Messabweichungen entstehen. Dementsprechend sind das Längenmessmittel und die zu messende Länge (Messgröße) miteinander zu verbinden, was mit mechanischen, optischen, kapazitiven, induktiven oder magnetischen Mitteln erfolgen kann. In ihrer Messanordnung unterscheidet man zwei grundsätzliche Prinzipien, die der parallelen Anordnung der zu messenden Länge an das Längenmessmittel und eine fluchtend hintereinander ausgerichtete Messanordnung. Die beiden Messanordnungen sind im nachfolgenden **Bild 1** vergleichend dargestellt.

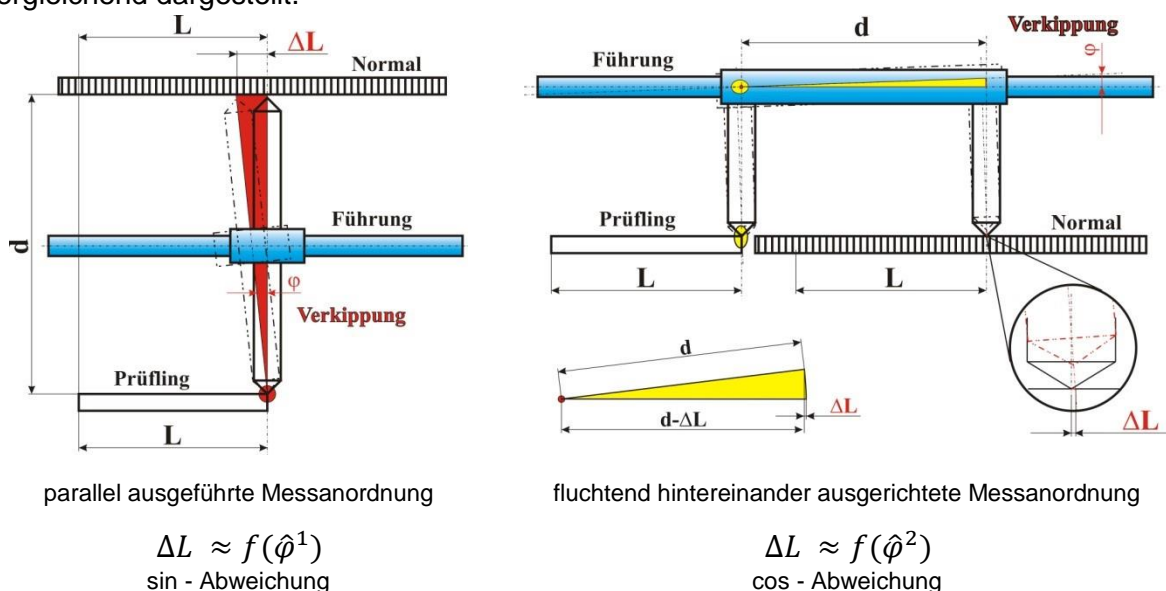


Bild 1: Prinzipien der Kopplung zwischen Längenmessmittel und Messgröße – Prüfling und Normal (Referenz).

Die infolge der Messanordnungen entstehenden Messabweichungen werden vorrangig durch die Kippbewegung in den Führungseinrichtungen verursacht, sowohl bei der parallelen als auch in der fluchtend ausgeführten Kopplung zwischen Längenmessmittel und

Messgröße. Geht man dabei von einer zufälligen Kippabweichung¹ aus, so ist bei der parallelen Messanordnung die zufällige Messabweichung ΔL annähernd $\hat{\varphi}^1$ und bei der fluchtend hintereinander ausgeführten Ankopplung ist diese zufällige Messabweichung annähernd $\hat{\varphi}^2$. Entsprechend der Exponenten bezeichnet man diese Messabweichungen als Messabweichung 1. bzw. 2. Ordnung.

Die infolge der Verkippung entstehenden Winkel φ liegen vom Betrag her deutlich unter $\frac{\pi}{4}$ (45°), so dass die Messabweichungen 2. Ordnung immer kleiner als die 1. Ordnung ausfallen werden.

Die fluchtend hintereinander ausgeführte Messgrößenankopplung wurde von Ernst Abbé 1893 als Komparator ausgeführt und wird später nach ihm als Abbé-Komparator oder Abbésches Komparatorprinzip bezeichnet. Das nachfolgende Bild 2 zeigt den Abbé-Komparator in einer überarbeiteten aber immer noch ursprünglichen Version aus dem CarlZeiss-Werk in Jena.

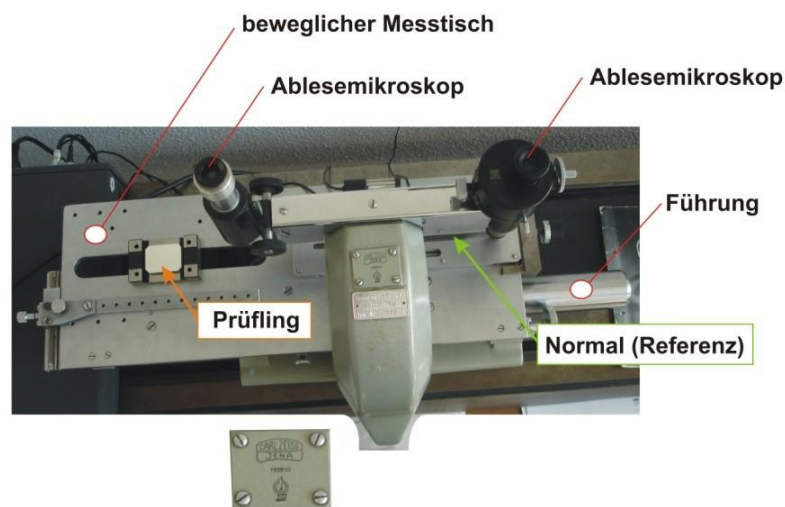


Bild 2: Ein Abbéscher Komparator in einer vom Carl-Zeiss-Werk in Jena gefertigten Version (Ablesemikroskope nicht im Messeingriff). Als Normal (Referenz) wird ein Glasmaßstab in Verbindung mit einem Okularmikrometer im Ablesemikroskop eingesetzt, mit dem eine Messempfindlichkeit von 10^6 m^{-1} erreicht wird.

Die Messabweichung 2. Ordnung wird im Zusammenhang mit der fluchtend hintereinander ausgeführten Messanordnung auch nach Ernst Abbé als „Abbé-Fehler“ (Abbé-Messabweichung) bezeichnet. Aus praktischen Erwägungen heraus wird die von Ernst Abbé entwickelte Bedingung, die mit seiner Messanordnung im Zusammenhang steht, auch als

„Messtechnischer Grundsatz der Längenmesstechnik“

bezeichnet.

Durch die Kombination von optisch-mechanischen Komponenten in einer kippinvarianten Anordnung können in einer solchen, einem 1953 nach Otto Eppenstein benannten Prinzip, die zufälligen Messabweichungen infolge der Verkippung noch weiter verringert werden, die dann 3. Ordnung sind. Jedoch ist das Eppenstein-Prinzip mit einem sehr hohen technischen Aufwand verbunden, so dass es bis heute auf die Anwendung in Längenmessmaschinen der Fertigungsmesstechnik beschränkt geblieben ist.

¹ Während der Bewegung des Messtisches (vergl. Bild 2) auf der Führung treten immer unterschiedliche Berührungspunkte innerhalb der Führung auf, wodurch der Winkels φ unterschiedliche Beträge annimmt und demzufolge $E\{\varphi\} = 0$ Gültigkeit besitzt. Damit gilt auch $E\{\Delta L\} = 0$.

2.2 Wirbelstromsensor

Eine Art berührungsloser induktiver Wegaufnehmer arbeitet nach dem Wirbelstromprinzip ohne eine mechanische Verbindung mit dem Messobjekt zu erlangen. Sie sind so geeignet, Abstände gegenüber Objekten aus elektrisch leitenden Materialien, also insbesondere solchen aus metallischen Werkstoffen zu messen. Die Ausgangsspannung der Sensoren ist hierbei ein Maß für den Abstand zwischen der Sensorstirnfläche und dem Messobjekt.

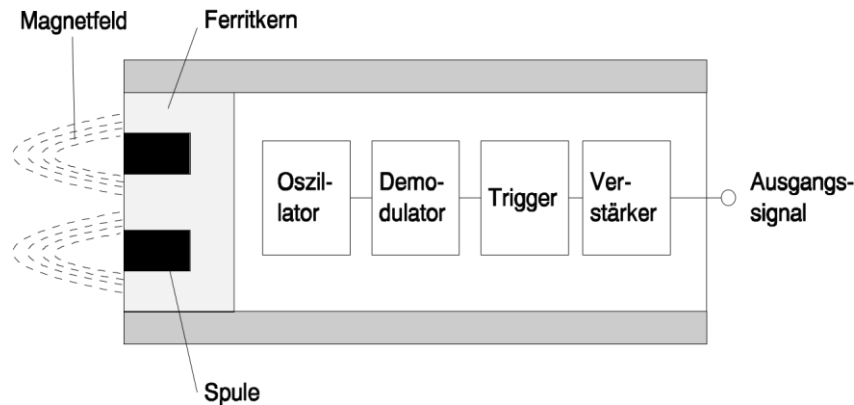


Bild 3: Prinzip eines Wirbelstromsensors mit Wandlungskette.

Die Spule des Wirbelstromsensors ist Teil eines LC-Hochfrequenz-Schwingkreises, der bei seiner Resonanzfrequenz schwingt (Bild 3). Nähert sich innerhalb des Magnetfeldes der Spule ein leitfähiges Messobjekt, wird in diesem ein Wirbelstrom induziert. Dadurch wird die Schwingung gedämpft, wodurch sich der Strom im Schwingkreis verringert. Diese Änderung liefert über den Demodulator und den Trigger sowie nach abschließender Verstärkung das Ausgangssignal. Durch die Art und die Geometrie des Spulenkerns lässt sich die Charakteristik des Magnetfeldes variieren und der speziellen Anwendung anpassen. Das Messmittel (Wirbelstromsensor) und das Messobjekt sind hierbei über das Magnetfeld miteinander verkoppelt. Die Abtastung des Messobjektes erfolgt damit mechanisch berührungslos, so dass nur eine sehr geringfügige Rückwirkung über die Kraftwirkung eines elektrischen und materialbedingten magnetischen Feldes auf das Messobjekt stattfindet. Dem allgemeinen messtechnischen Grundsatz der rückwirkungsfreien Kopplung von Messmittel und Normal (Referenz) kommt der Einsatz von Wirbelstromsensoren bereits sehr nahe. In Abhängigkeit vom Volumen des Messobjektes kann man praktisch von der Einhaltung dieses Grundsatzes ausgehen.

2.3 Induktiver Wegaufnehmer (Differentialtransformator)

Ein Differential-Tauchankersensor besteht aus einer Primär- und zwei Sekundärspulen mit einem gemeinsamen beweglichen Eisenkern.

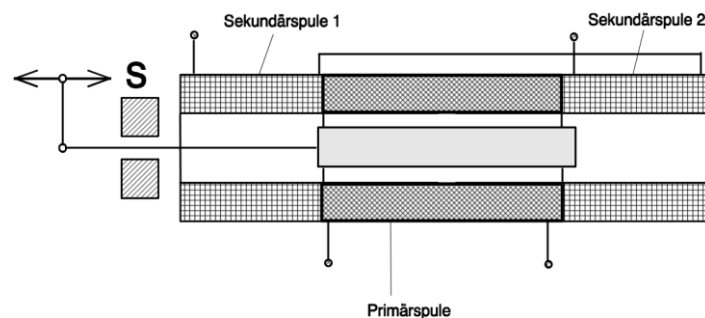


Bild 4: Prinzip einer Differential-Tauchankerausführung zur Weg- bzw. Längenmessung (Differentialtransformator).

Dieser taucht in seiner Mittelstellung gleich tief in die in Serie geschalteten Sekundärspulen 1 und 2 ein (Bild 4). Die Primärspule wird mit einem Wechselstrom betrieben und induziert je nach Kopplungsgrad zwischen der Primär- und den Sekundärspulen anteilig Wechselspannungen in die beiden Sekundärspulen. Die Auswerteschaltung wird als Transformatorschaltung mit einer Primärspule und zwei Sekundärspulen ausgeführt, bei der sich die Ausgangsspannung des Sensors als Differenz der Sekundärspannungen ergibt.

Die Position des Kerns bestimmt die magnetische Kopplung zwischen der Primär- und den beiden Sekundärspulen und damit die in den Sekundärspulen induzierte Spannung. In der Nullstellung des Kerns haben beide Spannungen die gleiche Amplitude, sind aber um 180° phasenverschoben, so dass die resultierende Spannung den Wert Null annimmt. Bei der Verschiebung des Kerns erhöht sich die Spannung einer Spule, während sich die andere um denselben Betrag verringert. Die Ausgangsspannung des Messaufnehmers ändert sich linear mit der Auslenkung.

2.4 digitale Wegaufnehmer (Wegsensoren)

Die digitale Wegmessung erfordert die Quantisierung der Messgröße, die Ermittlung des aktuellen Zahlenwertes (entsprechend des zu messenden Zahlenwertes) und die Darstellung dieser Zahl in einem vereinbarten Zahlensystem (Kodierung). Gebräuchlich hierfür sind das dekadische, das duale und das hexadezimale Zahlensystem. Insbesondere finden das duale und das für die Rechentechnik daraus abgeleitet hexadezimale Zahlensystem ihre Anwendung in der digitalen Messwertverarbeitung. So ist es heute durchaus sinnvoll, die analoge Messgröße nach der Wandlung in einem dualen Zahlensystem darzustellen.

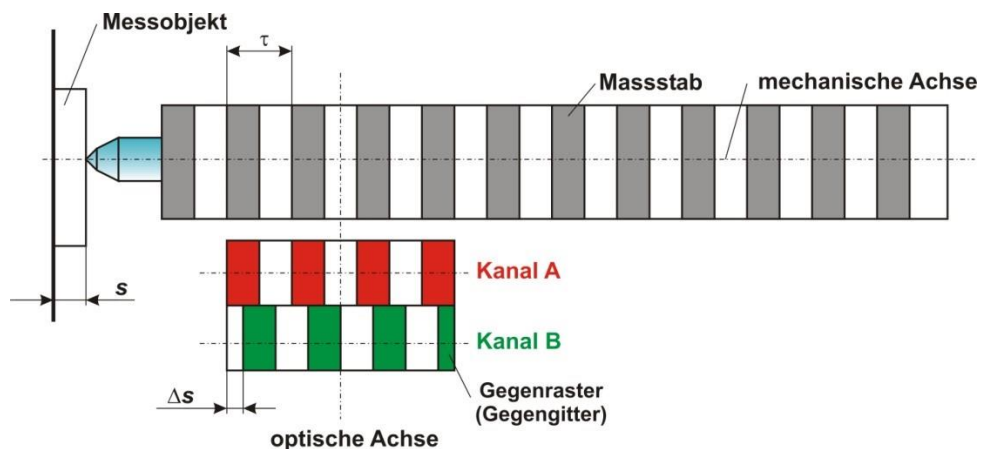


Bild 5: Der prinzipielle Aufbau einer inkrementellen optischen Abtastung.

Für die Wandlung der analogen Messgröße in eine digitale gelten die gleichen Prinzipien und Gesetze wie z.B. für die digitale Messung von Gleichspannungen. Für den Vergleich der analogen Eingangsgröße mit einem diskreten Längenmaßstab (Normal) muss der Maßstab in diskreten Längenabschnitten bereitgestellt werden. Da sich solche Maßstäbe - auch Vielfachnormale zur direkten kodierten Längenmessung - mechanisch leichter und mit geringerem Aufwand herstellen lassen als elektrische Normale, werden meist die beiden typischen Verfahren der parallelen und seriellen Messwernerfassung angewendet.

Es gibt daher praktisch die Parallelumsetzung als direkt kodierendes Wandlungsprinzip (Kodeverfahren) oder die rein serielle Umsetzung in Form einer Skalenstreckenumsetzung oder als Inkrementalverfahren zur digitalen Messwernerfassung. Kombinationen aus beiden werden dabei kaum verwendet. Die Maßstäbe können für translatorische als auch rotatorische Bewegung ausgelegt werden.

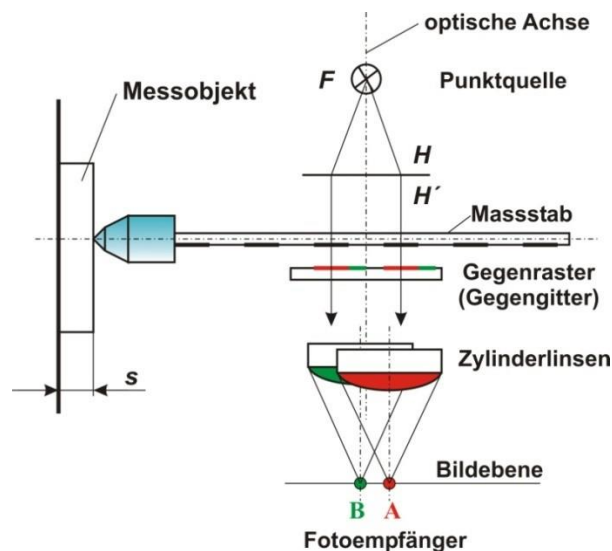


Bild 6: Prinzipieller Aufbau einer optischen Abtastung eines Rastermaßstabes im Durchlichtverfahren.

Die Messung (der Vergleich) erfolgt mittels eines feststehenden Bezugspunktes durch Abtastung. Die Art der verwendeten Abtastung bestimmt zugleich die erreichbare Messempfindlichkeit, d.h. die Quantisierungseinheit. Mit verschiedenen Abtastverfahren lassen sich für betriebliche Messmittel die nachfolgend aufgeführten Messempfindlichkeiten erreichen:

Tabelle 1: Messempfindlichkeiten verschiedenartiger Längenmessmittel mit digitalem Ausgangssignal nach ihrem Wandlungsprinzip geordnet.

Art der Abtastung	erreichbare Messempfindlichkeit
mechanisch	ca. $2 \times 10^3 \frac{1}{m}$
magnetisch	ca. $1 \times 10^4 \frac{1}{m}$
optisch	ca. $5 \times 10^5 \frac{1}{m}$
interferentiell	ca. $1 \times 10^{10} \frac{1}{m}$

In der Praxis wird häufig die optische Abtastung eingesetzt, die im Versuch als Normal (Referenz) der physikalischen Größe Länge zum Einsatz kommt. Der Maßstab kann als Kode- oder Rasterlineal bzw. auch als Scheibe zur Winkelmessung ausgeführt sein. Das Prinzip einer inkrementellen optischen Abtastung ist im Bild 6 prinzipiell dargestellt.

2.4.1 direkte Kodierung (reine Parallelumsetzung)

Jedem Längenquant innerhalb des Messbereiches muss hier eine Ordnungszahl (binäres Wort) zugewiesen werden. Wegen des stets verwendeten Binärschritts (bei der optischen Abtastung Hell-/Dunkelraster) müssen mehrere verschieden gewichtete Spuren parallel angeordnet werden (in der Praxis bis zu 12, d.h. der Informationsgehalt einer Ablesung beträgt bis zu 12 bit). Aus den Signalen der einzelnen Spuren wird durch Dekodierung die zugehörige Ordnungszahl (binäres Wort) ermittelt und angezeigt, die wiederum eine Länge repräsentiert.

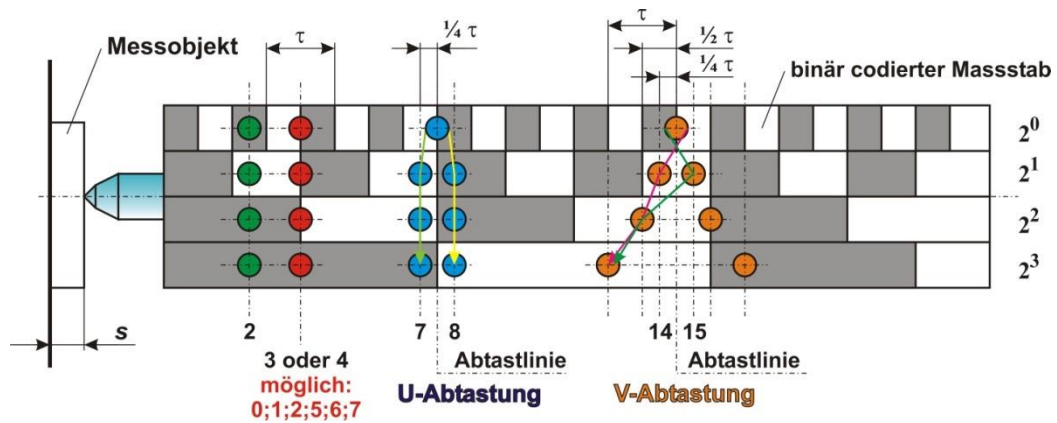


Bild 7: Linien-, U- und V-Abtastung von binär codierten Maßstäben zur Vermeidung von Darstellungsabweichungen.

Durch unvermeidbare Toleranzen bei der Justage der einzelnen Detektoren in den einzelnen Spuren können beim Übergang von einer Zahl zur nächsten Abweichungen entstehen. Diese können beispielsweise durch den Versatz benachbarter Spuren auftreten oder durch Verkipfung der den Maßstab abtastenden Fotoempfänger (Detektoren). Besonders kritisch ist dabei der Übergang der Ordnungszahlen, bei denen sich mehrere Spuren gleichzeitig ändern (z.B. von 0011 \equiv 3 zu 0100 \equiv 4; Änderung in 3 Spuren). Zur Vermeidung dieser Messabweichungen gibt es drei Möglichkeiten:

1. Verwendung einschrittiger Codes,
2. redundante Kodemaßstäbe z.B. mit einer Paritätsspur oder
3. Doppelabtastung außer in der feinsten Spur und Auswahl der "richtigen" Signale mit einer Logikschaltung (U- oder V- Abtastung – Bild 7).

2.4.2 Inkrementalverfahren (serielle Umsetzung)

Wie im Bild 5 dargestellt, ist z.B. bei inkrementellen Maßstäben nur eine Spur mit gleicher Teilungskonstante τ vorhanden und die bei der Abtastung (während einer Verschiebung) auftretenden Impulse werden gezählt.

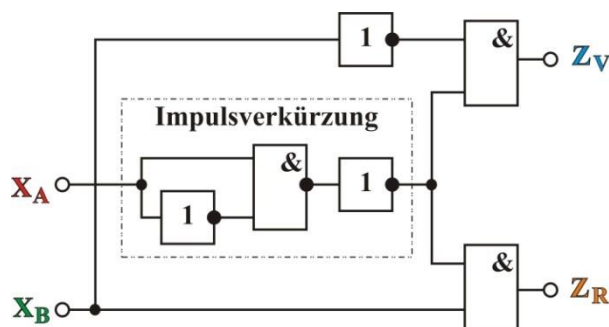


Bild 8: Auswertungslogik einer Einfachauswertung mit Richtungserkennung und der zugehörigen Schaltungsanordnung (Vor-Rück-Diskriminator).

Zur Unterscheidung der Bewegungsrichtung sind zwei um $\frac{1}{4}$ der Teilungskonstanten τ versetzte Abtastungen erforderlich. Durch eine Logikschaltung (Vor-Rück-Diskriminator) wird aus beiden Ausgangssignalen die Bewegungsrichtung ermittelt. Zur Registrierung der Impulse ist ein Vor-/Rückwärtszähler erforderlich, dessen Zählrichtung je nach Bewegungsrichtung umgeschaltet wird. Eine einfache Schaltung zur Erkennung der Vor- und Rückwärtsbewegung des Maßstabes sowie das zugehörige Impulsdigramm zeigen Bild 8 und Bild 9. Dabei steuert bei der Einfachauswertung das Signal B die Zählrichtung und das Signal A liefert die Zählimpulse.

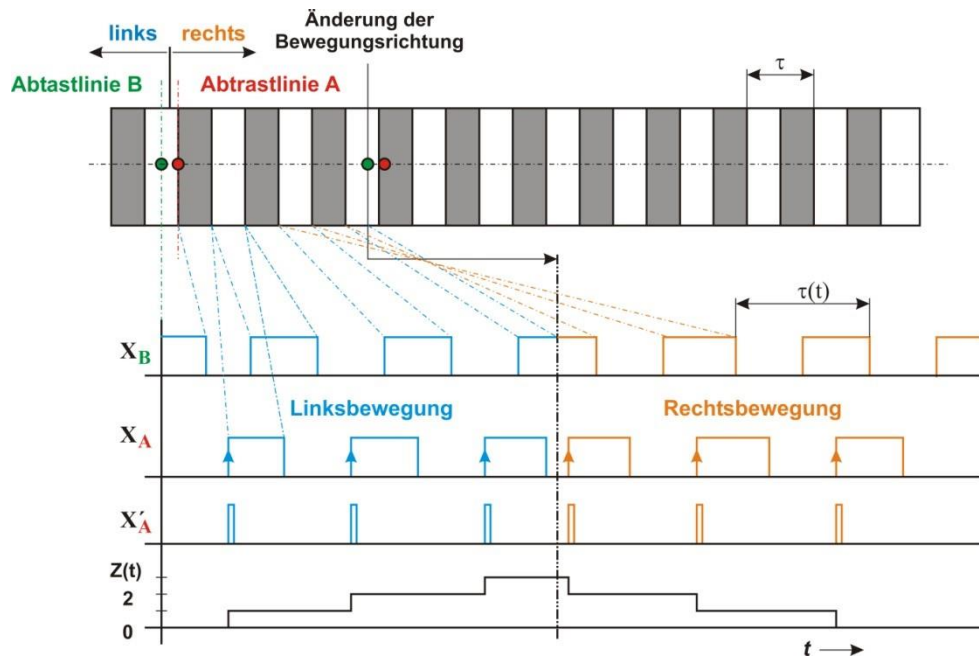


Bild 9: Auswertungslogik einer Einfachauswertung mit Richtungserkennung und dem zugehörigen Signalverläufen.

Die im [Bild 8](#) gezeigte Schaltung zur Erkennung der Zählrichtung ist dabei die einfachste Form eines Vor-Rück-Diskriminators. Die Impulsverkürzung wird in dem hier gewählten Beispiel über die Gatterlaufzeit des ersten Negators realisiert, wodurch sehr kurze Pulse im Bereich von 2 ns erreicht werden können. Das ist besonders bei der Richtungsumkehr des inkrementellen Längenmesssystems von besonderer Bedeutung, damit Zählerabweichungen vermieden werden.

Eine weitere Möglichkeit eines Vor-Rück-Diskriminators ist die Verwendung eines taktflanken gesteuerten D-Flipp-Flop, bei dem beispielsweise das Signal X_A auf den D-Eingang und das Signal X_B auf den steuernden Takteingang (abfallende Flanke aktiv) gelegt wird. Nach dem [Bild 9](#) würde dann bei einer Linksbewegung das Ausgangssignal des D-Flipp-Flops den Zustand $Q = 0$ (Vorwärtszählung Z_V) annehmen und bei der Rechtsbewegung den Zustand $Q = 1$ (Rückwärtszählung Z_R). Es ist allerdings zu beachten, dass für die Rückwärtsbewegung am Vor-Rückwärts-Zähler das negierte Signal X'_A verwendet wird, sonst entstehen infolge des Signalversatzes bei der Zählrichtungsänderung Zählerabweichungen.

Auf der Grundlage des im nachfolgenden Vor-Rückwärts-Zähler registrierten Zählwertes lässt sich die Verschiebung s des inkrementellen Maßstabes mit der Teilungskonstante τ mit der allgemeinen Gleichung

$$s = (Z_V - Z_R) \cdot \tau \quad (1)$$

beschreiben, wobei $(Z_V - Z_R)$ der Wert des Vor-Rückwärts-Zählers ist, der sich als Differenz der Vor- und Rückwärtsbewegung ergibt. Ausführungen von Vor-Rückwärts-Zählern auf der Basis von Mikrocontrollern verwenden getrennte Register für die vorzeichenabhängige Zählung, so dass durch die Berechnung der Differenz der beiden Zählerstände (Register) der zurückgelegte Zählwert berechnet und nach Gl. (1) die Längenänderung s berechnet wird.

Das Inkrementalverfahren erlaubt es, mit dem gleichen Rastermaßstab unterschiedliche Messempfindlichkeiten zu realisieren.

- Bei der **Einfachauswertung** werden nur die Hellfelder des Rastermaßstabes gezählt ([Bild 9](#)).

- Für die **Zweifachauswertung** werden an den Übergängen hell-dunkel und dunkel-hell wieder elektronische Impulse mittel Impulsverkürzung erzeugt und gezählt. Dadurch wird gegenüber der Einfachauswertung eine doppelt so große Messempfindlichkeit erreicht.
- Zur **Vierfachauswertung** sind zwei exakt um $\frac{1}{4}$ der Teilungskonstante τ versetzte Abtastungen erforderlich (**Bild 5**). An beiden Abtastungen werden die Impulse wie bei der Zweifachauswertung verdoppelt. Damit ergibt sich gegenüber der Einfachauswertung eine viermal so große Impulsanzahl und dementsprechend eine viermal so große Messempfindlichkeit.

Obwohl hier zur Erläuterung vorrangig von optischen Maßstäben ausgegangen wurde, ist darauf zu verweisen, dass auch andersartige Maßstäbe praktische Verwendung finden, wenn beispielsweise durch die Umgebungsbedingungen eine sichere optische Abtastung nicht sichergestellt werden kann.

2.4.3 Interferometer

Das Messprinzip beruht auf der Überlagerung zweier kohärenter Lichtwellen. Dabei dient die eine Welle als Referenz und die andere als Messwelle. Bei Phasengleichheit beider Wellen kommt es zur Verstärkung (konstruktive Interferenz) der resultierenden Welle. Bei Gegenphasigkeit kommt es dagegen zur Auslöschung der resultierenden Welle (destruktive Interferenz).

Eine Bauform von Interferometern stellt das „Michelson-Interferometer²“ dar, das gegenüber seiner ursprünglichen Ausführung heute in verschiedenen Versionen und Modifikationen eingesetzt wird. Es besteht im Wesentlichen aus einem Strahlteiler (optischer Teilerwürfel), einem feststehenden Reflektor (Referenzwelle), einem beweglichen Reflektor (Messwelle), einer monochromatischen Strahlungsquelle (Laser) und zwei Empfängern. Das Prinzip eines für die Längenmessung eingesetzten Interferometers nach Michelson zeigt das **Bild 10**.

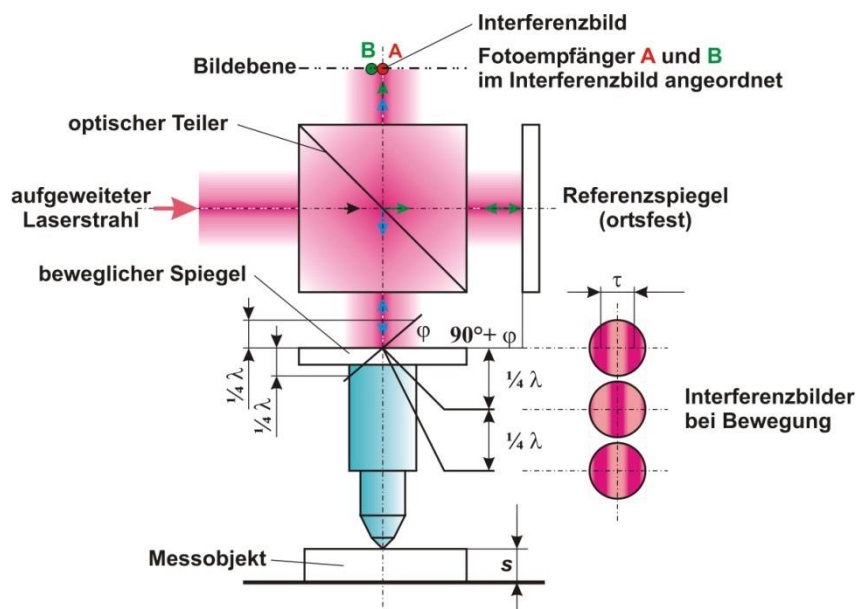


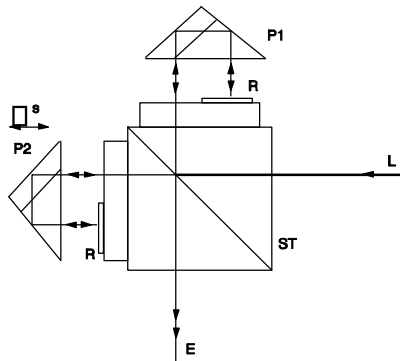
Bild 10: Mit einem optischen Teilerwürfel aufgebautes Michelson-Interferometer.

Die Länge des Messobjektes wird mit der Gleichung

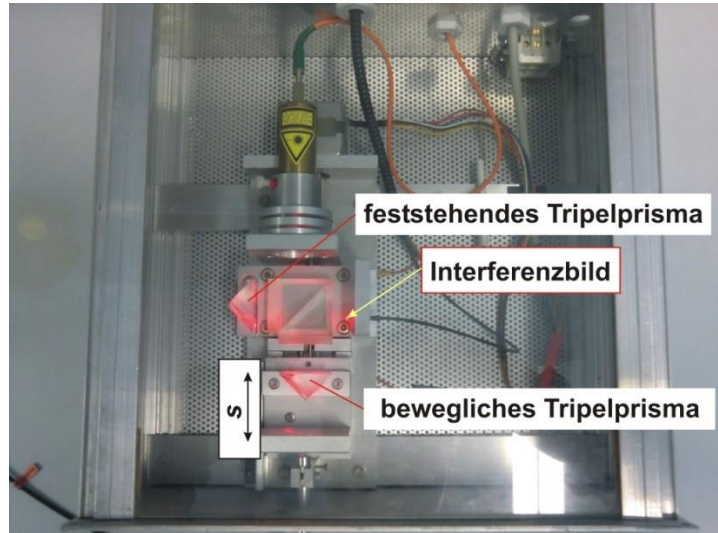
$$s = \frac{\lambda}{2 \cdot n(p_{abs}, f, \vartheta)} \cdot \Delta \delta \quad (2)$$

² Die Anordnung des um 1881 von Albert Abraham Michelson zu Messzwecken entworfene Interferometer bestand aus einer kohärenten Lichtquelle, einem strahlteilenden halbdurchlässigen Spiegel (optischer Strahlteiler), einer optischen Kompensationsplatte (drehbar ausgeführt) und zwei Spiegeln. Die Bewegungen der Interferenzerscheinung werden mittels optischer Detektoren beobachtet.

beschrieben, wobei s die gemessene Länge (Höhe) des Messobjektes, $\Delta\delta$ die Änderung der Ordnung der Interferenz (z.B. Hell/Dunkeldurchgang), λ die Wellenlänge der monochromatischen Strahlungsquelle (He-Ne-Laser: 632,8 nm) und n die Brechzahl ist. Die Brechzahl n kann allerdings nicht als konstant betrachtet werden. Sie wird durch den absoluten Luftdruck p_{abs} , die Luftfeuchte f und die Temperatur der umgebenden Luft ϑ beeinflusst.



prinzipieller Aufbau des modifizierten Michelson-Interferometers



Einsatz dieses Interferometers im Versuchsaufbau zur Vermessung der beiden Glasfasersensoren in ihrer Anwendung zur Längenmessung.

Bild 11: Modifiziertes Michelson-Interferometer: Lichtquelle (L), optischer Strahlteiler in der Ausführung als optischer Teilerwürfel (ST), Fotodetektor bzw. Fotoempfänger (E), Reflexionsschicht (R), feststehendes Tripelprisma (P1) und bewegliches Tripelprisma (P2).

Das **Bild 11** zeigt eine modifizierte Bauform des Michelson-Interferometers. Statt einfacher Planspiegel wie im **Bild 10** ausgewiesen, werden Tripelprismen in Verbindung mit fest auf dem Teilerwürfel angeordneter Reflexionsschichten (Spiegel) verwendet. Dies hat zur Folge, dass die Welle die Wegstrecke zwischen Strahlteiler und Reflektor viermal zurücklegt wird, anstatt zweifach, wie bei Planspiegeln. Dadurch erreicht man eine Verdopplung der Messempfindlichkeit gegenüber einer Planspiegelanordnung. Durch die Anordnung zweier Fotoempfänger A und B im Interferenzbild, die zueinander um $\frac{1}{4} \tau$ versetzt angeordnet sind, erhält man zwei phasenverschobene Signale (ideal sind 90° , sin/cos-Signale). Im Versuchsaufbau selbst werden zwei Lichtwellenleiter im Interferenzbild zur optischen Signalübertragung positioniert, an deren Ende die beiden relativ großflächigen, zugehörigen Fotoempfänger A und B optisch angekoppelt werden. Durch geeignete Interpolationsverfahren wie z.B. der „Vierfachauswertung“ kann die Messempfindlichkeit zusätzlich gesteigert werden. Eine weitere Erhöhung der Messempfindlichkeit kann durch den zusätzlichen betragsmäßigen Amplitudenvergleich der beiden Ausgangssignale erreicht werden, deren wegproportionale Impulse dann ebenfalls in der Zählung Berücksichtigung finden, was zu einer weiteren Erhöhung der Messempfindlichkeit beiträgt.

2.5 Widerstandsaufnehmer zur Längenmessung

Die Widerstandsaufnehmer zur Längenmessung bestehen aus einem linearen Potentiometer, dessen Abgriff von der zu messenden Größe verstellt wird. Den prinzipiellen Aufbau eines solchen Messaufnehmers zeigt das **Bild 12**. Den Problemen mit dem notwendigen mechanischen Abgriff steht ein robuster gerätetechnischer Aufbau mit einer ausreichenden Messempfindlichkeit gegenüber.

Die Widerstandsbahn des Messaufnehmers, die translatorisch als auch rotatorisch ausgeführt werden kann, entspricht funktionell einem Potenziometer, bei dem der

Mittelabgriff (3) den zurückgelegten Weg bzw. die Länge s wiedergibt. Die Widerstandsbahn selbst kann mittels der Differentialgleichung

$$dR = \frac{\rho}{A} \cdot ds \tag{3}$$

beschrieben werden. Der spezifische Widerstand ρ als auch der Querschnitt A senkrecht zur Stromflussrichtung müssen dabei entlang der Widerstandsbahn homogen und konstant sein. In Abhängigkeit mit der zu messenden Länge s (Messgröße) entsteht ein Spannungsteiler mit dem Widerstand $R_1 = f(l_0, s)$, wobei l_0 die Länge der Widerstandsbahn des Widerstandsgebers mit einem Gesamtwiderstand von R_0 ist und wodurch der Messbereich des Messmittels definiert wird, sowie dem Widerstand $R_2 = f(s)$.

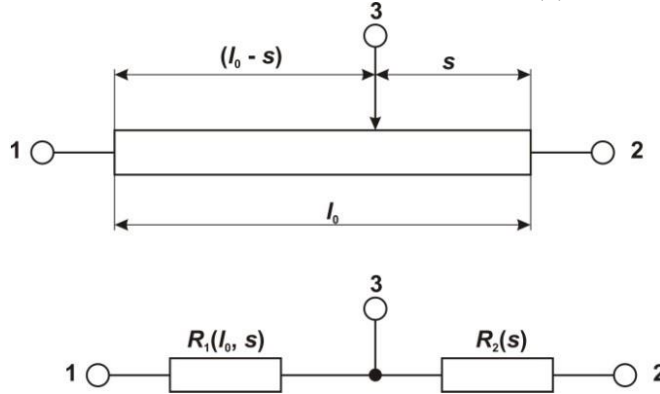
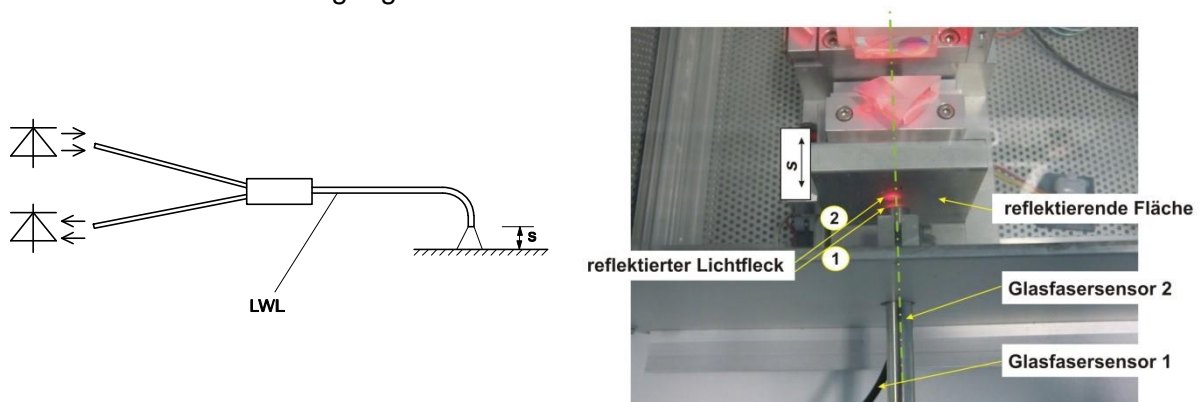


Bild 12: Elektrisches Schaltbild des potentiometrischen Messaufnehmers für die physikalische GröÙe Länge s und die zugehörige Ersatzschaltung.

Unter Verwendung einer Konstanzspannungsquelle entsteht eine als Abbild der MessgröÙe (MessgröÙenwandlung) über dem Widerstand R_2 abfallende Spannung $U_2 = f(s)$. Durch die Benutzung der Umkehrabbildung erhält man schließlich einen Messwert für die zu messende GröÙe (MessgröÙe) $s_{gemessen} = s_{ist}$, die über den Mittelabgriff (3) mit dem potentiometrischen Messaufnehmer erfasst wird.

2.6 Lichtwellenleiter-Reflex-Sensoren (Glasfasersensoren)

Faser-Reflex-Sensoren bestehen prinzipiell aus einem Strahlungs- und einem Empfangselement (z.B. Leuchtdiode, Fotodiode) und einem Lichtwellenleiter (LWL). Als Lichtwellenleiter können Monomode- und Multimode-Lichtwellenleiter eingesetzt werden, wobei vorrangig Multimode-Lichtwellenleiter für derartige Sensoren zum Einsatz kommen, wenn die Kohärenzbedingungen nicht erfüllt sein müssen.



Glasfasersensor als Multimode-Lichtwellenleiter in der Ausführung mit nur einem Lichtwellenleiter

Versuchsaufbau zur Vermessung der beiden Glasfasersensoren in ihrer Anwendung zur Längenmessung.

Bild 13: Faseroptischer-Wegsensor mit nur einem Lichtwellenleiter zur Ankopplung an die Messstrecke.

Als Messsignal dient die im Empfängererelement umgewandelte reflektierte Strahlung der Strahlungsquelle, deren Strahlungsleistungsdichte (Intensität) von der Entfernung s , dem Einstrahlwinkel und vom Reflexionsgrad des Reflektors abhängig ist.

Dabei werden zwei grundsätzliche Prinzipien unterschieden, die im Bild 13 gezeigte Anordnung mit nur einem Lichtwellenleiter und die Anordnung von zwei Lichtwellenleitern zur Ankopplung an die reflektierende Oberfläche. Bei der Ausführung mit nur einem Lichtwellenleiter wird ein Y-Koppler benutzt, der die eingekoppelte Lichtstrahlung von der reflektierten trennt. Bei der Ausführung mit zwei Lichtwellenleitern werden die eingekoppelte Lichtstrahlung und die reflektierte (beobachtete) in getrennten Lichtwellenleitern geführt. Durch die Art der Kopplung mit der reflektierenden Fläche, die sich proportional der zu messenden Länge s verschiebt, entstehen so unterschiedliche Kennlinien für die Ausführung des Lichtwellenleiter-Reflex-Sensors (Glasfasersensor) als Einzelfaser- oder Doppelfasersensor.

3. Versuchsanordnung und Hinweise zur Messwerterfassung

Die Versuchsanordnung besteht aus drei Teilen, die durch Baugruppen abgegrenzt werden und im Bild 14 farblich kenntlich gemacht wurden. Der erste Teil, im Bild 14 grün gekennzeichnet, enthält die Aufbauten zu direkten Kodierv Verfahren. Hierzu gehören Kodelineale im Binär- und Gray-Code sowie die dazu gehörenden Abtasteinrichtungen, die in einem Einschub des Versuchsplatzes eingebaut sind. Beim Einsatz des binären Kodelineals kann zwischen Einfach- und V-Abtastung umgeschaltet werden.

Im zweiten und mit oranger Farbe gekennzeichneten Bereich der Versuchsanordnung befinden sich die Anschlüsse der einzelnen Wegaufnehmer bzw. Wegsensoren (Längenmessmittel), die über eine PC-Messwerterfassungskarte mit dem PC verbunden sind. Die Signale der Kanäle der Messwerterfassungskarte werden mit dem Messdatenerfassungsprogramm DASYLab ausgewertet und auf dem im Bild 15 gezeigten Bildschirm zur Anzeige gebracht. Die Signale des inkrementellen Längenmesssystems (IAL) sind an die **Digitaleingänge** der Messwerterfassungskarte angeschlossen. Die anderen Sensoren, die im Versuchsablauf zu charakterisieren sind, liefern Analogsignale und sind demzufolge mit den **Analogeingängen** der Messkarte verbunden. Die Zuordnung der einzelnen Sensoren zu dem jeweils zugehörigen Analogkanal unter DASYLab ist der nachfolgenden Tabelle 2 zu entnehmen.

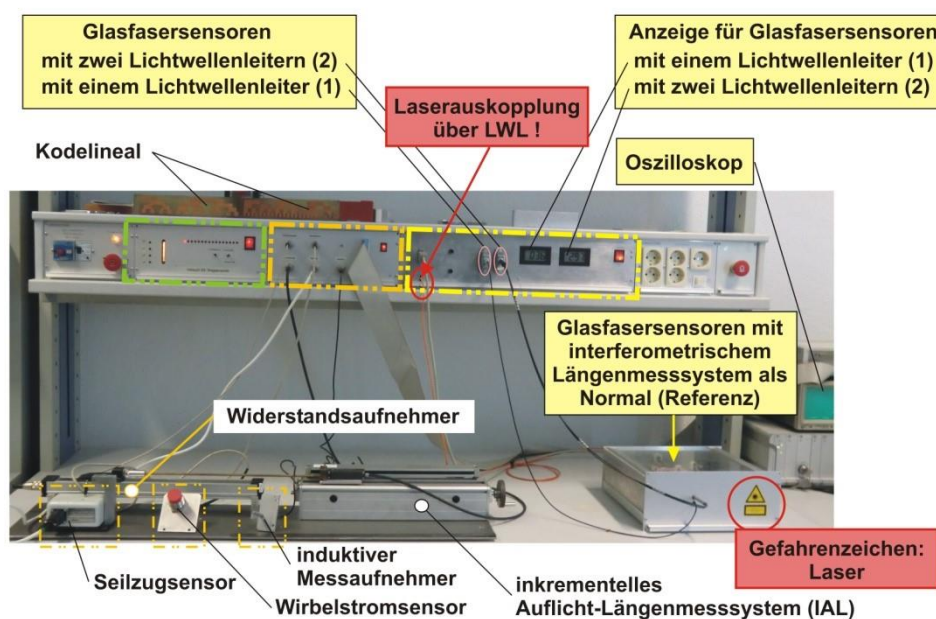


Bild 14: Praktikumsversuch „S3 – Wegsensoren“.

Der Versuchsaufbau für die Untersuchung der Wegsensoren besteht aus einer Linearführung mit Spindeltrieb, an die der Widerstandsaufnehmer, der Wirbelstromsensor, der Seilzugsensor und der induktive Sensor angekoppelt werden.

Tabelle 2: Zuordnung der Messaufnehmer bzw. der Sensoren zur Messwerterfassungskarte des PC.

Analogkanal-Nr.	Messaufnehmer bzw. Sensor
0	Wirbelstromsensor
1	Widerstandsaufnehmer
2	Seilzugsensor
3	induktiver Messaufnehmer

Am Führungsschlitten starr befestigt befindet sich der bewegliche Sensorkopf des inkrementellen Längenmesssystems (IAL), das als Längenreferenz (Normal) dient. Wahlweise werden hier die vier zu charakterisierenden Längenmessmittel in geeigneter Weise am Führungsschlitten befestigt.

Der der Längenmessung dienende Widerstandsaufnehmer als auch der potentiometrische Seilzugsensor werden mit vier Schrauben auf der Grundplatte befestigt. Das Seil des Seilzugsensors wird über eine Umlenkrolle geführt, das mittels eines Stifts und der Öse am Führungsschlitten zu befestigen ist. Der induktive Messaufnehmer und der Wirbelstromsensor werden an der linken Stirnseite der Führung mittels zweier Schrauben (Rändelschrauben) befestigt.

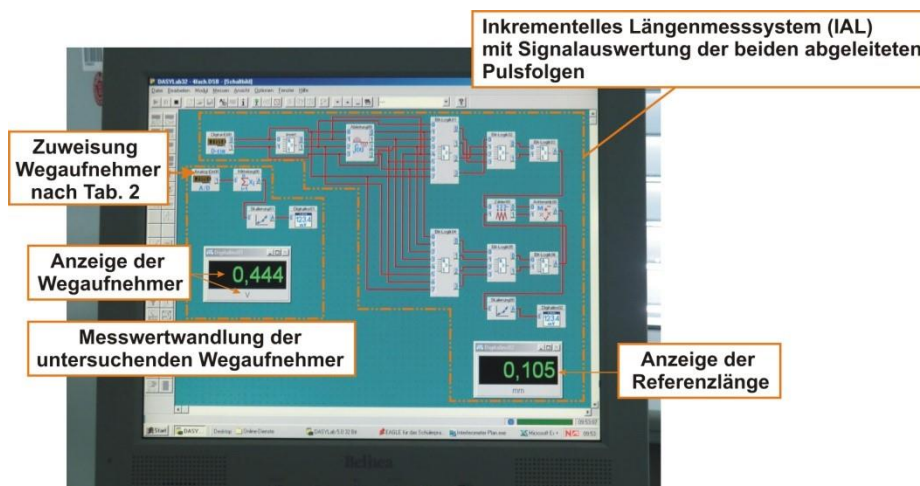


Bild 15: Praktikumsversuch S3: Bildschirm zur Bedienung des Versuches und zur Erfassung der Messwerte der zu charakterisierenden Längenmessmittel.

Die Messsignalerfassung der verschiedenen Wegsensoren erfolgt über eine im PC eingebaute Messwerterfassungskarte. Als Nutzeroberfläche findet das kommerziell erhältliche Programm „DASYLab“ seine Anwendung.

Im dritten und gelb gekennzeichneten Teil der Versuchsanordnung befinden sich der HeNe-Laser (Klasse 3A³) als monochromatische Strahlungsquelle zur Versorgung des Interferometers, die Strahlungsquellen und die optischen Detektoren der beiden Glasfasersensoren sowie die zugehörigen Anzeigen, die die Weg- bzw. Längenänderung als digitalen, unskalierten Anzeigewert auf dem jeweiligen Display anzeigen.

³ Bei Lasern der Klasse 3A sind spezielle Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Dementsprechend wird der Laserstrahl über eine in der Baugruppe geschützt angeordnete Kupplung in einen Lichtwellenleiter (Monomodefaser) eingekoppelt und in den Versuchsaufbau des Interferometers eingeleitet, wo der im LWL geführte Laserstrahl optisch aufgeweitet wird und zum Interferometer gelangt. Somit besteht im Versuchsaufbau, der nochmals mechanisch abgeschlossen ist, keine Gefährdung mehr. Die Versuchseinrichtung ist dennoch nach den geltenden gesetzlichen Bestimmungen als Gefährdung durch Laser auszuweisen (siehe Bild 14), weil in ihr ein Laser der Klasse 3A benutzt wird.

Zur Durchführung der Charakterisierung der Glasfasersensoren mit dem interferentiellen Längenmesssystem ist die Interpolatorhardware über die serielle Schnittstelle COM1 mit dem Rechner verbunden. Starten Sie die Datei „plan.exe“ im Verzeichnis „Interfer“. Überprüfen Sie die Phasenrichtigkeit der beiden Ausgangssignale am angeschlossenen Oszilloskop (Bild 14), die über die beiden BNC-Buchsen (90° Phasenverschiebung ideal) mit diesem verbunden sind.

4. Vorbereitung

Die folgenden Aufgaben dienen der Vorbereitung des Versuches und deren schriftliche Beantwortung ist Bestandteil des Versuchsprotokolls. **Eine** Ausfertigung der Vorbereitung ist **zu Beginn** des Praktikums **vorzulegen**.

1. Formulieren Sie den allgemeinen messtechnischen Grundsatz der Messtechnik. Erläutern Sie diesen am Beispiel des Wirbelstromsensors, bei dem bekanntlich eine durch das elektrische Feld bedingte Kraftwirkung entstehen kann.
2. Entwickeln Sie eine allgemeine Gleichung für die statische Übertragungsgleichung und entwerfen Sie zur Veranschaulichung dafür ein Blockschema. Verwenden Sie x_e als Messgröße und x_a als gewandelte Messgröße (Messgrößenwandlung).
3. Beschreiben Sie analytisch den Begriff „Messempfindlichkeit“ und berechnen Sie auf der Basis dieser Definition die Messempfindlichkeit der von Ihnen in der Vorbereitungsaufgabe Nr. 2 abgeleiteten allgemeinen Gleichung der statischen Übertragungsgleichung.
4. Ein Präzisionslängenmessgerät erfasst bei 1 mV Ausgangsspannungsdifferenz eine Längenänderung von 1,0 nm. Berechnen Sie die Messempfindlichkeit dieses Messmittels.
5. Entwerfen Sie eine **Schaltungsanordnung** für den potentiometrischen Wegaufnehmer (Bild 12) und leiten Sie die zugehörige statische Übertragungsgleichung her, wenn eine Konstantspannungsquelle mit der Spannung U_0 eingesetzt wird und der spezifische Widerstand ρ sowie der Querschnitt A über die Länge der Widerstandsbahn (l_0) konstant sind.
6. Welche Größe muss neben den benannten Randbedingungen der Vorbereitungsaufgabe Nr. 5 bekannt sein, um aus dem statischen Übertragungsfaktors k_p den Wert der Konstantspannung U_0 bestimmen zu können? **Hinweis:** Diese Größe muss zur Beantwortung der Aufgabenstellung in 5.2 im Versuchsaufbau bestimmt werden!
7. Berechnen Sie **analytisch** die Messabweichung ΔL bei einem zufällig auftretenden Kippwinkel von $\hat{\varphi} \ll \frac{\pi}{4}$ unter der Verletzung und der Einhaltung des Abbéschen Komparatorprinzips. Weisen Sie dabei die Messabweichungen als 1. bzw. 2. Ordnung aus.
Hinweis: Die Reihenentwicklung der Winkelbeziehungen benutzen!
8. In welcher Weise sind die im Laborversuch zu untersuchenden Längenmessmittel an das als Normal (Referenz) dienende inkrementelle Auflicht-Längenmesssystem (IAL) anzukoppeln, um Messabweichungen 1. Ordnung zu vermeiden. Skizzieren Sie den dafür notwendigen Messaufbau exemplarisch für die Längenmessung mittels eines Widerstandsaufnehmers.
9. Ein Messmittel wird zwecks Prüfung an ein Normal (Referenzmessmittel) in geeigneter Weise angekoppelt. An welchem der beiden Messmittel ist die zu messende Größe (Messgröße) einzustellen und an welchem Messmittel ist der zugehörige Messwert der Messgröße abzulesen? Begründen Sie Ihre Schlussfolgerung und überprüfen Sie diese

zu Beginn der Aufgabenstellung 5.2 exemplarisch bei der Messanordnung aus Widerstandsaufnehmer und inkrementellem **Auflicht-Längenmesssystem** (IAL).

10. Erläutern Sie den Unterschied zwischen Eichung, Kalibrierung und Skalierung. Welche Anforderungen werden dabei an die Referenzmessmittel gestellt?
11. Welche Aufgabe hat das Gegenraster bei inkrementellen Maßstäben (vgl. Bild 6)? Ist dieses Gegenraster zwingende Voraussetzung für die Funktion der Vor-RückwärtsZählung bei inkrementellen Messverfahren?
12. Berechnen Sie die Messempfindlichkeit des modifizierten Michelson-Interferometers aus Bild 11 im Vergleich zu der im Bild 10 gezeigten Anordnung, wenn die Brechzahl n auf einen Wert von 1 genähert wird.
Welche Ausführung besitzt die höhere Messempfindlichkeit. Begründen Sie ihre Schlussfolgerung.
13. Aus dem Kerndurchmesser von $2r_0$ eines der Längenmessung dienenden Lichtwellenleiters (LWL) wird eine Lichtleistung von P_{LED} auf eine reflektierende Fläche ausgekoppelt. **Skizzieren** Sie diesen Sachverhalt und berechnen Sie **analytisch** die auf der Messoberfläche im Abstand von s (Bild 13) entstehende Strahlungsleistungsdichte (Strahlungsintensität), wenn der Öffnungswinkel der aus dem Lichtwellenleiter austretenden Lichtstrahlung σ_{LWL} beträgt!
14. Informieren Sie sich über die Funktionsprinzipien aller der beim Versuch „S 3: Wegsensoren“ zu charakterisierenden Längenmessmittel sowie der beiden eingesetzten Referenzmessmittel (Normale).

5. Aufgabenstellungen

- 5.1. Untersuchen Sie die Funktionsweise der digitalen Längenmessung auf der Basis direkt kodierter Längen mit Hilfe der vorhandenen Kodelineale bei:

- Einfachabtastung (binäre Kodierung)
- V-Abtastung (binäre Kodierung)
- einschrittiger Kode (Gray-Kode)

Beurteilen Sie die drei Verfahren nach ihrem Verhalten bezüglich Schrittabweichungen und dem notwendigen Aufwand bei ihrer Anwendung in einem Längenmessmittel.

- 5.2 Der als Längenmessmittel dienenden Widerstandsaufnehmers ist mit Hilfe des inkrementelle Auflicht-Längenmesssystem (IAL) zu skalieren.

Der Messbereich des zu untersuchenden Längenmessmittels sollte in 11 oder 13 äquidistante Intervalle geteilt werden und die zugehörige Messreihe ist in Referenz zum IAL aufzunehmen. Das als Längenreferenz dienende inkrementelle Auflicht-Längenmesssystem (IAL) besitzt ohne die Berücksichtigung der Digitalisierungsabweichung für einen Messwert eine statistisch bedingte Messunsicherheit von $1,7 \mu\text{m}$. Zur Auswertung der einzelnen Messreihen sind folgende Aufgaben zu lösen:

1. Überprüfen Sie experimentell an welchem Längenmessmittel eine Referenzlänge eingestellt und an welchem der beiden Längenmessmittel die eingestellte Länge abgelesen wird – **Vorbereitungsaufgabe Nr. 9**.
2. Bestimmen Sie unter **sinnvoller Rundung die Messunsicherheit eines Messwertes**, der an dem als Referenz (Normal) dienenden inkrementellen AuflichtLängenmesssystems (IAL) abgelesen wird.
3. Begründen Sie ausgehend von den Ihnen vom Versuchsaufbau des Laborpraktikums bekannten Informationen, warum nur eine Skalierung und keine Eichung der Längenmessmittel vorgenommen werden kann.

4. Bestimmen Sie die statische Übertragungsgleichung des Längenmessmittels.
 5. Berechnen Sie, ausgehend von der statischen Übertragungsgleichung, die Messempfindlichkeit des untersuchten Längenmessmittels.
 6. Berechnen Sie auf der Basis der in der Vorbereitungsaufgabe Nr. 3 abgeleiteten statischen Übertragungsgleichung und dem ermittelten statischen Übertragungsfaktor den Wert der im Versuchsaufbau benutzten Konstantspannungsquelle.
 7. Bestimmen Sie ausgehend von der statischen Übertragungsgleichung die Gleichung zur Skalierung des Widerstandsaufnehmers.
- 5.3 Nehmen Sie unter Verwendung des inkrementelle Auflicht-Längenmesssystem (IAL) die Kennlinien der folgenden Messaufnehmer bzw. Sensoren auf:
- Seilzugsensor
 - induktiver Messaufnehmer (Differentialtransformator)

Der Messbereich der zu untersuchenden Längenmessmittel sollte wieder in 11 oder 13 äquidistante Intervalle geteilt werden und die zugehörigen Messreihen der beiden Längenmessmittel sind in Referenz zum IAL aufzunehmen.

Zur Auswertung der einzelnen Messreihen sind folgende Aufgaben zu lösen:

1. Bestimmen Sie die statische Übertragungsgleichung der beiden Längenmessmittel.
 2. Berechnen Sie ausgehend von der statischen Übertragungsgleichung die Messempfindlichkeit der untersuchten Längenmessmittel.
 3. Bestimmen Sie ausgehend von den statischen Übertragungsgleichungen die zugehörigen Skalierungsgleichungen der beiden untersuchten Längenmessmittel.
- 5.4 Nehmen Sie unter Verwendung des inkrementelle Auflicht-Längenmesssystem (IAL) die Kennlinien des Wirbelstromsensors auf, wobei als Koppelfläche für die Längenänderung folgende Materialien zum Einsatz kommen:
- massiver Stahlquader
 - massiver Aluminiumquader
 - auf einen Teflonquader aufgeklebte 35 µm dicke Kupferfolie

Hinweis: Bei der Einweisung in den Versuchsaufbau des Versuchs „S 3: Wegsensoren“ wird die Vorgehensweise bei der Aufnahme der Messreihen des Wirbelstromsensors noch detailliert besprochen.

Zur Auswertung der einzelnen Messreihen sind folgende Aufgaben zu lösen:

1. Beschreiben Sie qualitativ den Verlauf der drei Kennlinien (Darstellung zur besseren Gegenüberstellung in einem Diagramm) des Wirbelstromsensors und begründen Sie diesen.
2. Zeichnen Sie in den Verlauf der Kennlinien den Bereich ein, in dem in guter Näherung ein lineares Verhalten für eine Längenmessung benutzt werden kann.
3. Bestimmen Sie für die linearen Messbereiche der eingesetzten drei Materialien die statischen Übertragungsgleichungen des Wirbelstromsensors.
4. Berechnen Sie ausgehend von den statischen Übertragungsgleichungen die Messempfindlichkeiten des Wirbelstromsensors für die untersuchten Koppelbedingungen.
5. Bestimmen Sie ausgehend von den statischen Übertragungsgleichungen die Gleichungen zur Skalierung des Wirbelstromsensors in den untersuchten Anwendungen.

5.5 Nehmen Sie die Kennlinien der beiden Lichtwellenleiter-Reflex-Sensoren (Glasfasersensoren) auf!

Beachten Sie dabei, dass das elektrische Ausgangssignal der beiden Glasfasersensoren nur als Zahlenwert auf den beiden Anzeigedisplays angezeigt wird.

Hinweis: Bei der Einweisung in den Versuchsaufbau des Versuchs „S 3: Wegsensoren“ wird die Vorgehensweise bei der Aufnahme der Messreihen der beiden Glasfasersensoren noch detailliert besprochen.

Zur Auswertung der einzelnen Messreihen sind folgende Aufgaben zu lösen:

1. Beschreiben Sie Bezug nehmend auf die Beantwortung der Vorbereitungsaufgabe Nr. 13 qualitativ die Eigenschaften der beiden Kennlinien der Glasfasersensoren und begründen Sie den davon abweichenden Verlauf eines der beiden Sensoren durch eine geeignete Skizze.
2. Zeichnen Sie in den Verlauf der beiden Kennlinien den bzw. die Bereiche ein, in denen näherungsweise ein lineares Verhalten zur Längenmessung genutzt werden kann.
3. Bestimmen Sie für den eingezeichneten linearen Messbereich der beiden Glasfasersensoren die statische Übertragungsgleichung.
4. Berechnen Sie ausgehend von den statischen Übertragungsgleichungen die zugehörigen Messempfindlichkeiten im angenäherten linearen Messbereich der beiden Glasfasersensoren.
5. Bestimmen Sie ausgehend von den statischen Übertragungsgleichungen die Gleichungen zur Skalierung der beiden Glasfasersensoren im linearisierten Messbereich.

Literatur

- Schrüfer, E.: Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen. – 9. Auflage, Carl Hanser Verlag; München, Wien; 2007.
- Hauptmann, P.: Sensoren-Prinzipien und Anwendungen. - Carl Hanser Verlag; München, Wien; 1991.
- SI Broschüre Nr. 8: *Le Système international d'unités / The International System of Units* (8^e edition, 2006). - Übersetzung aus dem Französischen in den PTB-Mitteilungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig. 117. Jahrgang, Heft 2. Wirtschaftsverlag NW – Bremerhaven, 2007.
Die deutsche Übersetzung finden Sie als pdf-Dokument unter www.ptb.de (Rubrik „Publikationen“).
- Sahner, G.: Digitale Messverfahren. - Verlag Technik, Berlin 1990.
- Pfeifer, Profos, P.: Handbuch der industriellen Messtechnik. - Oldenbourg, München, Wien; 2008.
- Göpel, W; Hesse, J.; Zemel, J. N.: Sensors-A Comprehensive Survey. - Teil 5: Magnetic Sensors; VCH Verlagsgesellschaft mbH; Weinheim; 1989.
- Schaumburg, H.: Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik. - Teil 3: Sensoren; B.G. Teubner; Stuttgart; 1992.