

**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Mikro- und Sensorsysteme (IMOS)

---



**Wegsensoren**

**(S 3)**

## **Laborpraktikum Sensorik**

Betreuer: Dipl.-Ing. Adler  
Verfasser: Felix Bangemann, Philipp Bartels, Axel Winkler  
Ort, Datum: Magdeburg, 05.05.2009  
Datei: S3\_Wegsensoren\_fba\_pba\_awi.doc

# Inhaltsverzeichnis

1	VERSUCHSZIEL.....	3
2	GRUNDLAGEN ZUM VERSUCH.....	3
2.1	Aufgabenstellung.....	3
2.2	Vorbereitungsfragen .....	4
2.3	Versuchsaufbau.....	8
3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	9
3.1	Messdaten.....	9
3.2	Auswertung.....	11
4	LITERATUR.....	15

# 1 Versuchsziel

Ziel des Versuches ist das Kennenlernen von verschiedenen Wegsensoren, deren messtechnischen Eigenschaften, der Auswertung ihrer Ausgangssignale und die Entstehung von systematischen und zufälligen Messfehlern. Als Anwendungsbeispiel wurde eine Versuchsanordnung ausgewählt, mit der der Fehlereinfluss mit und ohne Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips gezeigt werden kann. Der Darstellung der physikalischen Größe Länge dient ein inkrementelles Auflicht-Längenmesssystem (Referenz).

## 2 Grundlagen zum Versuch

### 2.1 Aufgabenstellung

#### 2.1.1

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)
- einschrittigem Kode (Gray-Kode).

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

#### 2.1.2

Skalieren Sie die Schaltungen so, dass die Ausgangssignale direkt in „mm“ angezeigt werden und stellen Sie die statischen Kennlinien aller vier Sensoren graphisch dar!

#### 2.1.3

Ermitteln Sie mit der potentiometrischen Anordnung die Reproduzierbarkeit der Messanordnung bei Einhaltung und Verletzung des Abbe'schen Komparatorprinzips. Stellen Sie dazu jeweils 12-mal wechselseitig den gleichen Wert ein und registrieren Sie die zugehörigen Messwerte. Werten Sie die Messreihen statistisch aus! Begründen Sie ihr Ergebnis!

#### 2.1.4

Nehmen Sie die Kennlinien der beiden Fasersensoren auf!

#### 2.1.5

Ermitteln Sie die maximale Empfindlichkeit des Interferometers.

## 2.2 Vorbereitungsfragen

### 2.2.1 Entwickeln Sie die Logik zur Richtungserkennung bei der Abtastung des inkrementellen Gebers (IAL) im Fall der Einfach- sowie der Mehrfachauswertung.

Um die Bewegungsrichtung bei der Abtastung des inkrementellen Gebers (IAL) werden zwei um  $\frac{1}{4}$  der Quantisierungseinheit versetzte Sensoren benötigt. Durch die Versetzung der Sensoren auf der Spur entstehen zwei versetzte Impulse. Mit einem D-Flip-Flop kann man diese Impulse hinsichtlich der Bewegungsrichtung auswerten.

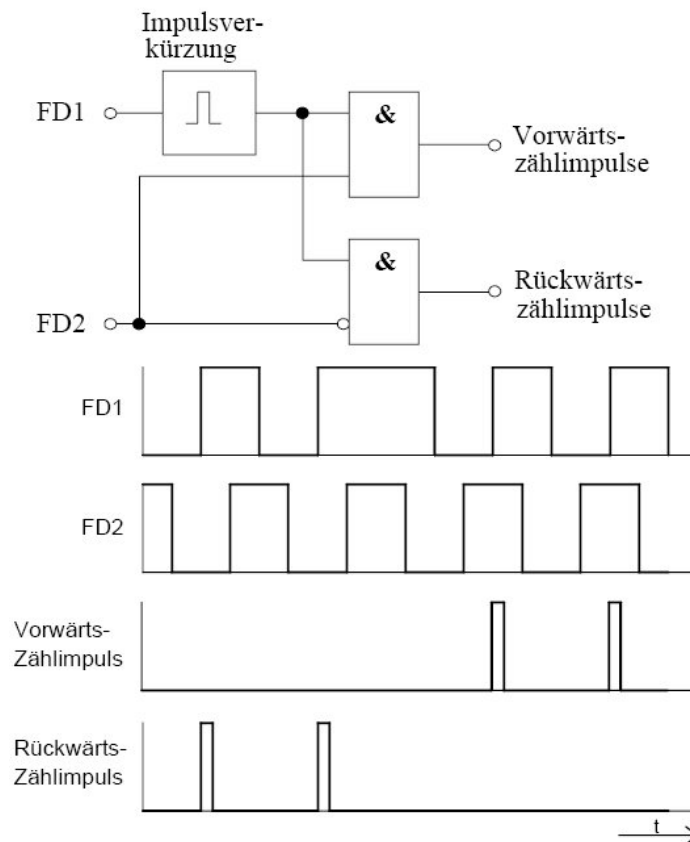
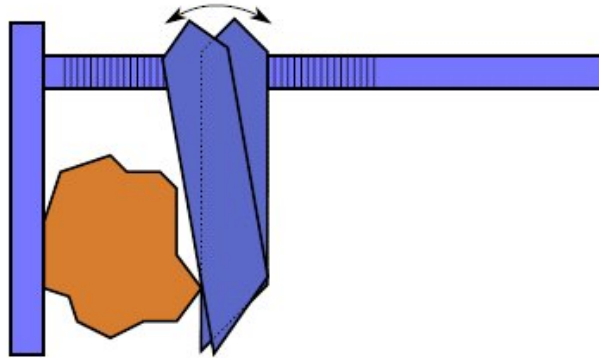


Abbildung 1: Logikschaltung und Signalbild zur Richtungserkennung

### 2.2.2 Informieren Sie sich über das Abbe'sche Komparatorprinzip und seine Anwendung sowie über entstehende Fehler.

Das Abbe'sche Komparatorprinzip ist ein grundlegendes Prinzip, nach dem Längenmessgeräte aufgebaut sein sollten, um eine hohe Messgenauigkeit zu erhalten. Es besagt, dass Maßstab und Messobjekt auf einer Geraden liegen sollen um Messfehler 1. Ordnung zu eliminieren.

Bei Missachtung des Abbe'schen Komparatorprinzips treten bei schlechter Führung (z.B. durch Fertigungstoleranzen) Kippfehler 1. Ordnung auf:



**Abbildung 2: Missachtung des Abbe'schen Komparatorprinzips**

Dadurch entstehen Messfehler, die proportional zum Abstand  $a$  von Messstrecke zu Maßstab sowie dem Kippwinkel  $\varphi$ :

$$\Delta x_1 = a \cdot \sin \varphi \approx a \cdot \varphi \quad (1)$$

Wenn Maßstab und Messstrecke in einer Flucht angeordnet werden, ist  $a = 0$  und somit verschwindet der Fehler 1. Ordnung.

Aber es treten hierbei Kippfehler 2. Ordnung auf, die sich aber kaum auf das Messresultat auswirken und deshalb meist vernachlässigt werden können.

### 2.2.3 Welche Aufgabe hat das Gegenraster bei inkrementellen Maßstäben?

Das Gegenraster dient zur Richtungsbestimmung und Referenz für das Rasterlineal. Damit können also die Bewegungsrichtung und die absolute Strecke in Relation zu einer Referenzstelle bestimmt werden.

## 2.2.4 Informieren Sie sich über die Funktionsprinzipien der verschiedenen Wegmessverfahren

### 2.2.4.1 Inkrementelle Wegmessung

Bei der Inkrementellen Wegmessung ist die Messstrecke in gleich große Intervalle unterteilt. Während der Wegmessung wird die Anzahl  $n$  der mit dem Sensor überstrichenen Intervalle gezählt. Über die Intervallbreite  $d$  kann somit die überstrichene Länge bestimmt werden:  $l = n \cdot d$  (2)

Je kleiner die Intervallbreite ist, desto genauer kann dabei die Länge bestimmt werden.

Ein Problem dieses Verfahrens ist, dass das verwendete Raster keinerlei Informationen über die Bewegungsrichtung enthält. Hierfür sind zusätzliche Informationen (z.B. von einem zusätzlichen Sensor) notwendig.

### 2.2.4.2 Ohmsche Wegmessung

Für die Ohmsche (oder auch Potentiometrische) Wegmessung wird ein Linearpotentiometer verwendet. Dieses funktioniert als Spannungsteiler und wird durch eine Gleichspannungsquelle betrieben. Durch das Messobjekt wird der Mittelabgriff des Potentiometers verschoben, wodurch sich die abgegriffene Teilspannung verändert. Bei geeignet gewählter Messschaltung ergibt sich eine dem Messweg lineare Spannung.

### 2.2.4.3 Induktive Wegmessung

Das Sensorsystem der Induktiven Wegmessung besteht im Wesentlichen aus der Kombination einer (Primär-)Spule, die in zwei symmetrisch gekoppelte (Sekundär-)Spulen Wechselfspannungen induziert.

In diesen Spulen kann sich ein Eisenkern entlang des zu messenden Wegs frei bewegen. In Nullposition taucht er in die Sekundärspulen gleich weit ein, so dass die Amplituden der induzierten Spannungen gleich groß sind. Die induzierten Spannungen sind aber genau  $180^\circ$  phasenverschoben, so dass die resultierende Spannung gleich Null ist.

Wird der Eisenkern nun um die Wegstrecke  $s$  verschoben, so sind die Amplituden der induzierten Spannungen nicht mehr gleich groß, so dass sich eine lineare Abhängigkeit zwischen Ausgangsspannung und Wegstrecke ergeben.

### 2.2.4.4 Interferentielle Wegmessung

Die Interferentielle Wegmessung basiert auf der Interferenz zweier Lichtstrahlen, deren Gangunterschied dem zu messenden Weg (oder einem Vielfachen davon) entspricht.

Im entstehenden Interferenzbild wird die Anzahl  $m$  der Minima der Lichtstärke gezählt.

Damit lässt sich die Wegänderung berechnen nach:

$$\Delta s = \frac{\lambda \cdot m}{2n(p, f, \vartheta)} \quad (3)$$

$\Delta s$  messbare Wegänderung,  $m$  Zählimpuls,  $\lambda$  Strahlerwellenlänge,  $n$  Brechzahl als Funktion vom absoluten Luftdruck  $p$ , Luftfeuchte  $f$  und der Lufttemperatur  $\vartheta$

### 2.2.4.5 Wirbelstrommessung

Für die Wirbelstrommessung wird vom Sensor ein Magnetfeld aufgebaut. Nähert sich ein elektrisch leitfähiges Objekt dem Sensor, so wird in das Messobjekt ein Wirbelstrom induziert. Die dadurch hervorgerufene Spannungsänderung im Sensor ist ein Maß für den Abstand zwischen Messobjekt und Sensor.

#### 2.2.4.6 Ultraschallwegmessung

Die vom Sensor emittierten Ultraschallwellen werden vom Messobjekt reflektiert und erreichen den Empfänger mit einer zeitlichen Verzögerung  $\Delta t$ . Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit  $a$  der Schallwellen kann somit nach:

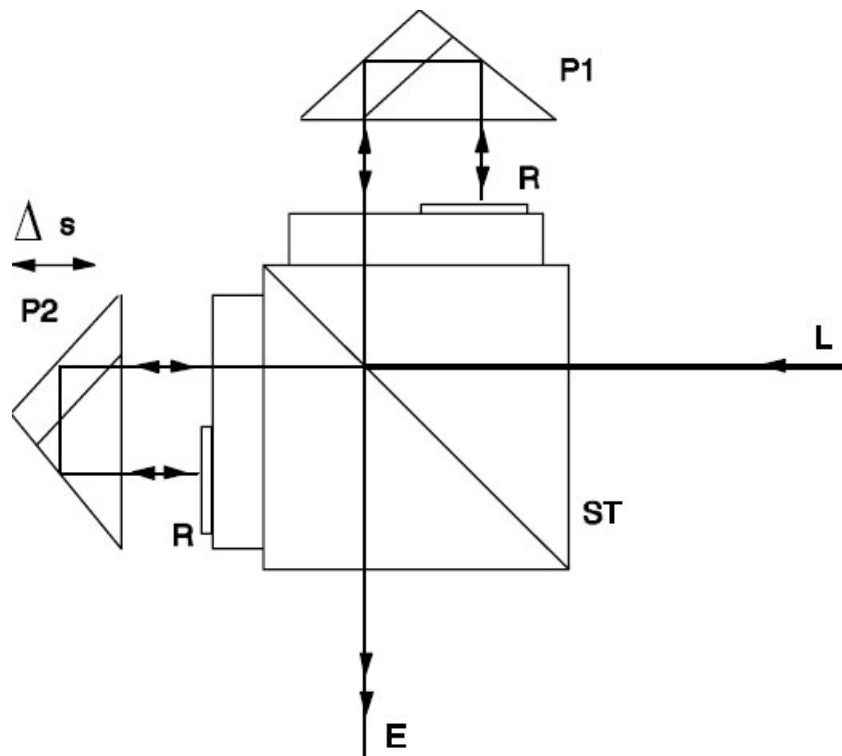
$$e = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t \quad (4)$$

die Entfernung  $e$  vom Objekt bestimmt werden.

Für dieses Verfahren werden bestimmte Anforderungen an die Reflexionseigenschaften des Objekts gestellt. Diese sind von dessen Form und Material abhängig.

#### 2.2.5 Informieren Sie sich über die Funktionsweise eines Michelson-Interferometers.

Eine mögliche Interferometerbauart ist das Michelson-Interferometer:



**Abbildung 3: Modifiziertes Michelson-Interferometer, L Lichtquelle, E Empfänger, R Reflexionsschicht, P1 feststehendes Tripelprisma, P2 bewegliches Tripelprisma**

Durch die Verwendung von Tripelprismen anstatt einfacher Planspiegel kann die Messempfindlichkeit verdoppelt werden, da die Welle die Strecke vom Strahlteiler zum Reflektor vierfach und nicht zweifach wie bei Planspiegeln durchläuft.

Durch Anordnung eines zweiten Empfängers im Interferenzbild, welcher zum ersten versetzt angeordnet ist, erhält man zwei phasenverschobene Signale (ideal sind  $90^\circ$ , Sin/Cos-Signale). Es ergibt sich somit eine Wegänderung nach Gleichung (3).

## 2.3 Versuchsaufbau

Die Versuchsanordnung besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil enthält die Aufbauten zu direkten Kodierverfahren. 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 Teil der Versuchsanordnung befinden sich die einzelnen Sensoren, die über eine PC-Meßkarte mit dem PC gekoppelt sind. Die Signale der Kanäle der Messkarte können mit dem Messdatenerfassungsprogramm DASYLab ausgewertet werden. Die Signale des inkrementellen Wegmeßsystems (IAL) sind mit den Digitaleingängen der Meßkarte verbunden. Die anderen Sensoren liefern Analogsignale und sind mit den Analogeingängen der Meßkarte verbunden. Die Zuordnung der einzelnen Sensoren zu dem jeweils zugehörigen Analog- bzw. Digitalkanal unter DASYLab ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

<b>Analogkanal-Nr.</b>	<b>Sensor</b>
0	Wirbelstromsensor
1	Widerstandsaufnehmer
2	Seilzugsensor
3	induktiver Sensor
<b>Digitalkanal-Nr.</b>	<b>Sensor</b>
0	inkrementeller Geber (IAL) - FD1
1	inkrementeller Geber (IAL) - FD2

Der Versuchsaufbau der Wegsensoren wie Wirbelstromsensor, Seilzugsensor und induktiver Sensor besteht aus einer Linearführung mit Spindelantrieb. Am Führungsschlitten starr befestigt, befindet sich der bewegliche Sensorkopf des inkrementellen Wegmeßsystems (IAL), das als Längenreferenz dient. Wahlweise können vier unterschiedliche Wegsensoren am Führungsschlitten befestigt werden. Die beiden induktiv wirkenden Sensoren werden an der linken Stirnseite der Führung mittels zweier Schrauben befestigt. Der potentiometrische Seilzugsensor (Widerstandsaufnehmer) wird mit vier Schrauben auf der Grundplatte befestigt. Das Seil wird über eine Umlenkrolle geführt und am Führungsschlitten befestigt. Der Widerstandsaufnehmer zur Längenmessung kann alternativ parallel oder linear zur Referenz (IAL - inkrementelles Auflichtlängenmeßsystem) arretiert werden. Die Messsignalerfassung der verschiedenen Wegsensoren erfolgt über eine im PC eingebaute Messwerterfassungskarte. Als Nutzeroberfläche findet das kommerziell erhältliche Programm „DASYLab“ seine Anwendung. Zum Anschluss des Interferometers verbinden Sie die Interpolatorhardware mit dem Rechner über die serielle Schnittstelle COM1. Schalten Sie die Geräte ein. Danach starten Sie die Datei „plan.exe“ im Verzeichnis „Interfer“. Überprüfen Sie die Phasenrichtigkeit der beiden Ausgangssignale mittels Oszilloskopes über die beiden BNC-Buchsen (90° Phasenverschiebung ideal).



### 3 Versuchsdurchführung

#### 3.1 Messdaten

Auf Raten des Praktikumsbetreuers haben wir uns mehr mit dem Wirbelstromsensor beschäftigt und dafür die Versuche zur digitalen Längenmessung ausgelassen. Statt der potentiometrischen Messung verwendeten wir den Seilzugsensor.

Beim Wirbelstromsensor standen uns drei Messobjekte zur Verfügung: ein Aluminiumblock, ein Eisenblock und eine auf Styropor angebrachte Kupferplatte.

Seilzugsensor		Wirbelstromsensor			
Weg [mm]	Spannung [V]	Eisen		Kupfer	Aluminium
		Weg [mm]	Spannung [V]	Spannung [V]	Spannung [V]
0	1,175	0,000	0,007	0,007	0,039
1	1,182	0,250	0,007	0,007	0,199
2	1,194	0,500	0,007	0,007	0,395
5	1,219	1,000	0,007	0,007	0,800
10	1,265	1,500	0,007	0,007	1,180
15	1,313	2,000	0,007	0,007	1,650
20	1,361	2,500	0,007	0,007	2,072
25	1,406	3,000	0,007	0,007	2,506
30	1,453	3,500	0,007	0,080	2,947
40	1,547	3,750	0,007	0,228	3,054
50	1,641	4,000	0,007	0,342	3,388
60	1,738	4,500	0,007	0,630	3,766
70	1,829	5,000	0,007	0,975	4,126
80	1,925	5,500	0,007	1,313	4,490
90	2,017	5,750	0,281	1,476	4,612
100	2,109	6,000	0,456	1,683	4,745
110	2,203	6,500	0,689	2,021	4,745
120	2,296	7,000	0,984	2,341	4,745
130	2,393	7,500	1,316	2,665	4,745
140	2,485	8,000	1,583	2,999	4,745
150	2,581	8,500	1,944	3,276	4,745
160	2,676	9,000	2,224	3,624	4,745
170	2,769	9,500	2,513	3,847	4,745
180	2,863	10,000	2,832	4,150	4,745
190	2,958	10,500	3,135	4,403	4,745

200	3,049	11,000	3,454	4,617	4,745
210	3,142	11,500	3,725	4,745	4,745
220	3,236	12,000	3,969	4,745	4,745
230	3,328	12,500	4,185	4,745	4,745
240	3,428	13,000	4,413	4,745	4,745
250	3,517	13,500	4,627	4,745	4,745
260	3,614	13,750	4,726	4,745	4,745
270	3,708	14,000	4,745	4,745	4,745

Tabelle 1: Messdaten des Seilzug- und Wirbelstromsensors

induktiver Sensor	
Weg [mm]	Spannung [V]
0	-2,975
-1	-2,12
-2	-1,099
-3	-0,065
-4	0,959
-5	1,967
-6	2,986
-7	4,019
-7,5	4,283

Tabelle 2: Messdaten des induktiven Sensors

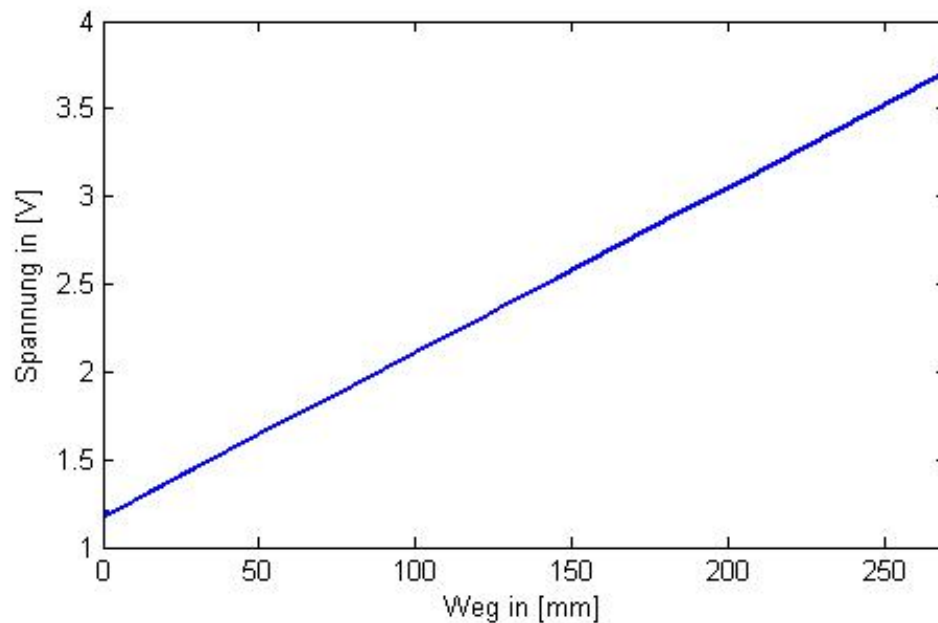
Interferometer		
Weg [mm]	einphasiger Sensor	zweiphasiger Sensor
0,0	14	158
-0,5	14	203
-1,0	16	222
-1,5	17	244
-2,0	19	265
-2,5	21	288
-3,0	25	308
-3,5	29	320
-4,0	35	316
-4,5	43	286

Tabelle 3: Messdaten der Lichtwellenleiter und des Interferometers

## 3.2 Auswertung

### 3.2.1 Seilzugsensor

Für den Seilzugsensor ergibt sich mit den oben angegebenen Messdaten die folgende Kennlinie:



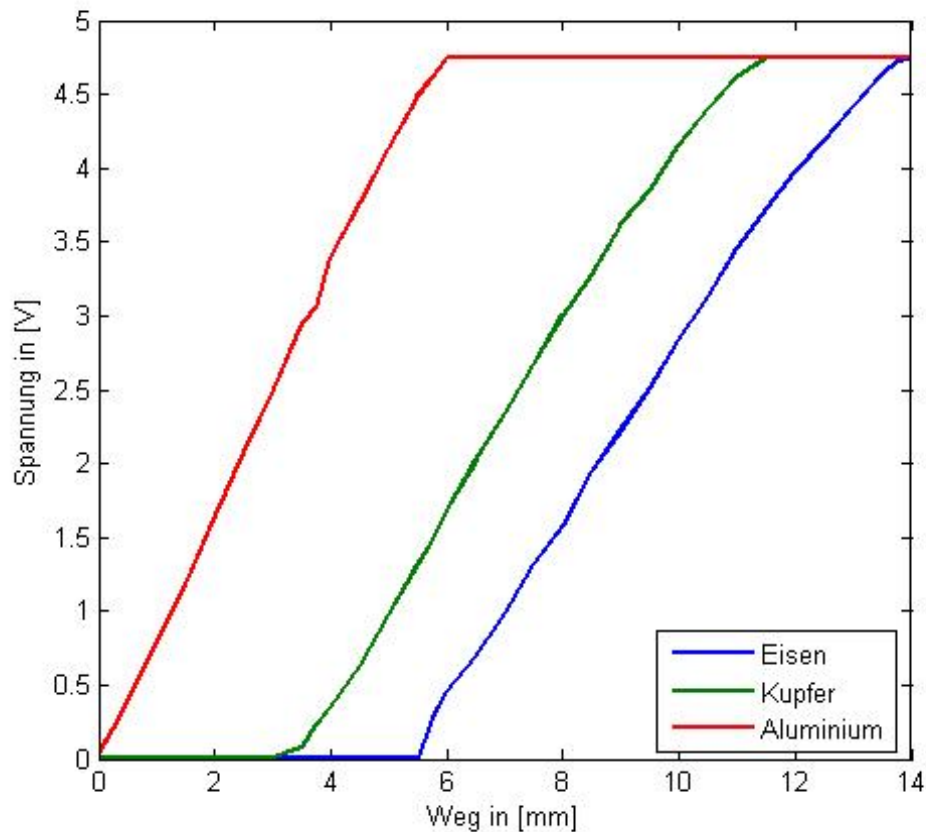
**Abbildung 4: Kennlinie des Seilzugsenors**

Wie leicht zu erkennen ist, ergibt sich für die Kennlinie des Seilzugsenors ein linearer Verlauf, der eine sehr gute Näherung an den wahren Wert darstellt.

Zu Anfang der Messung mittels Seilzugsenors machten wir den Fehler, das Seil nicht parallel zur Referenzmessstrecke zu spannen. Dies führte zu einem systematischen Fehler, der indirekt proportional zum gemessenen Weg ist. Glücklicherweise wurde der Fehler frühzeitig erkannt, so dass wir die Messwerte verwarfen und nach Minimieren der Winkelabweichung die Messung neu durchführten.

### 3.2.2 Wirbelstromsensor

Für die drei Messobjekte ergeben sich im Diagramm die folgenden drei Kurvenverläufe:



**Abbildung 5: Messkurven des Wirbelstromsensors**

Für den Wirbelstromsensor ergeben sich also je nach Messobjekt unterschiedliche Kennlinien. Dies liegt daran, dass in jedem Messobjekt je nach Material, Verarbeitung und Form unterschiedlich starke Wirbelströme induziert werden und die Energie des elektromagnetischen Feldes schwächen.

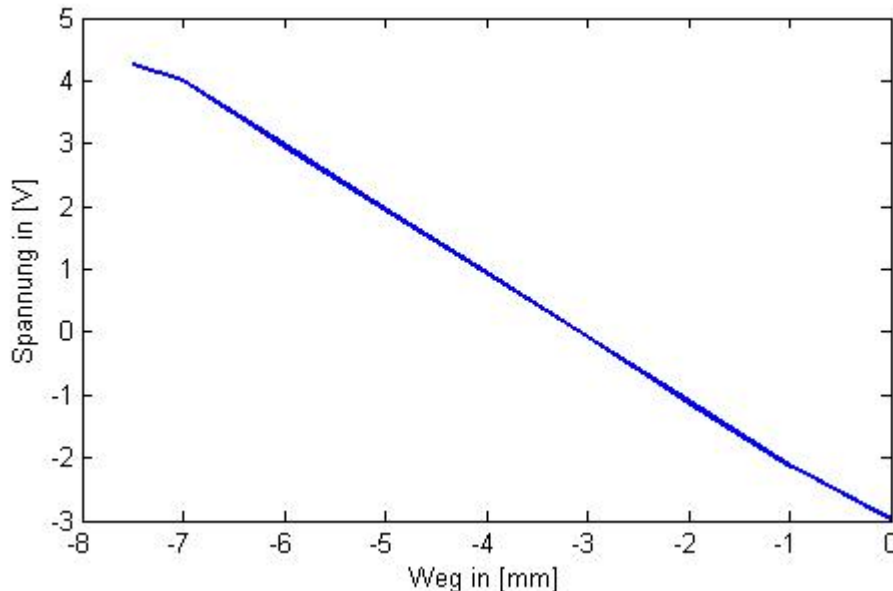
In technischen Anwendungen sollen diese Wirbelströme möglichst vermieden werden, da sie Energieverluste darstellen. Dies kann am Einfachsten durch die Stapelung von untereinander isolierten Metallblechen erfolgen. Je höher die Frequenz des Feldes ist, desto dünner müssen die Metallbleche werden, um effektiv Wirbelströme zu vermeiden. In der Hochfrequenztechnik wird Eisenpulver, das sich in einem Isoliermaterial befindet, verwendet.

Auffällig ist auch, dass alle Kurven die gleichen Minima/Maxima haben, was den Messbereich des Sensors darstellt. Zwischen diesen Minima/Maxima verlaufen alle drei Kurven ähnlich, nämlich näherungsweise linear.

Im Gegensatz zum Interferometer (weiter unten beschrieben) ist der Wirbelstromsensor unbeeinflussbar von Staub, Abnutzung, etc. aber trotzdem nicht störsicher (z.B. durch einen Magneten oder andere elektrische Geräte).

### 3.2.3 induktiver Wegaensor

Für den induktiven Wegaensor ergibt sich mit den oben angegebenen Messdaten die folgende Kennlinie:



**Abbildung 6: Kennlinie des induktiven Wegaensors**

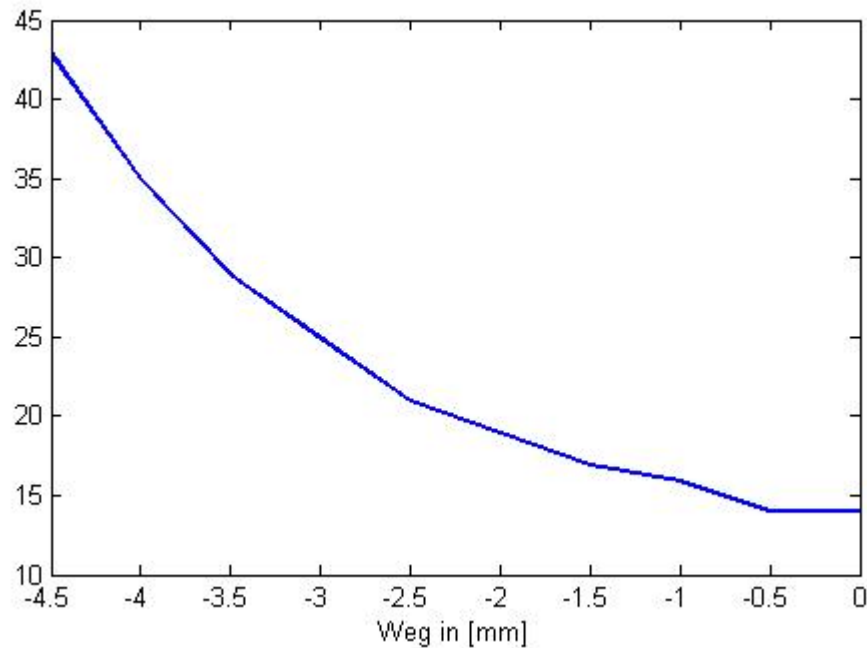
Der induktive Wegaensor hat aufgrund seiner Bauform nur eine Messspanne von wenigen Millimetern. In den Randgebieten (bei uns um -0,5 und -7,5 mm) treten Abweichungen auf. Dazwischen ist sehr gut eine lineare Abhängigkeit zwischen Weg und induzierter Spannung erkennbar.

### 3.2.4 Interferometer und Lichtwellenleiter

Mit dem Interferometer lassen sich (bei geeignetem Aufbau ohne Störungen) Wegstrecken im Nanometer-Bereich messen. Allerdings ist es sehr störanfällig und kann zum Beispiel von Staub in der Luft, äußeren Lichteinwirkungen oder Schwingungen der Unterlage (z.B. Klopfen auf die Arbeitsfläche) bereits stark beeinflusst werden.

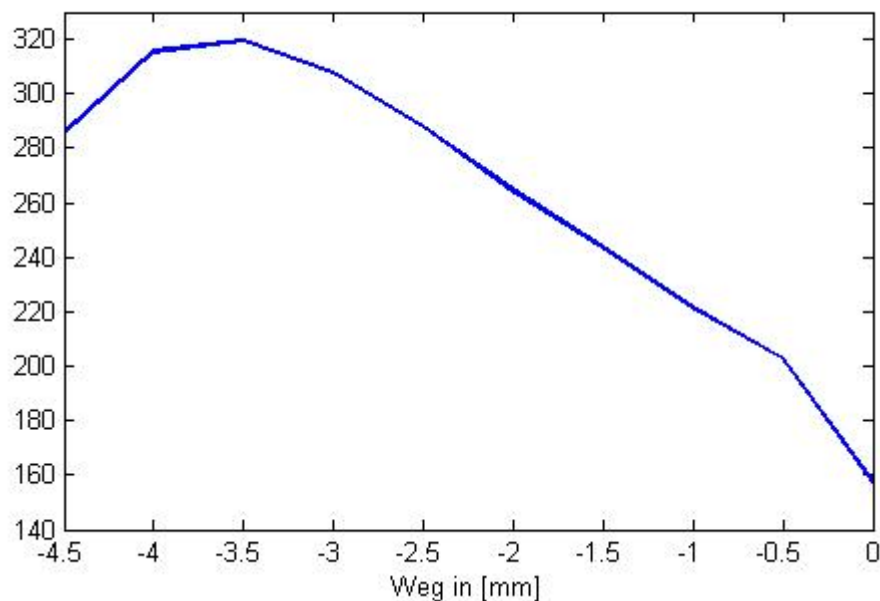
Wir haben mit dem Interferometer in Abständen von 0,5 mm gemessen, wofür das Interferometer eigentlich viel zu genau ist, denn normalerweise werden Interferometer für viel exaktere Messungen verwendet.

Für den einphasigen Lichtwellenleiter ergibt sich die folgende Messkurve:



**Abbildung 7: Messkurve des einphasigen Lichtwellenleiters**

Für den zweiphasigen Lichtwellenleiter ergibt sich die folgende Messkurve:



**Abbildung 8: Messkurve des zweiphasigen Lichtwellenleiters**

Der Lichtwellenleiter funktioniert über die Messung der Lichtintensität, diese nimmt indirekt proportional zum Quadrat der Entfernung ab. Bei der Kurve des einphasigen Lichtwellenleiters ist die Entfernung eindeutig der Lichtintensität zuzuordnen. Beim zweiphasigen Lichtwellenleiter gibt es zwei Bereiche, im ersten erfasst der Sensorleiter den Lichtkegel nur peripher. Ab dem Messpunkt bei -3.5mm wird der Lichtkegel richtig erfasst und es sind die Anfänge der indirekten Proportionalität zu erkennen, der erste Messwert scheint ein Ausreißer zu sein. In beiden einzelnen Bereichen ist die Entfernung anhand der Lichtintensität eindeutig zu bestimmen.

## 4 Literatur

- [01] Versuchsanleitung „S3-Wegsensoren“. URL: [http://www.uni-magdeburg.de/imos/mea\\_sen/welcome.html](http://www.uni-magdeburg.de/imos/mea_sen/welcome.html) (Stand: 09.04.09).
- [02] Ernst-Moritz-Arndt-Universität; Prof. U. Lübbert: „Messtechnik“ URL: <http://www2.physik.uni-greifswald.de/sensoren/scribt/luebbert/messt/messt.pdf> (Stand: 15.04.09).
- [03] Schrüfer, E.: Elektrische Meßtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen. Carl Hanser Verlag. München, Wien; 1990.
- [04] Untersweg, Wolfgang: Prüfstand zur Messung mechanischer Größen; Wegmessung. URL: [http://www.emt.tugraz.at/publications/diplomarbeiten/da\\_untersweg/2\\_2Wegmessung.html](http://www.emt.tugraz.at/publications/diplomarbeiten/da_untersweg/2_2Wegmessung.html) (Stand: 15.04.09).