



# TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur Mess- und Sensortechnik

Praktikum Sensor- und Sensorsignalauswertung

Versuch IND – Induktive Wegmessung

Versuchsdatum: 14.11.2018

Abgabedatum: 28.11.2018

Praktikumsgruppe: BET2

Namen der Studenten: Florian Zylla, Christian Behl

Betreuer:

# 4. Vorbereitungsfragen

## Induktive Sensoren

### 4. Vorbereitungsaufgaben

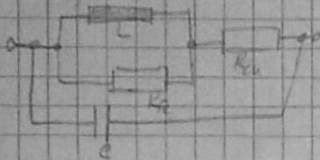
1. VT: - in fast jeder Umgebung nutzbar (staubig, feucht)  
 - kein mechanischer Verschleiß  
 - kaum oberflächenabhängig  
 - Erkennung nicht farbunabhängig

NT: - nur metallische Objekte werden erfasst  
 - Beeinträchtigung durch starke elektromagn. Felder

kap.: - erkennt auch Nichtmetalle sowie Flüssigkeiten und Feststoffe  
 - kürzere Erfassungreichweite

2. - Fließbänder, Werkzeugmaschinen, Sortieren von Teilen  
 - Fahrzeugtechnik → Messen von Abständen, Toleranzen, Schwingungen...

3.



$R_{FE}$  ... Eisenverluste (Wirbelströme)  
 $R_{Cu}$  ... Kupferverluste (Drabt, Wärme)  
 $C$  ... kapazitive Eigs bei hohen Frequ.  
 (kleiner Abstand zw. Windungen)

4. Wechselspannung an Primärspule führt zu Wechselspannungen unterschiedlicher Größe in Sekundärspulen  
 Sekundärspannungen heben sich bei Mittelstellung des Kerns auf  
 → Besagung verursacht Differenzspannung

VI: hohe Auflösung der zu messenden Weges, hochgenaue Nullpunkt-Reproduzierbarkeit

5. Annäherung durch ~~non~~lineare DGLs (Tangente, Sekante)

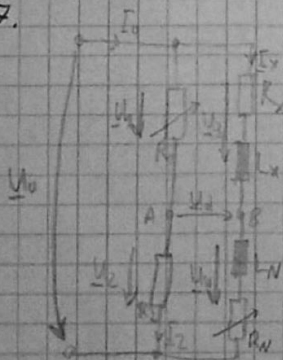
6. Ausschlag: - Aufnahme kleiner Widerstandsänderungen durch Wheatstone  
 → Messwert wird durch Ausschlag auf einer Skala bestimmt

Kompensation: - Einstellen von Gleichgewichten

→ ~~ganzzahlige~~ Größe wird so eingestellt, dass Differenz mit zu messender Größe Null wird

Wann Nullpunkt erreicht und bei Messwert?

7.



$$U_d = U_0 \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{j\omega L_1 + R_4}{R_3 + j\omega L_2 + j\omega L_3 + R_4} \right)$$

oder  $U_d = U_2 - U_4$

Wann  $R_1 = R_2$  und  $R_3 = R_4$ ?

8. NT: - neben Nutzsignal weitere Anteile im Bereich doppelter Trägerfrequenz  
→ Tiefpassfilter erforderlich

VT: - statt Sinusignal kann rechteckförmiges Signal verwendet werden

J. Gleichrichter: Multiplikation von Trägerignal und modulierendem Signal wird möglich  
durch Multiplizieren einer Halbwelle +1 oder -1

Tiefpassfilter: trennt das niederfrequente Messsignal ab  
→ Gleichspannung wird erzeugt (kann weiter verarbeitet werden)

10.  $f_{\text{Träger}} > 2 \cdot f_{\text{Mess}}$

11. abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige  
Variablen erklären → lineares Modell

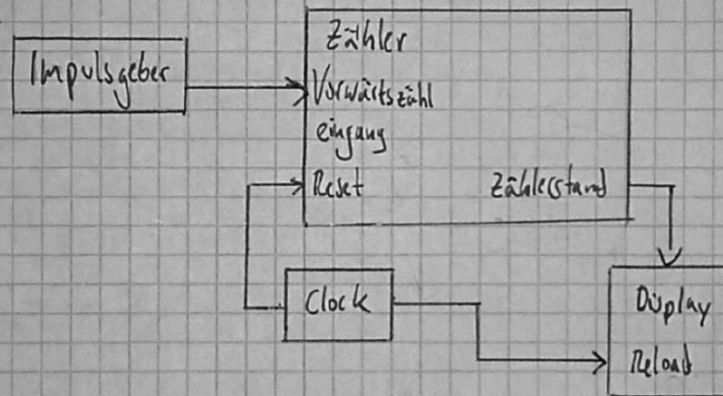
$y = a + bx$  bestmögliche Gerade durch Messpunkte wird  
gesucht

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

12. Das Kabel kann kleine Abweichungen bei den Verlusten aufweisen.

13.



## 6. Versuchsdurchführung

### 6.1 LVDT-Messtaster (Sensor 1 und 2)

#### 6.1.1 LVDT-Sensor mit Messbereich $\pm 1$ mm (Sensor 2)

Entfernung in mm	Spannung in V	Spannung nach linearer Regression in V	Abweichung lineare Regression von Messwert in V	Relative Abweichung lineare Regression von Messwert
-1,2	2,6	2,6388	0,0388	0,0194
-1,1	3	2,9755	0,0245	0,0122
-1	3,3	3,3123	0,0123	0,0062
-0,9	3,6	3,6491	0,0491	0,0245
-0,8	4	3,9858	0,0142	0,0071
-0,7	4,3	4,3226	0,0226	0,0113
-0,6	4,7	4,6594	0,0406	0,0203
-0,5	5	4,9962	0,0038	0,0019
-0,4	5,3	5,3329	0,0329	0,0165
-0,3	5,7	5,6697	0,0303	0,0152
-0,2	6	6,0065	0,0065	0,0032
-0,1	6,4	6,3432	0,0568	0,0284
0	6,7	6,6800	0,0200	0,0100
0,1	7	7,0168	0,0168	0,0084
0,2	7,4	7,3535	0,0465	0,0232
0,3	7,7	7,6903	0,0097	0,0048
0,4	8	8,0271	0,0271	0,0135
0,5	8,4	8,3639	0,0362	0,0181
0,6	8,7	8,7006	0,0006	0,0003
0,7	9	9,0374	0,0374	0,0187
0,8	9,4	9,3742	0,0258	0,0129
0,9	9,7	9,7109	0,0109	0,0055
1	10	10,0477	0,0477	0,0238
1,1	10,4	10,3845	0,0155	0,0078
1,2	10,7	10,7212	0,0212	0,0106

Tabelle 1: Messwerte zur Kennlinienaufnahme zu Sensor 2; Regressionsgerade  $y = 0,3677x + 6,68$

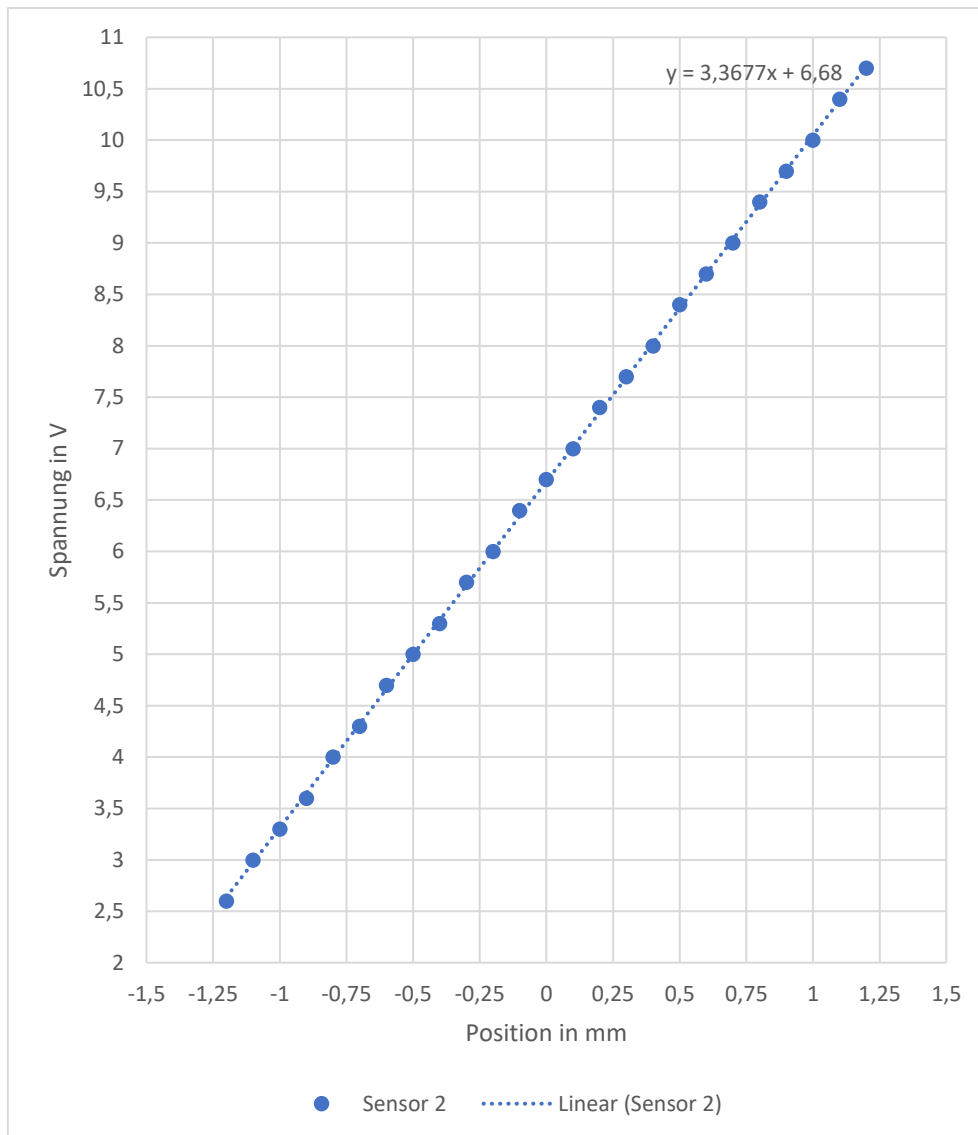


Diagramm 1: Kennlinie des Sensor 2 mit Regressionsgerade  $y = 0,3677x + 6,68$

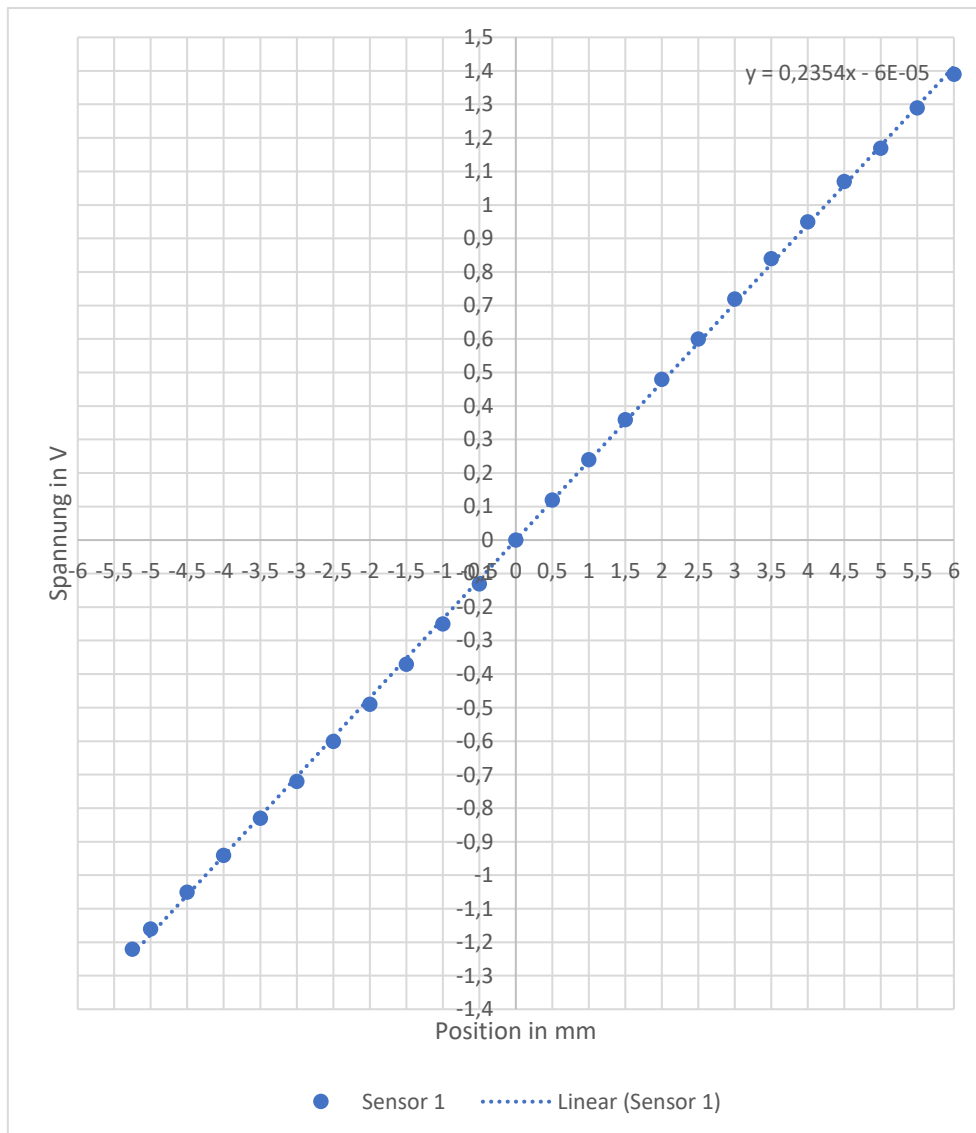
Es ergibt sich die Regressionsgerade  $y = 0,3677x + 6,68$ . Die größte Abweichung von 0,0568 mm bzw. 2,84% ergibt sich bei -0,1 mm. Über den gesamten Bereich ist die Kennlinie des Sensors linear und zeigt Abweichungen von weniger als 3 %.

## 6.1.2 LVDT-Sensor mit Messbereich $\pm 5$ mm (Sensor 1)

Entfernung in mm	Spannung in V	Spannung nach linearer Regression in V	Abweichung lineare Regression von Messwert in V	Relative Abweichung lineare Regression von Messwert
-5,25	-1,22	-1,236	0,0159	0,00159
-5	-1,16	-1,177	0,0171	0,00171
-4,5	-1,05	-1,059	0,0094	0,00094
-4	-0,94	-0,942	0,0017	0,00017
-3,5	-0,83	-0,824	0,0060	0,00060
-3	-0,72	-0,706	0,0137	0,00137
-2,5	-0,6	-0,589	0,0114	0,00114
-2	-0,49	-0,471	0,0191	0,00191
-1,5	-0,37	-0,353	0,0168	0,00168
-1	-0,25	-0,235	0,0145	0,00145
-0,5	-0,13	-0,118	0,0122	0,00122
0	0	0,000	0,0001	0,00001
0,5	0,12	0,118	0,0024	0,00024
1	0,24	0,235	0,0047	0,00047
1,5	0,36	0,353	0,0070	0,00070
2	0,48	0,471	0,0093	0,00093
2,5	0,6	0,588	0,0116	0,00116
3	0,72	0,706	0,0139	0,00139
3,5	0,84	0,824	0,0162	0,00162
4	0,95	0,942	0,0085	0,00085
4,5	1,07	1,059	0,0108	0,00108
5	1,17	1,177	0,0069	0,00069
5,5	1,29	1,295	0,0046	0,00046
6	1,39	1,412	0,0223	0,00223

Tabelle 2: Messwerte zur Kennlinienaufnahme zu Sensor 2; Regressionsgerade  $y = 0,2354x - 6E-05$

Messwertaufnahme nur bis -5,25mm möglich, da dort der Nullpunkt der Mikromettermessschraube liegt. 0 Volt haben sich bei 5,25 mm ergeben.



*Diagramm 2: Kennlinie des Sensor 1 mit Regressionsgerade  $y = 0,2354x - 6E-05$*

Es ergibt sich die Regressionsgerade  $y = 0,2354x - 6E-05$ . Die größte Abweichung von 0,0223 mm bzw. 0,223 % ergibt sich bei 6 mm am Ende des Sensormessbereichs. Über den gesamten Bereich ist die Kennlinie des Sensors linear und zeigt Abweichungen von weniger als 0,25 %.

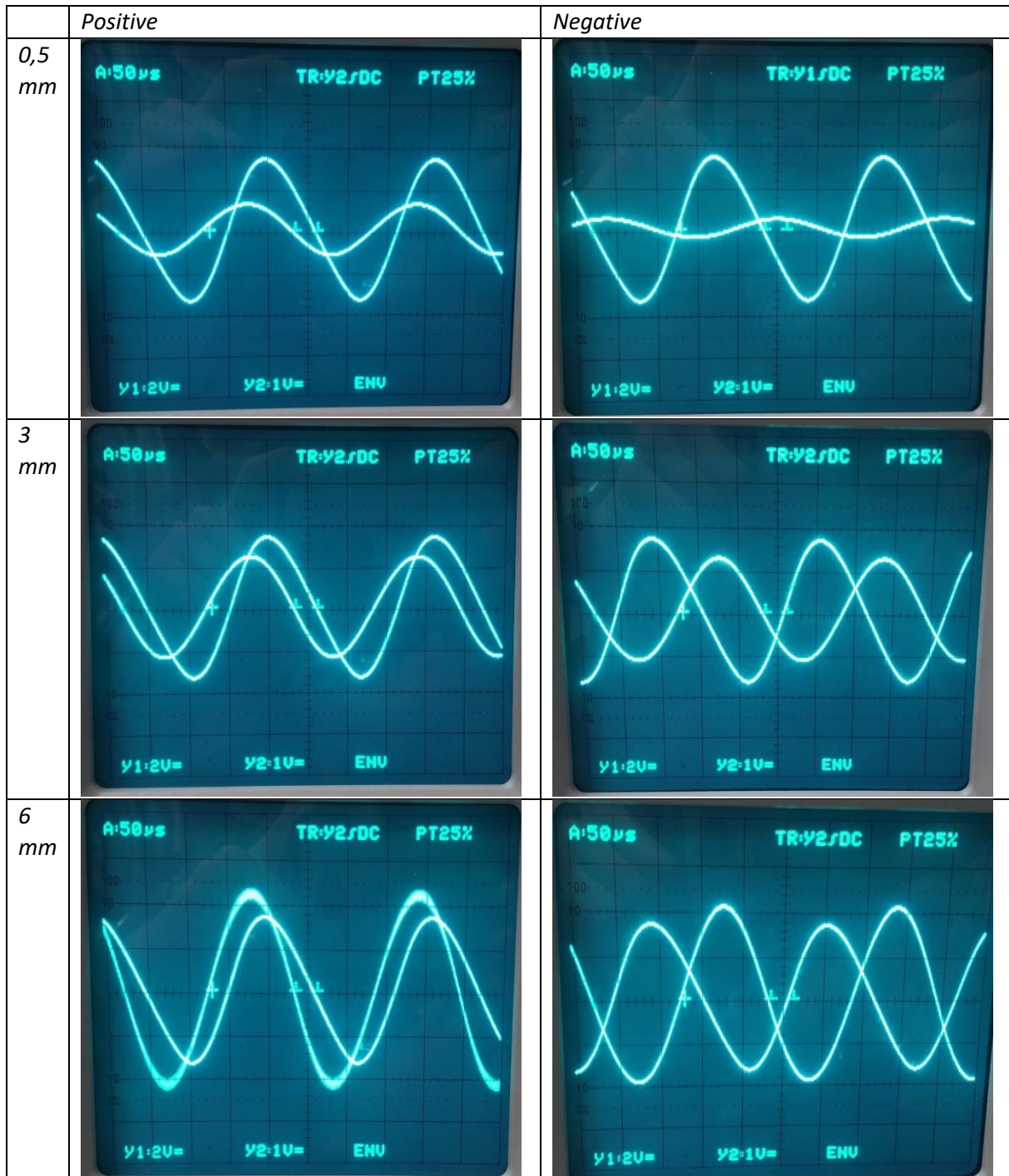


Abbildung 1: Signalverläufe der Trägerfrequenzschaltung an den Positionen,  $\pm 0,5$  mm,  $\pm 3$  mm,  $\pm 6$  mm ( $-5,25$  mm)

Die Amplitude und Frequenz des Oszillators sind bei allen Entfernungen gleich groß. Die Frequenz des Wechselspannungsverstärkers entspricht der des Oszillators. Die Amplitude ist abhängig von der Entfernung zum Nullpunkt. Mit steigender Entfernung nimmt die

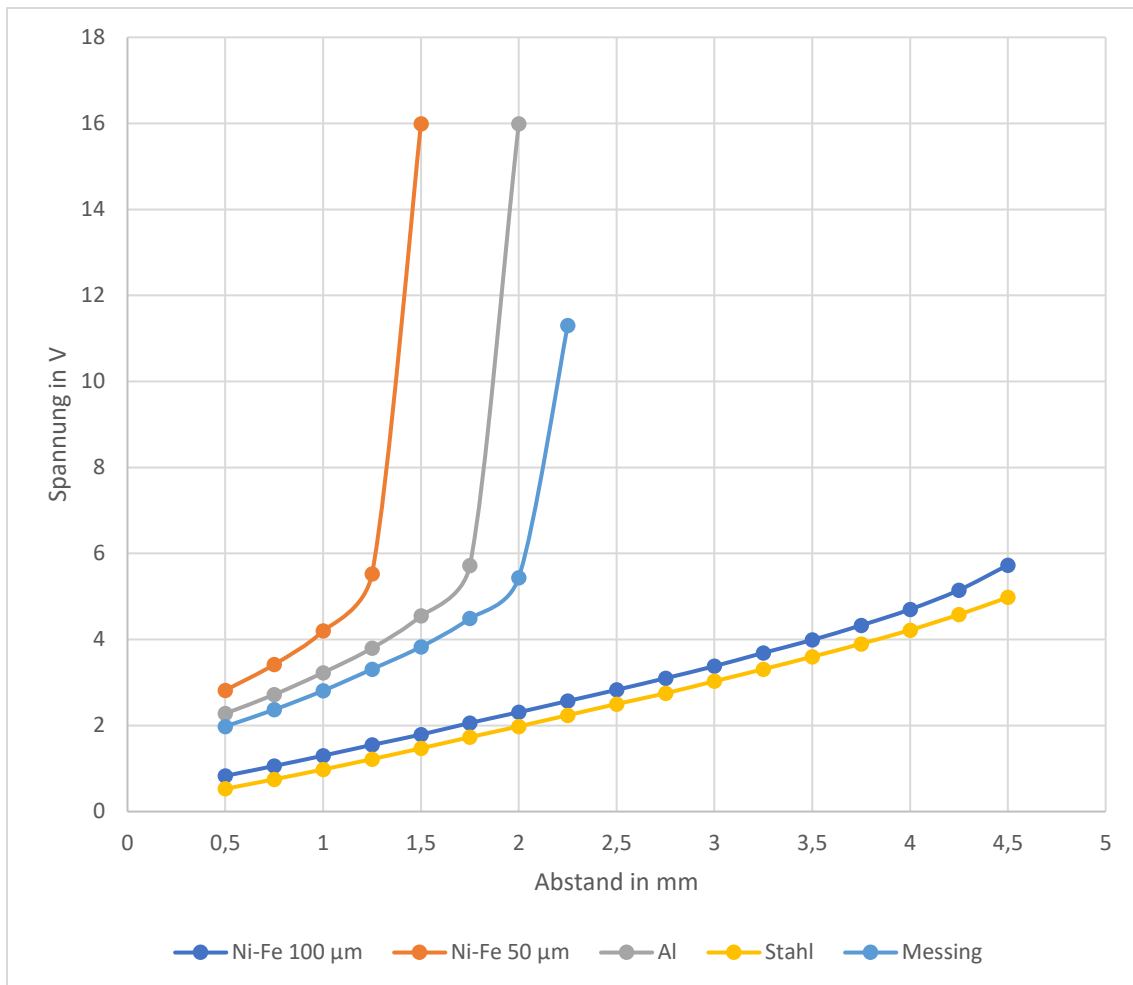
Amplitude zu. Dabei ist die Amplitude bei betragsmäßig gleichen Entfernungen vom Nullpunkt ca. gleich groß. Jedoch ist die Schwingung um 180° phasenverschoben zu der bei negativer bzw. positiver Verschiebung.

Da der Nullpunkt bei 5,25 mm lag, war die Verschiebung nach rechts nicht vollständig realisierbar (Ende der Mikrometerschraube).

## 6.2 ind. Wirbelstromsensor mit Messbereich 4 mm (Sensor 3)

Abstand in mm	U in V Ni-Fe 100	U in V Ni-Fe 50	U in V Al	U in V Stahl	U in V Messing
0,50	0,83	2,82	2,28	0,53	1,98
0,75	1,06	3,42	2,72	0,75	2,37
1,00	1,30	4,20	3,23	0,98	2,81
1,25	1,55	5,53	3,80	1,22	3,31
1,50	1,79	15,99	4,55	1,47	3,83
1,75	2,06		5,72	1,73	4,49
2,00	2,31		15,99	1,98	5,44
2,25	2,57			2,24	11,30
2,50	2,83			2,50	
2,75	3,10			2,75	
3,00	3,38			3,03	
3,25	3,69			3,31	
3,50	3,99			3,60	
3,75	4,33			3,90	
4,00	4,70			4,22	
4,25	5,15			4,58	
4,50	5,73			4,98	

Tabelle 3: Messwerte zur Kennlinienaufnahme zu Sensor 3



*Diagramm 3: Kennlinie des Sensor 3 für verschiedene Materialien*

Der Kupfer-Probenkörper war nicht vorhanden für den Versuch.

Aluminium und Messing verlaufen nur einen kurzen Bereich linear, dann steigen deren Spannungen stark bis um Grenzwert an. Die beiden Stoffe haben eine relativ hohe Leitfähigkeit, was das Ausbilden großer Wirbelströme begünstigt. Zeitgleich liegen aber mit den Materialien, keine ferromagnetischen Materialien vor, sodass keine magnetischen Verluste entstehen. Die anderen Materialien Stahl und Ni-Fe besitzen nur eine relativ geringe Leitfähigkeit, sodass sich nur weniger starke Wirbelströme ausbilden können. Als Folge davon verlaufen sie im gesamten Messbereich beinahe linear. Da Stahl und Ni-Fe auch ferromagnetische Eigenschaften haben, kommt es zu Magnetisierungsverlusten.

Die zwei unterschiedlich dicken Ni-Fe-Folien zeigen die Abhängigkeit von der Eindringtiefe. Die 100 µm dicke Folie ist dicker als die maximale Eindringtiefe und die 50 µm Folie ist dünner als die maximale Eindringtiefe. Da das Magnetfeld wesentlich weniger tief eindringen kann, ergeben sich größere Spannungswerte.

### 6.3 Vergleich von kap. Sensor (Sensor 4) und ind. berührungsloser Wirbelstromsensor (Sensor 5) mit Messbereich 1 mm

Entfernung in mm	Anzeige Messgerät
0	0,505
0,1	0,5953
0,2	0,6904
0,3	0,7824
0,4	0,8759
0,5	0,9714
0,6	1,0652
0,7	1,125
0,8	1,125
0,9	1,125
1	1,125

Tabelle 4: Messwerte zur Kennlinienaufnahme zu Sensor 5

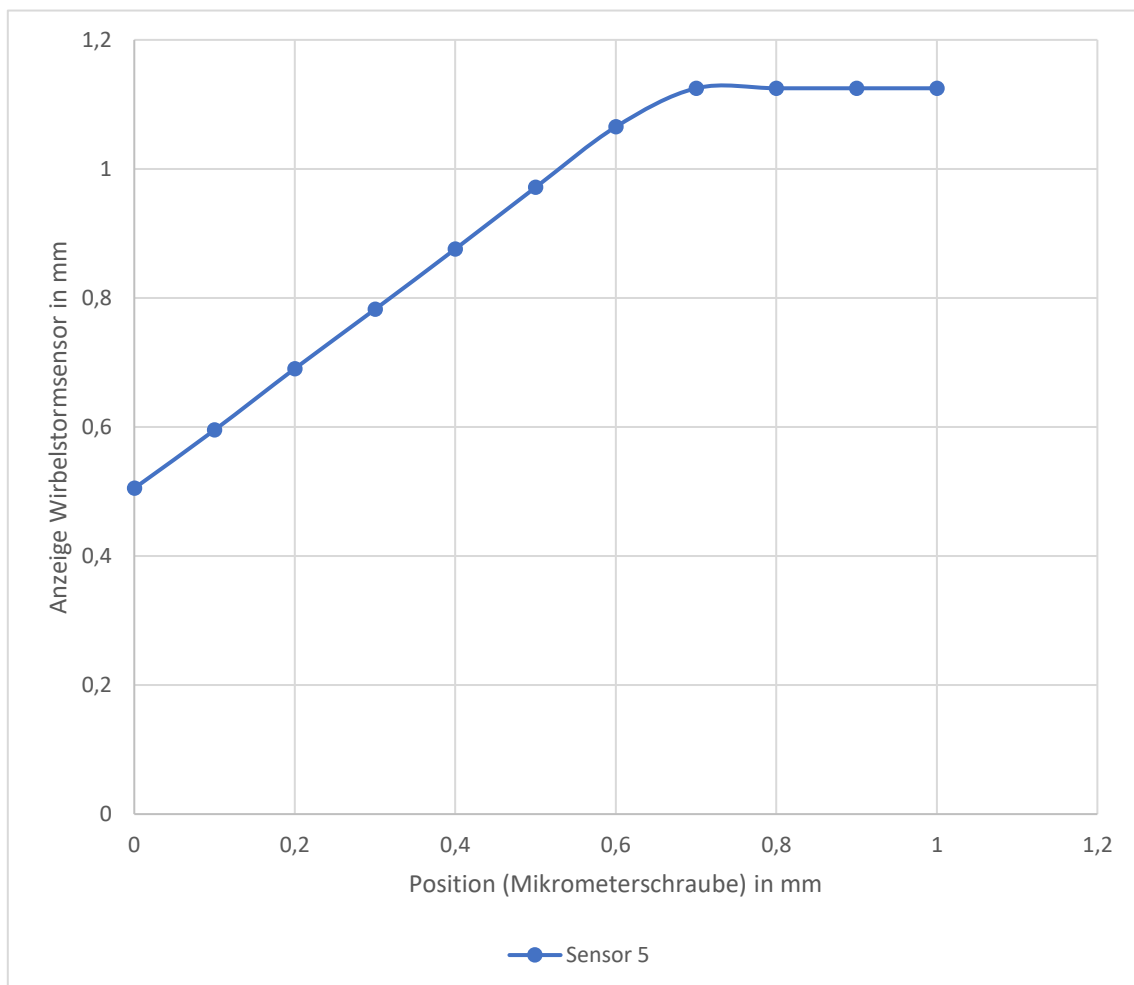


Diagramm 4: Kennlinie des Sensor 5

Der kapazitive Sensor lag für den Versuch nicht vor.

Als Kennlinie erwartet man  $y=x$ , jedoch ist deutlich zu erkennen, dass es bereits im linearen Bereich einen Offset (ca. 0,5 mm) gibt.

Kurz vor der Messposition 0,7 mm wird der Maximalwert bzw. das Ende des Sensormessbereiches erreicht. Somit ist die Kurve ab 0,7 mm bis 1 mm abgesättigt. Da bei 0,6 mm die letzte Messung aufgenommen wurde, die nicht dem Maximalwert entspricht zeigt sich, dass als Addition aus Offset und letzte Messung, der Messbereich des Sensors bei ca. 1,1 mm liegt.

Das Einführen der Materialien (Metallfolie, Papier, Plastik) bei Position 0,2 mm führte zu keiner Änderung des angezeigten Wertes bzw. verhielt sich dieser nicht statisch.

## 6.4 Anwendungsbsp. rotierendes Rad mit ind. berührungsl. Wirbelstromsensor (Sensor 5)



Abbildung 2: Oberflächenprofil auf Stufe 1

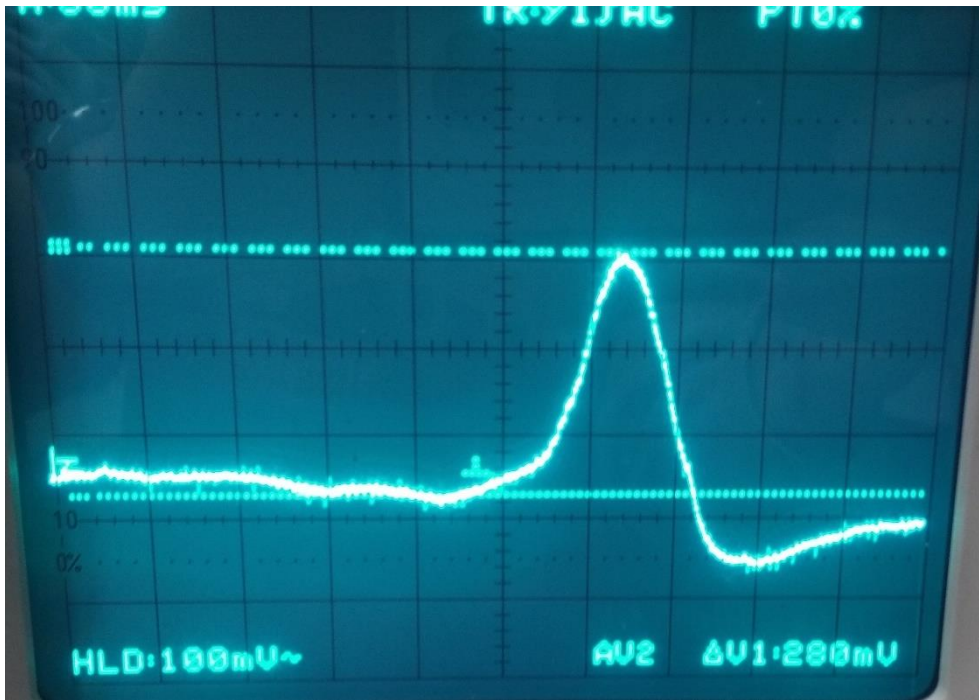


Abbildung 3: Profil der Kerbe bei höherer Zeitauflösung (Amplitude)

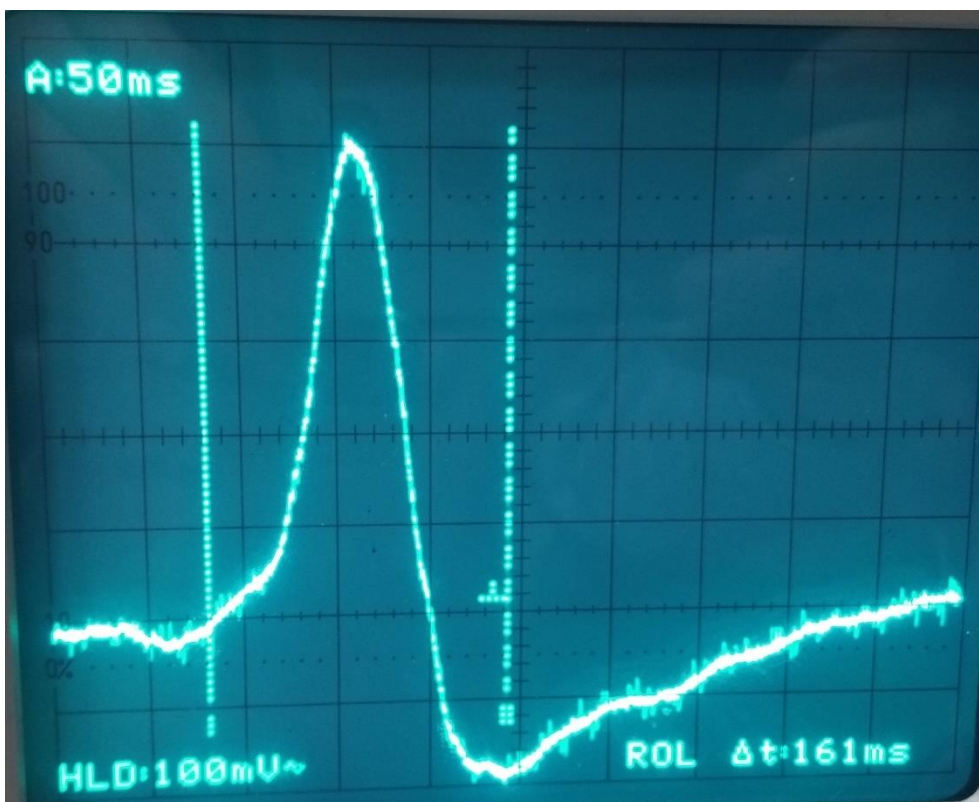


Abbildung 4: Profil der Kerbe bei höherer Zeitauflösung (Zeitspanne)

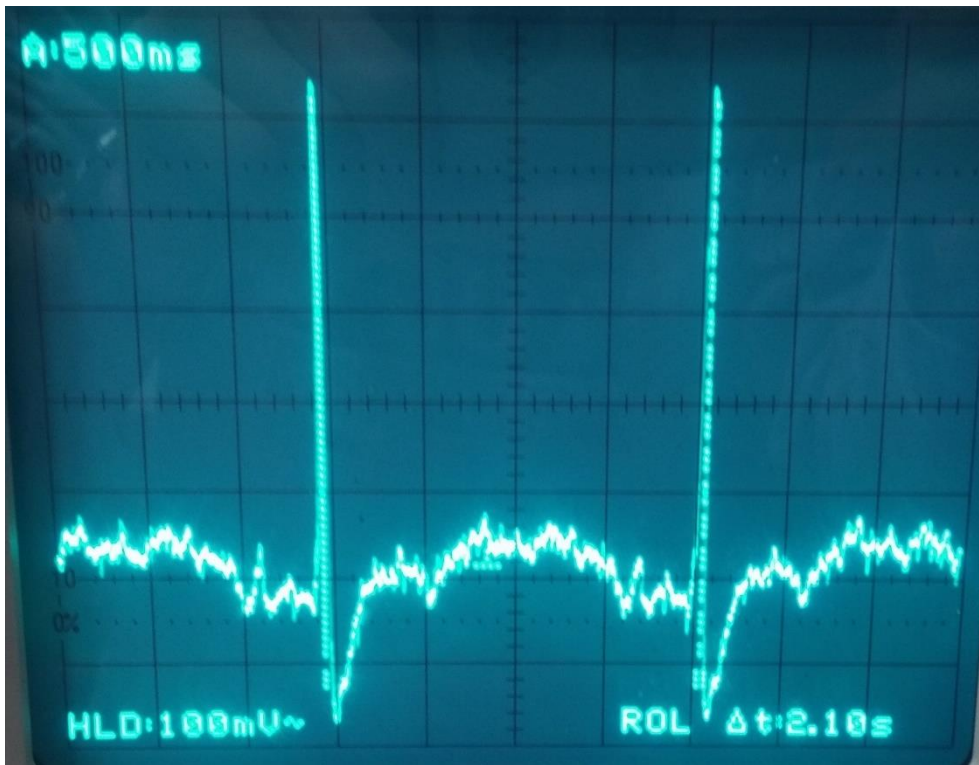


Abbildung 5: Oberflächenprofil auf Stufe 2



Abbildung 6: Oberflächenprofil auf Stufe 3

Durch die gemessenen Periodendauern für die einzelnen Stufen lässt sich Drehzahl bestimmen. Die Spannungsschwankungen des analogen Ausgangs lassen einen Rückschluss auf das Profil zu.

Stufe	Periodendauer T in s	Drehzahl in rpm	Profilschwankung in mV	Profilschwankung in µm
1	3,25	18,46	120	12,0
2	2,1	28,57	130	13,0
3	1,63	36,80	140	14,0

*Tabelle 5: Messwerte und berechnete Werte zu Drehzahl und Profilschwankung*

Die Profilschwankung wurde aus den Übersichtsbildern ermittelt, da im Praktikumsversuch zuvor fälschlicherweise Peak-to-Peak-Werte mit der Kerbe als Obergrenze bestimmt wurden, dementsprechend ist das Ergebnis sehr ungenau.

Die Kerbe erzeugt eine Profilschwankung von 280 mV dementsprechend ist die Kerbe ca. 28 µm tief. Im Gegensatz dazu wurden bei niedrigerer Zeitauflösung zur Bestimmung der Profilschwankung immer ein Wert von ca. 700 mV also 70 µm bestimmt.

Aus dem Radius des Rades von 35 mm lässt sich dessen Umfang mit ca. 220 mm bestimmen. Die Profilschwankung durch die Kerbe erfolgt innerhalb von 161 ms (0,161 s). Das Rad dreht sich dabei auf Stufe 1 mit ca. 18,46 rpm, was ca. 0,307 rps entspricht. Es ergibt sich also:

$$\text{Breite der Kerbe} = \text{Zeitdauer Kerbe} * \text{Rotationsgeschwindigkeit} * \text{Umfang}$$

Es ergibt sich eine Breite von 10,89 mm also ca. 1,1 cm. Mit dem Lineal wurde eine Breite von 1,45 cm gemessen. Die Abweichung lässt sich durch Ablese Fehler bei der Messung mit dem Lineal und der gleichzeitigen Biegung des Rades erklären. Viel wichtiger ist jedoch das Ablesen aus dem Oszibild, dort ist es schwer möglich exakt zu definieren wo die Kerbe beginnt und wo sie endet.