

Messtechnik
Praktikumsversuch S3
Wegsensoren

Martin Behrendt, Tobias Heidig, Ulf Schaper

13.04.2006

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitung: Analoge Längenmessung	2
1.1	Mechanische Verfahren	2
1.2	Elektrische Verfahren	2
1.2.1	Widerstandsmessung, Ohmsche Verfahren	2
1.2.2	Induktive Verfahren	2
1.2.3	Kapazitive Verfahren	3
1.3	Ultraschallverfahren (Zeitmessung)	3
2	Vorbereitung: Digitale Längenmessung	3
2.1	Absolute Längenmessung über Codelineale	3
2.2	Inkrementelle Längenmessung am Raster	4
2.3	Interferenzielle Verfahren	5
3	Das Abbe'sche Komparatorprinzip	5
4	Richtungserkennung bei inkr. Abtastung	6
5	Aufgaben	7
5.1	Funktionsweise der digitalen, absoluten Längenmessung	7
5.2	Skalierung der Ausgangssignale	9
5.2.1	Potentiometerkennlinie	9
5.2.2	Seilzugsensorkennlinie	10
5.2.3	Wirbelstromsensorkennlinie	11
5.2.4	Induktionssensorkennlinie	11
5.3	Auswirkungen des Abbeschen Komparatorprinzips	12
5.4	Kennlinien der Fasersensoren	13
6	Messdaten	14
6.1	Potentiometer	14
6.2	Seilzugsensor	15
6.3	Induktionssensor	17
6.4	Wirbelstromsensor	18
6.5	Fasersensoren	19
6.6	Komparatorprinzip	19
6.7	Vergleichsprogramm Bitfehler beim Dualcode / Graycode	19
7	Quellenverzeichnis	21

1 Vorbereitung: Analoge Längenmessung

1.1 Mechanische Verfahren

Das verbreitetste Präzisionslängenmessgerät ist der Messschieber. Er funktioniert wie ein Zollstock, es handelt sich also über einen direkten Messwandler, der die zu messende Länge wiederum auf einer Längenskala darstellt. Ein Nonius erleichtert dabei das Ablesen im Feinbereich.

1.2 Elektrische Verfahren

Der Vorteil elektrischer Verfahren liegt darin, dass die Messgröße als elektrisches Signal vorliegt, das gleich elektronisch weiterverarbeitet werden kann.

1.2.1 Widerstandsmessung, Ohmsche Verfahren

Homogene elektrische Widerstände können nach folgender Formel bestimmt werden

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot A} \quad (1)$$

Wird der Abgriff an einem Widerstand verschoben, d.h. in der Formel das l variiert, dann ist der Spannungsabfall über dem stromdurchflossenen Widerstandsteil ein Maß für den Weg.

1.2.2 Induktive Verfahren

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, das Magnetfeld einer Spule zu verändern, und ebenso viele Möglichkeiten, diese Änderung zu messen. Als Eingriffsmöglichkeiten bieten sich an:

1. Überlagerung mit einem fremden Magnet- oder Wirbelfeld
2. Veränderung Permeabilitätszahl μ durch Einbringen eines ferromagnetischen Stoffes.
3. Veränderung der Geometrie der Spule (Querschnitt A , Feldlinienlänge s)

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{s} \quad (2)$$

Auch für die Messung gibt es verschiedene Ansätze:

1. Die Verstimmung eines Schwingkreises führt zu einer Amplituden- und Phasenänderung.
2. Man kann die Induktivität aber auch direkt mit einer Wechselspannung beaufschlagen, und die Stromstärke (die dann von der Impedanz abhängt) beobachten.
3. Das Magnetfeld kann über eine Hallsonde direkt als Spannungswert vermessen werden.

1.2.3 Kapazitive Verfahren

Ähnlich der Permeabilität ε bei einer Spule eignet sich die Permittivität beim Kondensator als Eingriffsmöglichkeit, ebenso kann man die Geometrie (z.B. den Plattenabstand l) verändern. Für einen idealen Plattenkondensator gilt hierbei:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{l} \quad (3)$$

Kapazitive Sensoren haben gegenüber induktiven den Nachteil, dass Sie leistungsschwächere Signale abgeben. Sie reagieren jedoch dafür auch auf nichtleitende Materialien.

1.3 Ultraschallverfahren (Zeitmessung)

Schallwellen werden sehr gut reflektiert, daher eignen sie sich für Entfernungsmessungen an Gegenständen, die dafür nicht verändert werden können, z.B. wenn man den Erdboden geometrisch erfassen will. Das vom Echolot bekannte Verfahren beruht auf der Laufzeitmessung des Signals.

2 Vorbereitung: Digitale Längenmessung

Heutige Auswertungsgeräte setzen meist nicht nur ein elektrisches Signal voraus, sondern sogar ein digitales. Neben der Möglichkeit, ein analoges Signal zu digitalisieren, können wir auch direkt die Länge als digitale Größe erfassen:

2.1 Absolute Längenmessung über Codelineale

Im Computer werden Zahlen binärcodiert gespeichert. Dies ist für die Messung sehr praktisch, weil die Messapparatur nur zwischen zwei Zuständen unterscheiden muss, also sehr kontrastreich arbeiten kann. Dabei spielt es nur eine untergeordnete Rolle, ob das Signal gleich elektrisch gewonnen wird (z.B. Kohlebürsten), optisch (Lichtschranke) oder magnetisch.

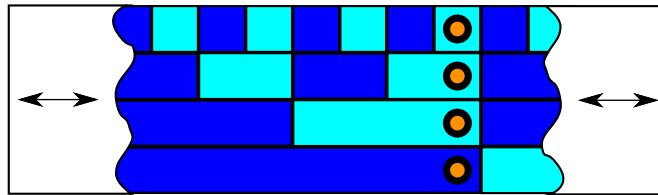


Abbildung 1: Dualcodiertes Codelineal mit fehleranfälliger Einfachabtastung

Man könnte theoretisch ein Codelineal durch eine Messapparatur fahren, das direkt eine rechnerkonforme Codierung mitbringt. Bei jedem zweiten Messschritt liegt jedoch kurzfristig ein ungültiges Signal vor, da sich ansonsten mehrere Bits auf einmal ändern müssten. Über Gültigkeitsbits und Checksummen kann man solche Fehler erkennen. Tatsächlich verhindern kann man solche Fehler, indem man jeden Streifen mit zwei versetzten Abtastern besetzt, von denen nur einer ausgelesen wird. Mit welchem Sensor ein Streifen erfasst wird hängt

von dem Wert des nächst niederwertigeren Streifens ab: Bei einer Codierung wie in Abbildung 2 würde man den rechten Sensor abfragen, wenn der nächst niederwertige auf „dunkelblau“ steht und den linken, wenn der niederwertige Sensor „hellblau“ misst.

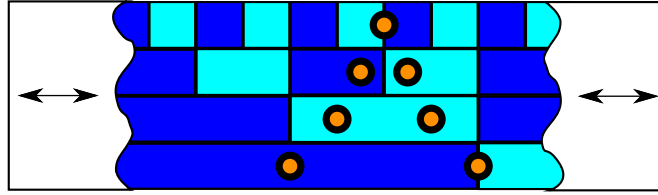


Abbildung 2: Dualcodiertes Codelineal mit V-Abtastung

Eine Alternative zu der Rechnerkodierung bildet der Gray-Code. Hierbei wird bei jedem Schritt nur ein einziges Bit verändert, wodurch das Problem von Fehlmessungen aufgrund eines „unpassenden Messzeitpunktes“ auch umgangen ist.

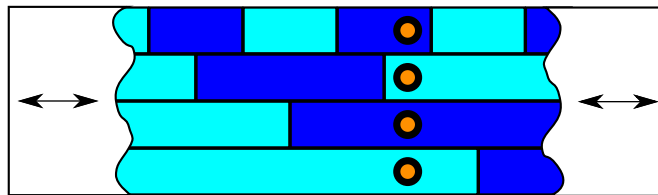


Abbildung 3: Graycodiertes Codelineal

Sowohl die Verwendung des Graycodes als auch eine V-Abtastung verlangen eine Konvertierungselektronik, die zwischen Messgerät und Rechner geschaltet wird. In beiden Fällen reichen jedoch kombinatorische Schaltungen aus.

2.2 Inkrementelle Längenmessung am Raster

Bei der inkrementellen Längenmessung ist die gesamte Messdistanz in äquidistante Intervalle unterteilt. Die Intervallbreite d bestimmt das Auflösungsvermögen. Das Raster verschiebt sich während der Messung zwischen Lichtquelle und Empfänger und verursacht in diesem ein zeitvariantes Signal. Durch Auszählen der Nulldurchgänge n bzw. Maxima kann die Wegstrecke nach

$$l = n \cdot d \quad (4)$$

berechnet werden.

Während des Versuches mussten wir erkennen, dass diese Methode prinzipiell die Bewegungsgeschwindigkeit des Messobjektes begrenzt: Fährt der Messwagen zu schnell, so „übersieht“ die Auswertelektronik einige Intervalle und misst daher falsch.

2.3 Interferenzielle Verfahren

Das Grundprinzip des Michelson-Interferometers besteht darin, zwei kohärente Lichtstrahlen zur Überlagerung zu bringen. Die beiden Lichtstrahlen werden normalerweise über einen Strahlteiler aus einem Laserstrahl gewonnen. Einer der beiden Lichtstrahlen dient als Referenzstrahl, der andere zur Erfassung der Messgröße (Weg- bzw. Laufzeitunterschied beim Michelson-Interferometer, Dopplerverschiebung bei der Laser-Doppler-Velocimetrie). Zur Wegmessung wird die Länge des Messstrahls gegenüber dem Referenzstrahl um die zu messende Strecke (oder ein Vielfaches davon) vergrößert. Die während der Verschiebung im Interferenzbild auftretenden Helligkeitsänderungen (Übergänge zwischen Minima und Maxima) werden detektiert, und die Anzahl der Nulldurchgänge m ausgezählt. Mit Formel 5 lässt sich daraus der gemessene Weg rechnerisch bestimmen.

$$l = \frac{m \cdot \lambda}{2} = \frac{m \cdot c_0}{2 \cdot n \cdot f} \quad (5)$$

Es gibt verschiedene Ansätze, um die Genauigkeit weiter zu erhöhen. Einerseits kann man die Helligkeitsverteilung quantitativ erfassen und markante Punkte vergleichen (z.B. neben dem Hochpunkt auch den Tiefpunkt zählen usw.). Andererseits kann man den Lichtstrahl die Messstrecke mehrfach durchlaufen lassen, um die Auflösung zu erhöhen. Die Versuchsanordnung verdoppelt die Auflösung mit einem einfachen Spiegel (in Formel 5 müsste daher anstelle der 2 eine 4 im Nenner stehen).

3 Das Abbe'sche Komparatorprinzip

Liegen bei der Messung die zu messende Strecke und der Maßstab nicht auf einer Geraden, so treten bei schlechter Führung (Fertigungstoleranzen) im Messgerät Kippfehler 1. Ordnung auf:

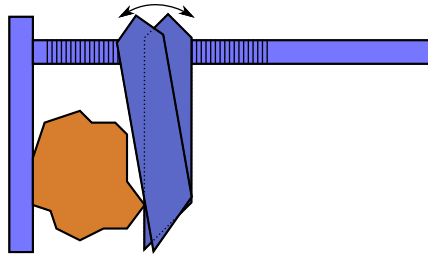


Abbildung 4: Missachtung des Abbe'schen Komparatorprinzips

Dieser Messfehler ist proportional zum Abstand a von Messstrecke zu Maßstab sowie dem Kippwinkel φ :

$$\Delta x_1 = a \cdot \sin \varphi \approx a \cdot \varphi \quad (6)$$

Werden Maßstab und Messstrecke des Messgerätes in einer Flucht angeordnet (siehe Bügelmessschraube im Vergleich zum Messschieber), dann ist $a = 0$,

folglich ist dieser Messfehler eliminiert. Es treten jedoch weiterhin Kippfehler auf. Man kann dies in Abbildung 5 erahnen, und zwar vergrößert sich die „mit-gemessene“ Breite b der Schieblehre:

$$\Delta x_2 = \frac{b}{\cos\varphi} \quad (7)$$

Hierbei handelt es sich um Messfehler 2. Ordnung, denn $\left| \frac{d\Delta x_2}{d\varphi} \right|_{\varphi=0} = 0$ und erst $\left| \frac{d^2\Delta x_2}{d\varphi^2} \right|_{\varphi=0} \neq 0$. Sie können jedoch meist unberücksichtigt bleiben da sie sich kaum auf das Messresultat auswirken.

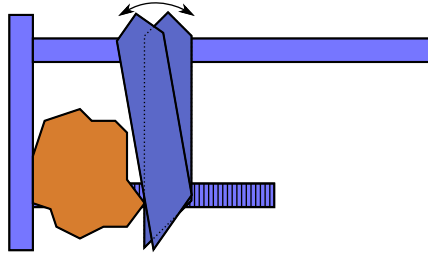


Abbildung 5: Bessere Messung, da Messstrecke und Maßstab in einer Flucht liegen.

Das Prinzip, Maßstab und Messobjekt auf einer Geraden anzuordnen um so zumindest den Messfehler 1. Ordnung zu verhindern, nennt man nach Ernst Abbe das „Abbe’sche Komparatorprinzip“. Es ist ein grundlegendes Prinzip, nach dem Längenmessgeräte aufgebaut sein sollten, um eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen.

4 Richtungserkennung bei ink. Abtastung

Die Impulsfolge selbst, die einem Sensor bei inkrementeller Abtastung zugeführt wird, enthält keine Information über die Bewegungsrichtung. Erst der Vergleich verschiedener Sensorwerte ermöglicht den Rückschluss auf die Richtung.

Der einfachste Fall ist ein Hilfssensor, welcher leicht gegenüber dem Hauptsensor verschoben ist. Angenommen, man will wissen, ob ein Balken, der vor einen Sensor gefahren wird, von rechts oder von links kommt: Dann schaut man ganz schnell nach, ob links neben dem Hauptsensor auch Balken ist. Ist dies der Fall, dann kommt der Balken von links, ansonsten von rechts.

Eine geschicktere Elektronik unterscheidet nicht zwischen Hauptsensor und Hilfssensor und erhöht so das Auflösungsvermögen. Eine Auswertungslogik findet sich z.B. in [3], siehe Abbildung 6.

Weitergehende Verfahren nutzen vier Sensoren, die jeweils um eine Viertelperiode versetzt sind. Von den jeweils benachbarten Sensoren werden die Helligkeitswertdifferenzen betrachtet, wodurch Streulichteinflüsse gemindert werden können. Weiterhin können diese verbesserten Helligkeitsinformationen auch

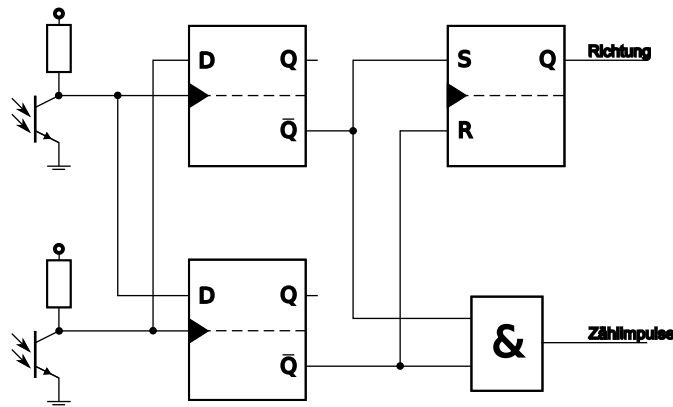


Abbildung 6: Auswerteschaltung für Richtungssinn mit zwei Sensoren

quantitativ ausgewertet werden, was jedoch aus dem Bereich der digitalen Messmethoden herausführt.

5 Aufgaben

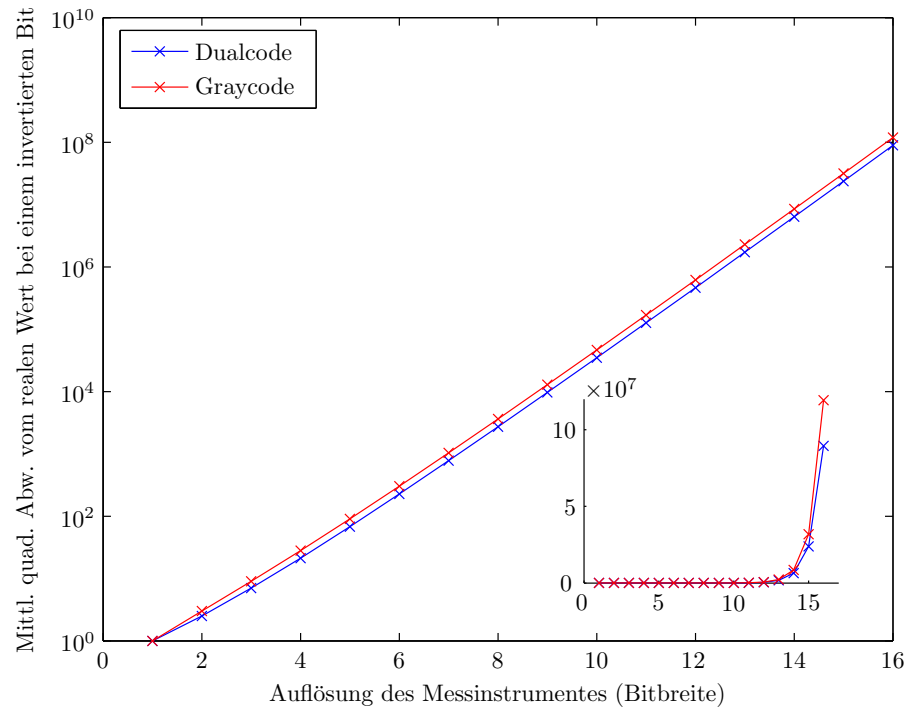
5.1 Funktionsweise der digitalen, absoluten Längenmessung

Mit dem Versuchsaufbau konnten wir eine grobe Längenmessung durchführen, dafür standen uns folgende Verfahren zur Verfügung.

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

Bei der Einfachabtastung erhielten wir wie erwartet Messfehler bei Übergängen auf nichtniederwertigen Bits. Weder mit dem Graycode noch mit der V-Abtastung konnten wir diese Fehler reproduzieren, selbst wenn man den Messtreifen schief eingeschoben hat.

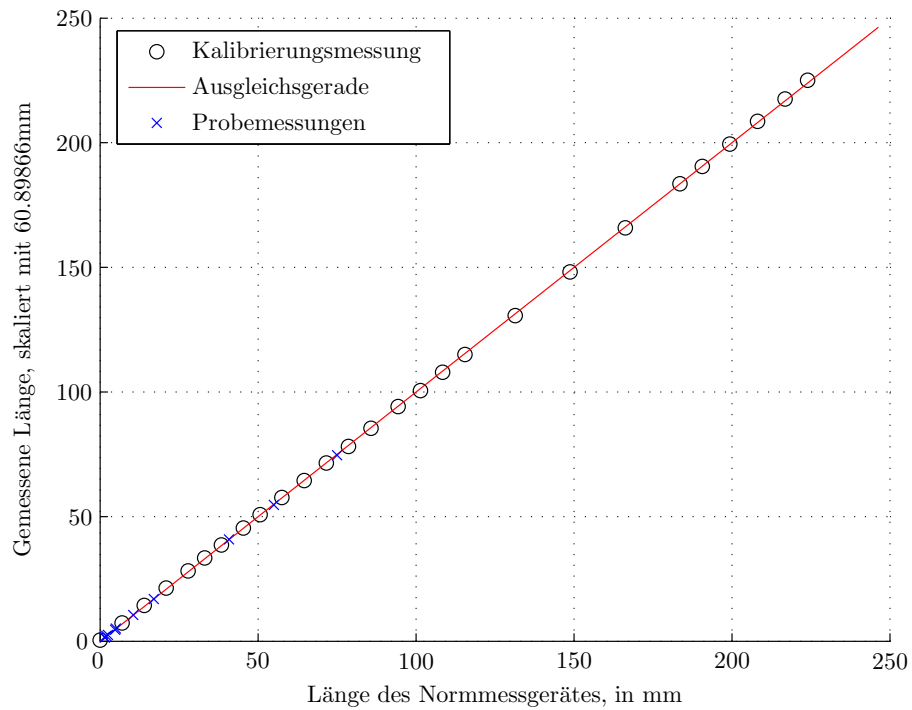
Um die Fehleranfälligkeit des Graycodes im Vergleich zum (korrekt abgelesenen) Dualcode zu ermitteln, haben wir eine weitere Betrachtung durchgeführt: Es sei angenommen, dass ein Bit des Ablesegerätes nicht mehr funktioniert und daher den falschen Wert ausgibt. Dadurch wird das Gesamtergebnis selbstständig verfälscht. Tritt der Fehler bei einem niederwertigen Bit auf, so sind die Auswirkungen vermutlich recht klein, während Messfehler bei hochwertigen Bits fatal sein können. Da der Graycode keine so strenge Rangfolge in der Wertigkeit der Bits hat wie es beim Dualcode der Fall ist, haben wir ein Simulationsprogramm geschrieben, welches alle möglichen Bitfehler durchtestet und somit einen „mittleren quadratischen Fehler“ errechnet:



Es wurde deutlich, dass der Dualcode etwas kleinere Fehler macht als der Graycode, wenngleich bei beiden Codierungsverfahren der mittlere (absolute) Messfehler exponentiell mit der Auflösung (d.h. etwa mit der Gesamtmessstrecke) zunimmt. Ab einer Auflösung von ca. drei Bit war der Graycode stets im Mittel um ein Viertel weniger fehlerresistent als der Dualcode.

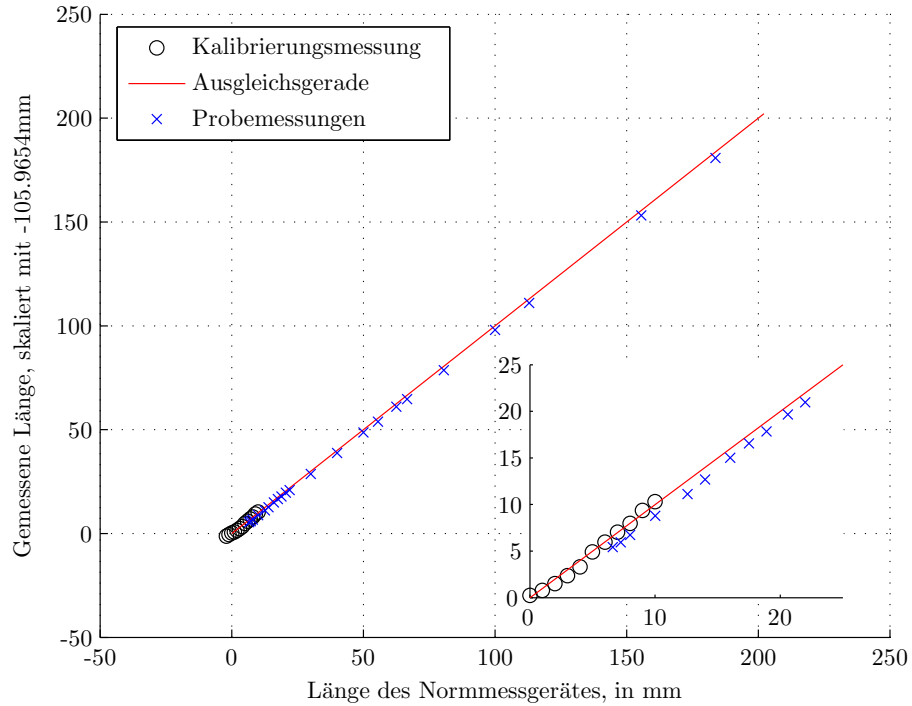
5.2 Skalierung der Ausgangssignale

5.2.1 Potentiometerkennlinie



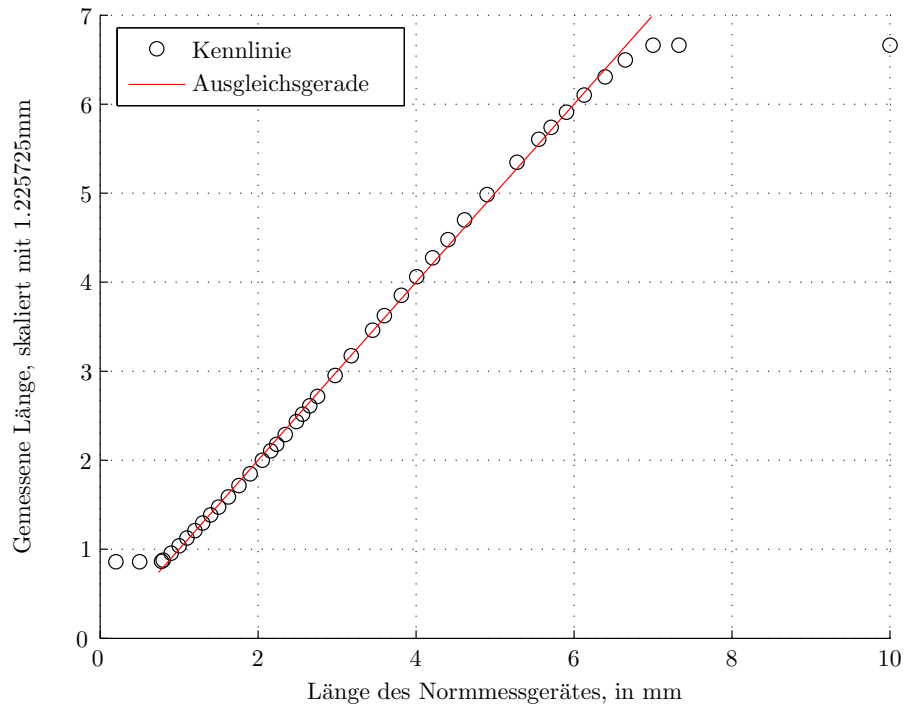
Das Potentiometer eignet sich sehr gut für Längenmessungen, wir erhielten bei den Probemessungen nach der Kalibrierung einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,999992$.

5.2.2 Seilzugsensorkennlinie

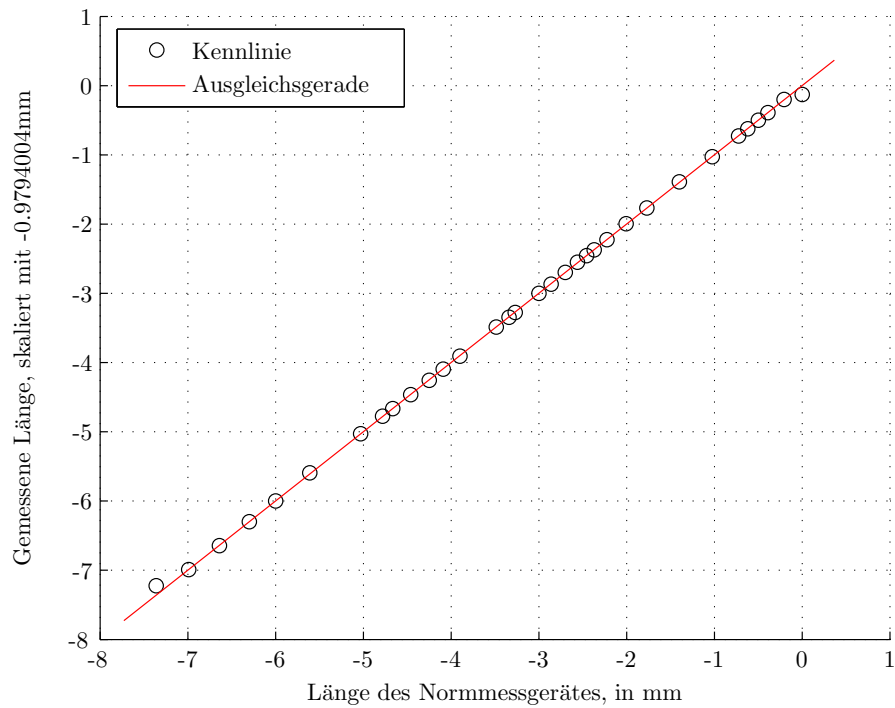


Auch der Seilzugsensor, welcher intern ähnlich wie das Potentiometer aufgebaut ist, brachte uns eine Korrelation von $r = 0,999993$. In dem Diagramm scheinen alle Probemessungen unterhalb der Ausgleichsgeraden zu liegen, was jedoch keinen Messfehler darstellt, da das Referenzmessgerät rein inkrementell arbeitet und für die Probemessungen zurückgesetzt wurde.

5.2.3 Wirbelstromsensorkennlinie

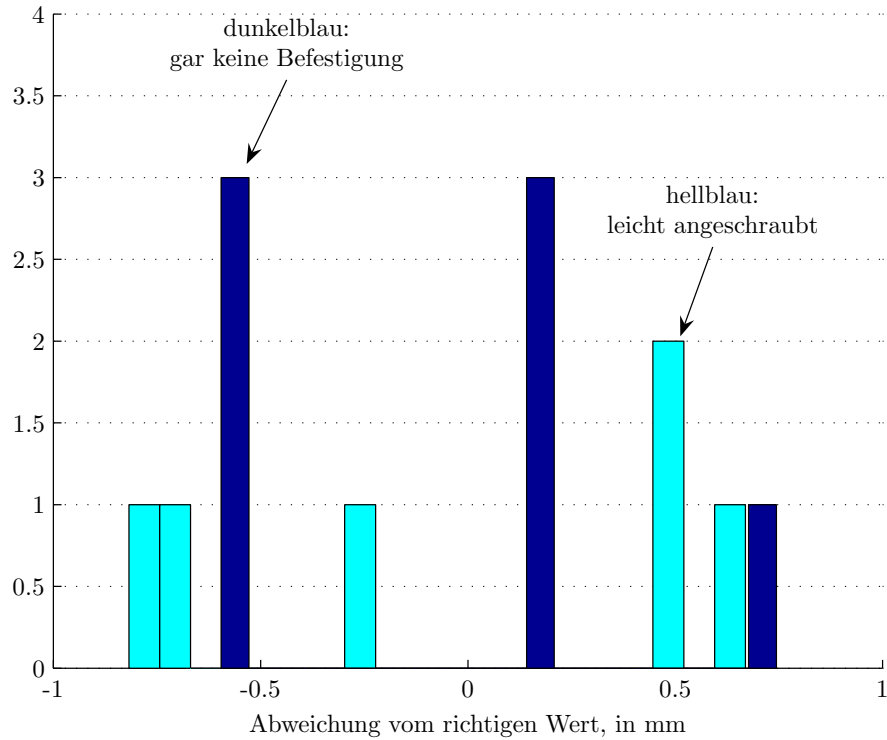


5.2.4 Induktionssensorkennlinie



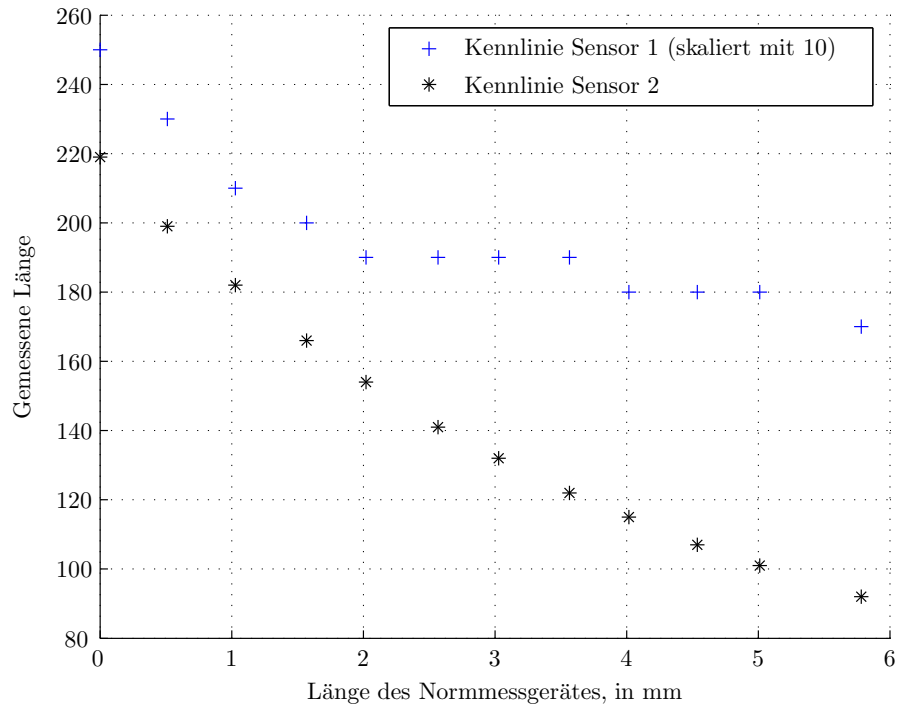
5.3 Auswirkungen des Abbeschen Komparatorprinzips

Um das Abbesche Komparatorprinzip zu verletzen haben wir die parallele Koppelung zwischen Referenzlängenmessgerät nicht sehr stabil gestaltet. Der gemessene Wert lief stets dem tatsächlichen nach, d.h. die Mechanik nutzte zuerst ihr „Spiel“ aus, bevor sie dem Messwert folgte.



Wir erhielten insgesamt eine Standardabweichung von $\sigma = 0.5635\text{mm}$. Bei den Probemessungen des Potentiometers unter Beachtung des Komparatorprinzips erhielten wir nur rund ein Drittel davon, nämlich $\sigma = 0.1658\text{mm}$.

5.4 Kennlinien der Fasersensoren



Hierbei ist zu beachten, dass der erste Sensor die Lichtintensität nur mit zwei Stellen ausgab und dafür im Diagramm entsprechend skaliert werden musste. Dies stellt kein Problem dar, da beide Sensoren mit verschiedenartigen Fasertypen angeschlossen waren und keine Messeinheit angegeben war.

6 Messdaten

6.1 Potentiometer

Während der Kalibrierung haben wir aufgenommen:

Messwert	Referenzlänge in mm
0.789	0.000
0.903	6.945
1.018	13.975
1.133	20.900
1.245	27.890
1.331	33.115
1.416	38.395
1.528	45.360
1.616	50.640
1.729	57.575
1.841	64.605
1.956	71.620
2.065	78.615
2.185	85.740
2.329	94.350
2.434	101.410
2.554	108.430
2.671	115.515
2.927	131.385
3.215	148.770
3.506	166.255
3.796	183.570
3.911	190.600
4.058	199.355
4.207	208.105
4.355	216.845
4.478	223.950

Anschließend haben wir die Reproduzierbarkeit getestet mit:

Messwert in mm	Referenzlänge in mm
2.081	2.000
5.055	5.000
1.636	1.460
1.457	1.460
2.528	2.520
4.610	4.735
10.557	10.500
16.950	16.995
40.887	40.805
54.714	55.010
74.637	75.000

6.2 Seilzugsensor

Während der Kalibrierung haben wir aufgenommen:

Messwert	Referenzlänge in mm
3.162	10.000
3.171	9.000
3.184	8.000
3.193	7.000
3.203	6.000
3.213	5.000
3.228	4.000
3.237	3.000
3.245	2.000
3.252	1.000
3.257	0.000
3.264	-1.000
3.271	-2.000

Anschließend haben wir die Reproduzierbarkeit getestet mit:

Messwert in mm	Referenzlänge in mm
5.433	6.625
5.950	7.250
6.726	8.000
8.796	10.015
11.124	12.600
12.677	14.000
15.005	16.005
16.556	17.500
17.851	18.905
19.662	20.605
20.955	22.000
28.716	30.000
38.806	40.005
48.637	50.035
53.811	55.555
61.054	62.560
64.676	66.625
78.646	80.580
98.049	100.005
110.984	113.000
153.153	155.555
180.835	183.775

Folgende Messwerte haben wir während der Kalibrierung verworfen, da wir anfangs die Umlenkung des Seiles nicht korrekt aufgebaut hatten (das Seil wurde nicht rechtwinkelig umgelenkt):

Messwert	Referenzlänge in mm
3.262	0.000
3.252	1.000
3.242	2.000
3.235	3.000
3.225	4.000
3.218	5.000
3.208	6.000
3.196	7.000
3.188	8.000
3.181	9.000
3.169	10.000

6.3 Induktionssensor

Messwert	Referenzlänge in mm
-2.957	0.000
-2.883	-0.205
-2.688	-0.390
-2.578	-0.500
-2.451	-0.620
-2.344	-0.725
-2.039	-1.025
-1.667	-1.400
-1.282	-1.770
-1.050	-2.005
-0.815	-2.225
-0.664	-2.370
-0.579	-2.455
-0.483	-2.560
-0.332	-2.700
-0.159	-2.860
-0.024	-3.000
0.259	-3.270
0.330	-3.340
0.474	-3.485
0.903	-3.900
1.094	-4.090
1.257	-4.250
1.470	-4.460
1.675	-4.665
1.787	-4.780
2.048	-5.030
2.622	-5.610
3.037	-6.000
3.345	-6.300
3.696	-6.640
4.050	-6.990
4.287	-7.360

Die folgenden beiden Messwerte wurden nicht übernommen, da es sich scheinbar um Tippfehler handelte:

Messwert	Referenzwert
- -2.236	-0.830
0.750	-3750

6.4 Wirbelstromsensor

Messwert	Referenzlänge in mm
0.007	0.200
0.007	0.500
0.010	0.780
0.022	0.800
0.085	0.900
0.154	1.000
0.225	1.100
0.293	1.200
0.361	1.300
0.437	1.400
0.508	1.500
0.601	1.625
0.706	1.760
0.813	1.900
0.938	2.055
1.023	2.160
1.084	2.235
1.174	2.345
1.292	2.485
1.360	2.565
1.436	2.655
1.523	2.755
1.714	2.975
1.895	3.180
2.129	3.450
2.263	3.600
2.449	3.815
2.620	4.010
2.793	4.210
2.959	4.405
3.140	4.615
3.372	4.900
3.669	5.280
3.879	5.555
3.989	5.710
4.128	5.905
4.285	6.130
4.451	6.395
4.607	6.650
4.741	7.000
4.741	7.330
4.741	10.000

6.5 Fasersensoren

Messwert Sensor 1	Messwert Sensor 2	Referenzlänge in μm
250	219	0
230	199	1
210	182	1
200	166	2
190	154	2
190	141	3
190	132	3
190	122	4
180	115	4
180	107	5
180	101	5
170	92	6

6.6 Komparatorprinzip

Es wurde im folgenden der Nullpunkt immer abwechselnd von links und von rechts angefahren, daher die alternierenden Vorzeichen:

Messwert	Referenzlänge in mm
0.744	0.000
-0.595	0.000
0.148	0.000
-0.595	0.000
0.148	0.000
-0.595	0.000
0.148	0.000
-0.224	0.000
0.670	0.000
-0.817	0.000
0.521	0.000
-0.669	0.000
0.521	0.000

6.7 Vergleichsprogramm Bitfehler beim Dualcode / Gray-code

```
#include<stdio.h>
```

```
int main() {
```

```
    unsigned int i,j;
```

```
    unsigned int dual, gray;
```

```
    unsigned int dual2, gray2;
```

```
    double q_abw_gray=0; // Mittlere Quadratische Abweichung f.
```

```
    double q_abw_dual=0; // Dualdarstellung / Graycodedarstellung
```

```
    int n=0;
```

```

int bitbreite=16; // Vorsicht, darf nicht den Speicherbereich
                  // von unsigned int ueberschreiten.

for ( i=0;i<=((1<<bitbreite)-1);i++)
{
    dual=i;
    gray=d2g(dual);

    // Wir kippen das j-te Bit um und sehen, was passiert:
    for ( j=0;j<=(bitbreite-1);j++)
    {
        dual2=dual ^ (1<<j);
        gray2=gray ^ (1<<j);
        gray2 = g2d(gray2);
        q_abw_gray += (gray2-i)*(gray2-i);
        q_abw_dual += (dual2-i)*(dual2-i);
        n++;
    }
}

printf("Fuer n=%i verschiedene Tests:\nDualcode, ",n);
printf(" mittlere quad. Abweichung: %f\n",q_abw_dual/n);
printf(" Graycode, mit quad. Abweichung: %f\n",q_abw_gray/n);

return 0;
}

// Diese Routine konvertiert eine Dualcode-Zahl
// im Speicher in die Graycode-Darstellung.
int d2g(int d) {
unsigned int g;
int i;
g = d;
// das hoechstwertige Bit (i=31) wird nicht geaendert.
for ( i=0;i<=30;i++) {
    if (g&(1<<(i+1)))
    {
        // das i-te Bit muss invertiert werden,
        // da das i+1-te Bit eine 1 ist.
        g ^= (1<<i);
    }
}
return g;
}

// Und diese Routine konvertiert eine Zahl zurueck
int g2d(int g) {
unsigned int d;
int i;
d = g;
for ( i=30;i>=0;i--) {

```

```
        if (d & (1 < (i + 1)))  
        {  
            d ^= (1 < i);  
        }  
    }  
    return d;  
}
```

7 Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] Jörg Hoffmann, *Taschenbuch der Messtechnik*, Fachbuchverlag Leipzig, 1998
- [2] Alfons Ernst, *Digitale Längen- und Winkelmeßtechnik*, Alfons Ernst, verlag moderne industrie, Landsberg/Lech, 1991
- [3] Rainer Felderhoff, *Elektrische und elektronische Messtechnik*, Hanser Verlag, München, 1990
- [4] http://de.wikipedia.org/wiki/Abbesches_Komparatorprinzip, 12.04.2006, 14:32
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/Michelson-Interferometer>, 12.04.2006, 14:38