

Untersuchung eines Alignementsystems mit optischem, absolut messendem Drahtabgriff

Diplomarbeit von Timo Linn
Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Fachbereich Geomatik

Beginn der Arbeit : 01.10.2002

Abgabe der Arbeit: 02.12.2002

Betreuender Prüfer: Professor Dr.-Ing. H. Sternberg
Zweiter Prüfer: Dr.-Ing. J. Prenting

Erklärung (§23(5)PSO)

Ich versichere, dass ich diese Abschlussarbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, den

.....

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Alignment Systeme	2
2.1 Fluchtpunktmessungen	2
2.2 Die optische Referenzlinie für Aligniersysteme	3
2.3 Das Fluchtfernrohr	4
2.4 Das Einfluchten mit einem Theodoliten	4
2.5 Geradheitsmessungen durch interferometrische Winkelmessungen	6
2.6 Geradheitsmessung mit Laser	7
2.7 Alignmentverfahren mit mechanischer Bezugslinie	8
2.8 Drahtmessmonitore	10
2.8.1 Drahtabtastung durch Pfeilhöhenmessgerät	10
2.8.2 Drahtabtastung nach dem Licht-Schatten-Verfahren	10
2.8.3 Drahtabtastung durch optische Abbildung	11
2.8.4 Drahtabtastung mit einem Scanner	11
2.8.5 Elektrische Drahtmessung	12
2.9 Das Drahtfindersystem	12
3. DESY – Deutsches Elektronen-Synchrotron	13
3.1 Was ist DESY?	13
3.2 Was ist TESLA?	14
3.3 Funktioneller Aufbau von Beschleunigungsanlagen	14
3.4 Der Ringbeschleuniger	15
3.5 Der Linearbeschleuniger	17
3.6 Messtechnische Aufgaben zur Errichtung und Nutzung von Teilchenbeschleunigern	18
3.7 Die Ausrichtung des Linearbeschleunigers und messtechnische Aufgaben	18
4. Der Drahtfinder	19
4.1 Kalibrierung und Feststellung der Drahtposition	19
5. Untersuchung des Systems	25
5.1 Untersuchung und Überprüfung des Einlaufverhaltens der Komponenten: Laser und Empfangsdiode, Mess- und Anzeigeräte	25

5.1.1	Untersuchung bzw. Überprüfung des Einlaufverhaltens des Lasers in Zusammenhang mit der Diode	25
5.1.2	Angaben zum Laser	26
5.1.3	Die Fotodiode	28
5.1.4	Messaufbau und Durchführung zur Überprüfung des Lasers und der Silicon-Photodiode	31
5.1.5	Ergebnisse des Einlaufverhaltens von Laser und Diode	32
5.2	Einlaufverhalten des Multimeters	37
5.2.1	Ergebnisse des Einlaufverhaltens des Multimeters	37
5.3	Einlaufverhalten des Signalverstärkers	39
5.3.1	Ergebnisse des Einlaufverhaltens des Signalverstärkers	40
5.4	Messaufbau zur Überprüfung der Skalierung des Messtasters mit Hilfe eines Interferometers	40
5.4.1	Kontrolle und Skalierung des Mitutoyo-Messtasters mittels HP Laserinterferometer	44
5.4.2	Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung des Messtasters	45
5.4.3	Fehlerbetrachtung (Standardabweichung)	45
5.5	Grundkurve / Drahtpositionsmessung	50
5.5.1	Ergebnisse der Grundkurve	52
5.6	Drehung des Lasers 0 / 50 / 100 gon	52
5.6.1	Ergebnisse der Laserdrehung	53
5.6.2	Beurteilung der Laserdrehung	53
5.7	Drehung der Schlitzblende der Photodiode zum Laser	55
5.7.1	Ergebnisse der Drehung	56
5.7.2	Beurteilung der Drehung	57
5.8	Untersuchung der Drahtstärken 0,1 mm – 0,8 mm	57
5.8.1	Ergebnisse der Drahtuntersuchung	58
5.8.2	Beurteilung der Drahtstärkenuntersuchung	61
5.9	Abstand des Drahtes zwischen Laser und Diode	62
5.9.1	Ergebnisse der Abstandsmessung	63
5.9.2	Beurteilung der Abstandsmessung	68
5.10	Abstandsveränderung des Lasers	69
5.10.1	Ergebnisse der Abstandsveränderung	69
5.10.2	Beurteilung der Abstandsveränderung	73
6.	Zusammenfassung und Ausblick	73
6.1	Beurteilung und Genauigkeitsaussage des Systems	73
6.2	Verbesserungsvorschläge	75

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1	Gegenüberstellung verschiedener Aligmentverfahren.	3
Abb. 2	Geradheitsmessung mit Theodolit	5
Abb. 3	Geradheitsmessung mit Laserstrahl und Referenzlinie	7
Abb. 4	Prinzip der Drahtabtastung über optische Abbildung	11
Abb. 5	Das System der Vorbeschleuniger beim DESY	16
Abb. 6	Schematische Darstellung eines Ringbeschleunigers	17
Abb. 7	Drahtfinder mit Unterbau, welcher zu Kalibrierung dient	19
Abb. 8	Schematische Darstellung zur Feststellung der Standardkonfiguration	22
Abb. 9	Drahtfinder installiert auf der x-Platte mit seinen Referenzbezugskugeln	24
Abb. 10	Schematische Prinzip eines Neonlasers	26
Abb. 11	Laser des Drahtfinders und spezifische Angaben des Herstellers	27
Abb. 12	Verhalten des Melles Griot Laser in Abhängigkeit von der Temperatur	28
Abb. 13	Funktionsprinzip der Diode	29
Abb. 14	Temperaturverhalten der Diode	30
Abb. 15	Messaufbau ohne abgeschirmten Drahtfinder	32
Abb. 16	Spannungskurve des Einlaufverhaltens der Diode im Kaltzustand	34
Abb. 17	Ausschnitt des Einlaufverhaltens der Diode im Kaltzustand über ca.15 Minuten aus Abb. 15	34
Abb. 18	Spannungskurve des Einlaufverhaltens des Lasers im Kaltzustand.	35
Abb. 19	Ausschnitt des Einlaufverhaltens des Lasers im Kaltzustand über ca. 15 Minuten aus Abb.17	35
<u>Abb. 20</u>	<u>Spannungskurve von Laser und Diode, im Kaltzustand eingeschaltet</u>	<u>36</u>
Abb. 21	Spannungskurve des Drahtfinders, mit 0,1 mm starkem Draht unter Einstellung der Spannung aufgezeichnet.	37
Abb. 22	Einlaufverhalten des Multimeters	38
Abb. 23	Benutzer Signalverstärker	39
Abb. 24	Einlaufverhalten des Signalverstärkers	40

<u>Abb. 25</u>	<u>Ausgebauter Messtaster in der neuer Messvorrichtung</u>	
	unter Einhaltung des ABBE'schen Komparatorprinzips	41
Abb. 26	Versuchsaufbau zur Untersuchung des Messtasters, im Hintergrund der Instrumentenkellers des DESY Hamburg	43
Abb. 27	Tabelle der Winkelmessung zur Ausrichtung des Tasters Horizontal	44
Abb. 28	Streckenvergleichsmessung zwischen Interferometer und Messtaster.	46
<u>Abb. 29</u>	<u>Zweite Streckenvergleichsmessung zwischen Interferometer</u>	
	und Messtaster. Ausgangssituation: eingefahrener Taster	47
Abb. 30	Streckenvergleichsmessung zwischen Interferometer und Messtaster. Ausgangssituation der Messung beginnt mit ausgefahrenem Taster	48
Abb. 31	Schematisches Modell des Drahtfinders im Querschnitt und seine Funktionsweise	50
Abb. 32	Spannungskurve zur Erstellung des Drahtprofils	52
Abb. 33	Spannungskurve des Drahtfinders. Laser in Ausgangsposition (0 Gon)	53
<u>Abb. 34</u>	<u>Spannungskurve des Drahtfinders, mit gedrehtem Laser</u>	
	(50 Gon)	54
<u>Abb. 35</u>	<u>Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Laser</u>	
	(100 Gon)	54
Abb. 36	Spannungskurve des Drahtfinders in seiner Ausgangsposition	56
<u>Abb. 37</u>	<u>Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Schlitz</u>	
	(50 Gon)	56
Abb. 38	Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Schlitz von 100 Gon	57
Abb. 39	Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke 0.1mm	58
Abb. 40	Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke 0.2 mm	59
Abb. 41	Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke 0.5 mm	60
Abb. 42	Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke 0.8 mm	61
Abb. 43	Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtabstand unverändert	63
Abb. 44	Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.5 cm näher zur Diode	64
Abb. 45	Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 1 cm näher zur Diode	65
Abb. 46	Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.4 cm näher an den Laser angebracht	66
Abb. 47	Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.5 cm näher	

	an den Laser angebracht	67
Abb. 48	Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.6 cm näher an den Laser angebracht	68
Abb. 49	Spannungskurve des Drahtfinders , Abstandsveränderung des Lasers um 0,6 cm	69
Abb. 50	Spannungskurve des Drahtfinders, Abstandsveränderung des Lasers um 3 cm	70
Abb.51	Spannungskurve des Drahtfinders, Abstandsveränderung des Lasers um 0,6cm (Laser um 0 Gon gedreht)	71
Abb.52	Spannungskurve des Drahtfinders, Abstandsveränderung des Lasers um 3cm (Laser um 0 Gon gedreht)	72
Abb.53	Optimierte Grundkurve . Spannungskurve des Drahtfinders, Laser (100 Gon gedreht, Drahtstärke 0,1 mm	74
Abb.54	Vorrichtung (X-Platte) für die verbesserte Lagerung des Drahtfinders	75

Anhangsverzeichnis

siehe Anhang (CD-Rom)

- **Abstand-Laser**
- **Drahtstärken**
- **Drahtverschiebung**
- **Drehung der Diode**
- **Einlaufverhalten**
- **Endgültige Kurve**
- **Laserdrehung**
- **Messtasterüberprüfung**
- **Sonstiges**
- **Diplomarbeit digital**

1. Einleitung

Durch die Technologiefortschritte der letzten Jahrzehnte werden die Messgenauigkeiten im Bereich der Vermessung immer größer, gleichzeitig steigen aber auch die Anforderungen an die Messgenauigkeiten, so dass im Bereich des Maschinenbaus Standardabweichungen von wenigen μm erreicht werden müssen.

Einen ähnlich hohen Anspruch an die Vermessung stellt auch das Desy (Deutsches Elektronen-Synchrotron) an ein Alignementsystem mit optisch absolut messendem Drahtabgriff.

In Zusammenarbeit mit dem SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) wurde der Drahtfinder für das DESY konzipiert, welcher den Drahtmittelpunkt (unabhängig vom Querschnitt) berührungslos festlegen kann.

Der Drahtfinder besteht aus einem Laser und einer Fotodiode, die so angeordnet sind, dass der zu messende Draht von dem Laserlicht bestrahlt wird und auf der darunter liegenden Fotozelle als Schatten erscheint. Zur Kontrasterhöhung haben sowohl der Laser als auch die Fotozelle einen Schlitz als Blende. Zur genauen Positionsbestimmung des Drahtes kann die Fotozelle unter dem Draht verschoben werden, um so die Übergangsbereiche Licht/Schatten besser erfassen zu können. Über die Änderung der Spannung der Fotozelle und der Verschiebung der Fotozelle, die mit einer Mikrometerschraube gemessen werden kann, lässt sich die Mittelpunktslage des Drahtes hochgenau bestimmen.

In dieser Arbeit wird die praktikable Einsetzbarkeit und Genauigkeit des Drahtfinders sowie ein Vergleich mit anderen nutzbaren Systemen aufgestellt. Es wird eine genaue Studie über das Verhalten der Spannungskurve des Drahtfinders durch Ändern einzelner Parameter in der Konstruktion betrieben. Um eine Aussage über die Genauigkeit des System treffen zu können, werden mitwirkende Komponenten sowie Drahtfinderkomponenten einer Untersuchung unterzogen und auf ihre Stabilität überprüft. Die Genauigkeit des Drahtfinders zur Bestimmung des Drahtmittelpunktes soll im μm -Bereich liegen.

2. Alignment Systeme

2.1 Fluchtungsmessungen

In der Vermessung sowie im Maschinenbau stellte man sich früh die Aufgabe, eine Gerade mit hoher Genauigkeit über einzelne Messpunkte zu bestimmen. In den letzten 10 Jahren wurden diese Anforderungen immer höher und genauer. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren und Methoden der Alignementsysteme verglichen.

Die Fluchtungsmessung ist ein Alignment, bei der die Messpunkte längs einer Geraden ausgerichtet werden oder die Ablagen der Messpunkte werden von einer horizontalen und/oder vertikalen Richtung ermittelt. Es gilt, die einzelnen Messpunkte mit hoher Genauigkeit auszurichten und die entstehenden Restabweichungen (horizontal/vertikal) zu dokumentieren, so dass man zwischen der Ablage und der Ermittlung von relativen Längenveränderungen unterscheiden kann. Verfahren, die es über einen Entfernungsbereich von einigen Metern bis zu einigen 100 Metern ermöglichen, Messunsicherheiten von unter 1 mm bis zu einigen wenigen Mikrometern zu erreichen, sollen im Folgenden diskutiert werden. Es gibt verschiedene Methoden, solche Messungen zu tätigen, zum Beispiel optische Verfahren mit Fernrohren oder mechanische, durch das Spannen eines Drahtes. Eine systematische Zuordnung der verschiedenen Alignmentverfahren mit mechanischer und optischer Bezugslinie ist in Abb. 1 zusammengestellt.

[Hennecke, Müller, Werner, 1992]

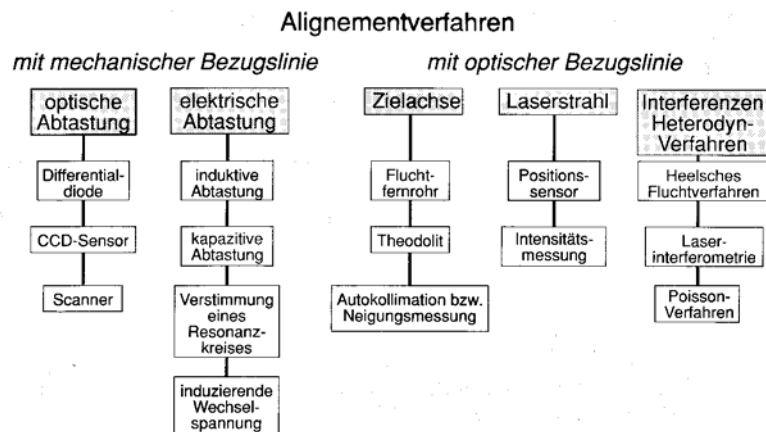


Abb. 1: Gegenüberstellung verschiedener Alignementverfahren [Schwarz, W. 1995, Seite 128].

2.2 Die optische Referenzlinie für Aligniersysteme

Bei optischen Verfahren wird eine Referenzlinie durch einen Laserstrahl oder näherungsweise durch ein Strichkreuz und einen Objektivmittelpunkt der definierten Ziellinie eines Fernrohres verwendet. Neben dem mechanischen Aufbau und dem Auflösungsvermögen, wird die Genauigkeit durch die Refraktionserscheinungen des Mediums bestimmt, das die Referenzlinie umgibt. Hier muss also möglichst eine refraktionsfreie Messung erzielt werden. [Schwarz, W. 1995] und [Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002]

2.3 Das Fluchtfernrohr

Hier wird die Bezugslinie durch die Ziellinie eines Fernrohrs gegeben, dessen Genauigkeit über den gesamten Fokussierbereich garantiert werden muss. Es hängt die Genauigkeit u.a. von der Führungsabweichung der Fokussierlinse, von der Güte der Planplatten, von der Entfernung vom Gradienten des Brechungsindex der Atmosphäre quer zur Visur und von der einseitigen Wärmewirkung auf das Fernrohr ab.

Ein System wurde z.B. von der Firma Taylor-Hobson entwickelt, ein zylindrisches Fernrohr, welches in einer Kugel gelagert ist, deren Mittelpunkt in einer Ziellinie liegt und gleichzeitig den Mittelpunkt definiert. Die Bezugslinie ist für die Fluchtmessung durch die Verbindungslinie des Kugelmittelpunktes und der Endpunkte definiert. Die angegebenen Genauigkeiten liegen hier bei Entfernungen bis 30 m unter 0,20 mm, vorausgesetzt die atmosphärischen Verhältnisse und Refraktionseinflüsse können ausgeschlossen werden.

[Schwarz, W. 1995] und [Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002]

2.4 Das Einfluchten mit einem Theodoliten:

Hier wird anstelle eines Fluchtfernrohres ein Theodolit zum Einfluchten benutzt. Zusätzlich lassen sich die Ablagen der Messpunkte durch Winkel- und Streckenmessung auf diese Bezugslinie berechnen. Die Streckenendpunkte bilden dann den Schnittpunkt der Theodolitenachsen (Steh-, Kipp- und Zielachse) und dienen als Zielmarke. Die Genauigkeit der Ablage wird von der Genauigkeit des Brechungswinkels β bestimmt. In Abb. 2 ist das Messprinzip für die Gerademessung mit einem Theodoliten zeichnerisch erläutert.

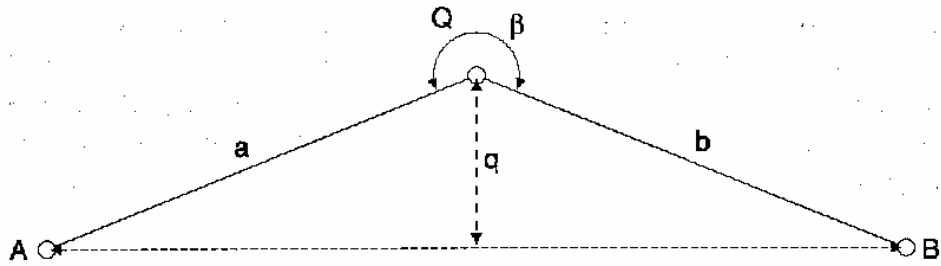


Abb. 2 Geradheitsmessung mit Theodolit [Schwarz, W. 1995, Seite 138].

Hier wird die Genauigkeit in einer Standardabweichung des Brechungswinkels von 0,3 mgon bei Ablage eines Punktes in der Mitte einer 100 m langen Strecke mit einer Standardabweichung von 0,12 mm angegeben. Durch Einsetzen weiterer Zwischenpunkte zwischen den Endpunkten und Messen der Brechungswinkel zu seinen Nachbarn wird die Genauigkeit verschlechtert. Die Einflüsse der Refraktion haben natürlich auch einen weiteren Einfluss auf die Ablage der Punkte.

[Schwarz, W. 1995]

Autokollimation

Vereinigt man Kollimator (Projektor, der eine beleuchtete Strichplatte ins Unendliche abbildet) und Fernrohr zu einer Einheit, so entsteht ein Autokollimationsfernrohr. Dieses Autokollimationsverfahren funktioniert so, dass längs eines zu messenden Objektes (z.B. die Führungsbahn einer Maschine) ein Autokollimationsspiegel in Intervallen versetzt wird. In den jeweiligen Positionen wird die hervorgerufene Richtungsänderung der Normalen des Spiegels durch die Form der Führungsbahn gemessen. Die Richtungsänderung multipliziert mit dem Fußabstand wird summiert, daraus ergibt sich der Geradheitsverlauf des Objektes. Nun werden die Ablagen jedes Messpunktes, bezogen auf die Endpunkte, d.h. auf die vermittelnde Gerade, berechnet. Dieses Verfahren lässt horizontale als auch vertikale Ablagenbestimmungen zu. Die Genauigkeiten dieses Verfahrens werden beeinflusst durch ungünstige Summationen. Refraktionseinflüsse führen zu systematischen Abweichungen. Auflage- und Verschiebeschlitten sind sehr schwer und wirken sich in Form von Eindringtiefe,

welche unregelmäßig ist, durch ein ungünstiges Übertragungsverhalten des Verfahrens auf die systematischen Messabweichungen aus.

Hier sind für die Richtungsänderungen je eine Standardabweichung von 0,2 mgon anzusetzen und ein Querversatz d_q von 0,3 μm , wenn die benachbarten Messpunkte den Abstand $a = 100 \text{ mm}$ voneinander haben.

[Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002]

2.5 Geradheitsmessungen durch interferometrische Winkelmessungen

Die Richtungsänderungen des Verschiebeschlittens lassen sich auch durch interferometrische Winkelmessung bestimmen. Agilent Technologies (Hewlett-Packard) bietet zwei Messsysteme dieser Art mit unterschiedlichen Reichweiten an. Für Messdistanzen von 0,1 bis 2 m wird eine Auflösung bzw. Genauigkeit von 0,01 μm garantiert und bei Distanzen von 1 m bis 30 m eine Auflösung von 0,1 μm . Beide Systeme messen Querablagen von $\pm 1,5 \text{ mm}$.

Somit betragen die Genauigkeiten im Kurzstreckenbereich 3,5 % bis 1 % des angezeigten Wertes und in der Langstreckenversion 5 % = 2,5 %. Dies hängt davon ab, ob alle systematischen Fehlereinflüsse vermieden worden sind.

Die Funktion des Interferometers sieht folgendermaßen aus: Es sind dazu ein Winkelspiegel (Geradheitsreflektor), ein Wollastonprisma und ein Geradheitsinterferometer erforderlich. Das Wollastonprisma ist auf einer beweglichen Vorrichtung des zu untersuchenden Werkstückes angebracht, und der Winkelspiegel ist am Ende der Messstrecke fest montiert.

Hierbei werden die zwei Reflektorstrahlen, die von dem Laser gesendet werden, wieder aufgefangen und durch den Laser zurück über einen Strahlleiter in einen Photodetector geleitet.

Winkelspiegel (Geradheitsreflektor) sowie Wollastonprisma sind aufeinander abgestimmt. Beide Teilspiegel sind um zwei Zehntel gegen die Senkrechte der Spiegelachse geneigt.

Beide Teilstrahlen werden nun in sich zurückreflektiert, durchlaufen erneut das Interferometer, wo sie sich wieder vereinigen. Gemeinsam gelangen sie in den Laser zurück und werden dort über einen Strahlteiler auf den Photodetektor geleitet.

Der Laserkopf muss vor der Messung mit Hilfe des Reflektors justiert werden, so dass Laserstrahl und Spiegelachse zusammenfallen.

Die eigentliche Messgenauigkeit beträgt beim Kurzstreckenmesssystem 3,5 % bis 1% des angezeigten Wertes, bei der Langstreckenversion 5 % bis 2 %. Diese Genauigkeit kann jedoch von systematischen Fehlern stärker beinflusst werden. [Schwarz, W. 1995] und [Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002]

2.6 Geradheitsmessung mit Laser

Dies ist eine sehr einfache Methode. Ein Laserstrahl trifft auf einen Messpunkt (verschiebbarer montierter Positionssensor in Form von einer Lateraleffektdiode oder einer CCD-Matrix. Hier kann die Position des Laserflecks (horizontal, vertikal) vom Sensor erfasst und auf wenige Mikrometer genau bestimmt werden, (siehe Abb.3) Die systematischen Messunsicherheiten wie z.B. Positionsänderung des Lasers durch thermische Einflüsse müssen erfasst und berücksichtigt werden, dies geschieht durch gleichzeitiges beobachten einer Referenzlinie.

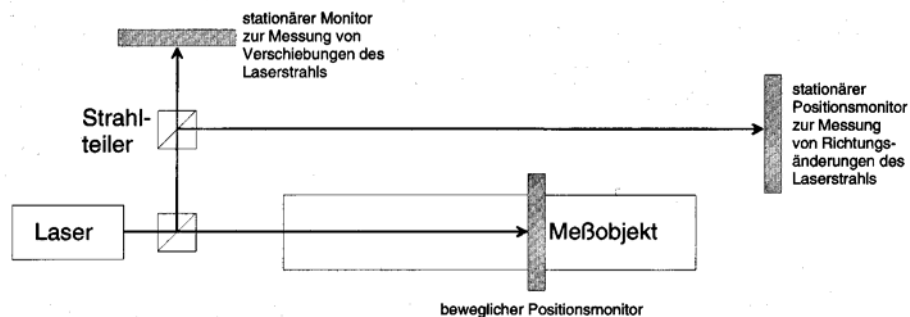


Abb. 3 Geradheitsmessung mit Laserstrahl und Referenzlinie. [Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002, Seite 130].

Die Messunsicherheit wird auch hier durch mehrere systematische Effekte erhöht, wie z.B. durch Lageverschiebung des austretenden Laserstrahles, Richtungsänderung durch thermische Bedingungen, Veränderung der Intensitätsverteilung innerhalb des Laserfeldes, atmosphärisch bedingte Veränderung der Form des Laserflecks und die Refraktion der Atmosphäre.

Bei diesen Systemen muss darauf geachtet werden, dass die Längsachse des Sensorsystems beim Verschieben parallel bleibt.

Diese Art von Lasersystemen bieten Firmen mit einer Genauigkeit von 0,005 mm/m bis 0,05 mm/m an. Bei diesen Geräten muss auf die Einlaufzeit der Laser geachtet werden, damit Aufwärmeeffekte abklingen.

[Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002] und [Schwarz, W. 1995]

2.7 Alignmentverfahren mit mechanischer Bezugslinie

Als mechanische Bezugslinie (Gerade) wird ein gespannter Draht benutzt. Meist dient dieser der Bezugslinie, um Ablagen der Messpunkte in horizontaler Richtung zu bestimmen. Bei Relativmessungen können horizontale und unter gewissen Einschränkungen auch vertikale Komponente der Lageveränderung bestimmt werden. Der Draht, der hier vorgegeben wird, besteht meist aus speziellen Legierungen (Nivaflex) oder aus Kunststoffen (Nylon, Kevlar, Karbon). Zu beachten ist bei diesen Systemen die Fehlerkomponente des Drahtdurchhangs.

Ein Beispiel: Bei einem 45 m langem Draht aus Federstahl,(Dichte: 7,87 kg/dm³, Zugfestigkeit zwischen 2010 – 2250 N/mm²) mit einem Durchmesser von 0,4 mm, beträgt bei maximaler Spannkraft von 420 N der Durchhang 6 mm.

Der Drahtdurchhang wird nach folgender Formel berechnet [Schwarz, W. 1995, Seite 129]:

$$d = \frac{b \cdot l}{8 \cdot k}$$

- mit d : maximaler Durchhang in m,
 b : Gewicht des Drahtes in N,
 l : Drahtlänge in m,
 k : Spannkraft in N.

Zusätzlich bildet ein gespannter Draht ein Schwingungssystem. Die Frequenz der transversalen Grundschiwingung kann nach folgender Formel [Schwarz, W. 1995, Seite 129] berechnet werden .

$$f = \frac{1}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{k}{\rho \cdot s}}$$

mit f : Frequenz der transversalen Grundschiwingung in Hz,

l : Länge des gespannten Drahtes in m,

k : Spannkraft in N,

ρ : Dichte des Drahtmaterials in kg/mm³,

s : Querschnittsfläche des Drahtes in m².

Bei solch einem Drahtsystem müssen also folgende systematische Fehler beachtet werden:

- Qualität des Drahtes
- gleichmäßiger Querschnitt
- Biegemomente
- Schwingung
- Beeinflussung durch magnetische Felder
- Spannvorrichtung, Umlenkrollen
- Durchhang für Höhenberechnung
- Temperaturabhängigkeit.

2.8 Drahtmessmonitore

Um nun einen Bezug auf diese über den Draht gespannte Gerade herzustellen muss man versuchen, die Drahtposition zu messen. Dieses erfolgt auf optischem oder elektrischem Wege.

2.8.1 Drahtabtastung durch Pfeilhöhenmessgerät

Ein von Cern in Genf entwickeltes Pfeilhöhenmessgerät erlaubt es, über die optische Drahtmessung den Abstand des Drahtes von einem Zentrierzapfen durch eine Spindelablesung zu definieren. Hierbei wird ein Messkopf über einen Regelkreis und eine Präzisionsspindel solange bewegt, bis er sich zentrisch unter einem als Referenz gespannten Nylonfaden befindet. Dieser wird auf einer Differenzial-Diode abgebildet, indem er über Infrarotdioden von unten beleuchtet wird.

2.8.2 Drahtabtastung nach dem Licht-Schatten-Verfahren

Bei diesem Prinzip nach dem Licht-Schatten-Verfahren erzeugt ein paralleler Lichtstrahl (Bündel) von dem abzutastenden Draht einen Schatten auf einem Sensor z.B. (CCD-Zeilensensor). Über die Lichtintensität, die der Zeilensensor aufnimmt, lässt sich nun die Position des Drahtes bestimmen.

In Abb.4 wird das Prinzip der Drahtabtastung über optische Abbildung dargestellt. Das Bild ist entnommen aus dem Buch von [Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002, Seite 135].

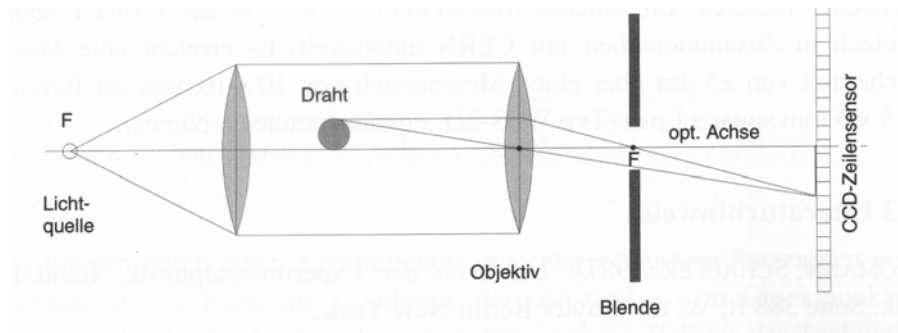


Abb.4 Prinzip der Drahtabtastung über optische Abbildung.

2.8.3 Drahtabtastung durch optische Abbildung

Dieses ist ein erweitertes Verfahren des Licht-Schatten-Verfahrens, bei dem der Draht über eine weitere Optik auf dem CCD Zeilensensor abgebildet wird. Hier gilt es, den Sensor vor Verunreinigungen zu schützen, um ihn auch bei rauen Produktionsumgebungen einsetzen zu können.

2.8.4 Drahtabtastung mit einem Scanner

Um ein positioniertes Messobjekt in einem Strahlengang (z.B. ein gespannter Draht) in ein Bezugssystem zu bringen, misst man den zeitlichen Verlauf der auftreffenden Lichtintensitäten auf den Empfänger. Diese sollen Aufschluss über Durchmesser und Position in Bezug zu einem Scanner geben. Dieses funktioniert über eine Lichtquelle z.B. Laserstrahl, der über einen Drehspiegel abgelenkt und auf eine Sammellinse gelenkt wird. Eine weitere Sammellinse fokussiert das einfallende Licht auf einen Empfänger, der es als ein elektrisches Signal verwaltet.

[Schwarz, W. 1995] und [Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002] und [Hennecke, Müller, Werner, 1992]

2.8.5 Elektrische Drahtmessung

Es gibt verschiedene Verfahren, mit der die Drahtposition berührungslos elektrisch erfasst werden kann:

- induzierte Wechselspannung
- kapazitiv
- induktiv
- Verstimmung eines Resonanzkreises.

Als Beispiel für eine elektrische Drahtmessung dient das dynamische Zentriersystem des FFTB des Stanford Linear Accelerators in Kalifornien. Hier gibt man ein Signal auf einen Draht (140 MHz), das in den Monitoren an horizontal bzw. vertikal zueinander stehenden Antennenpaaren Differenzspannungen induziert.

Größe und Vorzeichen des Differenzsignals liefern ein Maß für die Ablage des Monitors vom Draht. Dieses Verfahren wurde beim DESY in Hamburg entwickelt und beim FFTB installiert. Es liefert Auflösungen im [μm -Bereich] .

[Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002]

2.9 Das Drahtfindersystem

Bei der Justierung von Komponenten in Beschleunigeranlagen existieren unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen. Für die Undulatoren des VUV-FLE (Vacuum Ultra Violet – Free Electron Laser) ist z.B. eine Genauigkeit im Bereich von ca. 20 μm gefordert. Mit Hilfe des Drahtfinders sollen Genauigkeiten im μm Bereich garantiert werden.

Dieser Genauigkeitsbereich ist mit herkömmlichen Alignmentsystemen einhaltbar, allerdings messen diese nur relativ. Die Absolutmessung geschieht mit Hilfe des Drahtfinders. Deshalb versucht man, die Ausrichtung der Undulatoren über eine Kombination aus einem Drahtsystem mit mechanischer Bezugslinie und einem optischen Lichtschattensystem zu kombinieren. Hierzu wurde der (Wirefinder) Drahtfinder entwickelt, mit dem man durch relative Messungen, den absoluten Mittelpunkt eines Drahtes unabhängig vom Querschnitt ermitteln kann.

Die erwünschte Genauigkeit, welche im Folgenden untersucht und beurteilt werden soll, liegt hier im μm Bereich. Diese leisten die vorher genannten Systeme leider nicht. Zusätzlich sind die optischen Systeme mit zu großen systematischen Fehlern behaftet.

Bevor ich dieses System ausführlich beschreibe, möchte ich einen kurzen Einblick über das DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) geben, damit man sich eine Vorstellung über die Messproblematik machen kann, die höchste Genauigkeit erfordert.

3. DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron

3.1 Was ist DESY

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron ist ein nationales Forschungszentrum der physikalischen Grundlagenforschung. Das Desy ist Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft.

In dem Standort von DESY (Hamburg) werden Beschleuniger betrieben, die für die Teilchenphysik und für die Forschung mit Synchrotronstrahlung genutzt werden. Es wird finanziert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (90 %), von der Behörde für Wissenschaft und Forschung (10 % für DESY Hamburg) und vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur (10 % für DESY Zeuthen). Die Basis für das DESY-Forschungsprogramm bilden Teilchenbeschleuniger. Vier Ringbeschleuniger Desy, Doris, Petra, und Hera werden derzeit genutzt. Außerdem ist die Testanlage TTF (Tesla Test Facility) in Betrieb, an der die Entwicklungsarbeiten für das Zukunftsprojekt TESLA mit einem 33 km langen

Elektron-Positron-Linearcollider mit integriertem Röntgenlaser durchgeführt werden. Der Drahtfinder, der noch im folgenden Kapitel dargestellt und beurteilt wird, soll Undulatoren des Linearbeschleunigers in höchster Präzision auf eine Gerade in der TTF ausrichten.

[DESY, 2002a]

3.2 Was ist TESLA ?

TESLA soll neue Perspektiven sowohl in der Grundlagenforschung als auch für anwendungsnahe Forschungen in verschiedenen Naturwissenschaften eröffnen.

Der Name TESLA bedeutet TeV-Energy-Superconducting-Linear-Accelerator, also supraleitender linear Beschleuniger für Tera-Elektronenvolt-Energien.

In diesem, wie schon erwähnt, 33 Kilometer langen Linearbeschleuniger sollen Elektronen auf ihre Antiteilchen, die Positronen, stoßen.

Die TESLA-Anlage soll sich vom DESY-Gelände Hamburg-Bahrenfeld bis an die Nordgrenze des Kreises Pinneberg in Schleswig-Holstein erstrecken.

[DESY, 2002b]

3.3 Funktioneller Aufbau von Beschleunigungsanlagen

Es wird versucht, mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern, energiereiche Teilchen für den Beschuss von Atomkernen zu erzeugen. Meistens handelt es sich hier um Protonen, Positronen und Elektronen oder leichte Kerne, die im Vakuum auf sehr hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen sind. Dies erfolgt entweder

1. mit elektrostatischen Feldern
2. oder durch Aussetzen der Teilchen mit Wirkung hoch frequenter elektrischer Wechselfelder.

Diese Teilchen werden mit anderen zur Kollision gebracht .

Man leitet den Teilchenstrom auf sogenannte Targetstationen, damit er dort auf Teilchen des Targets trifft. Nun werden aus den Atomkernen andere Teilchen herausgeschlagen. Es lassen sich, indem man die Spuren und Eigenschaften registriert und bestimmt, neue Teilchen entdecken.

Ein anderes Verfahren ist die Kollision von Teilchenstrahlen bei sehr hohen Geschwindigkeiten durch Beschleunigung auf Kreisbahnen.

Entsprechend der geometrischen Form unterscheidet man hier zwischen Linear- und Kreisbeschleunigern.

Um zu verhindern, dass die Teilchen durch Zusammenstöße an Energie verlieren, indem sie mit Gasatomen kollidieren, muss die Teilchenbahn in einem Vakuum verlaufen. Die Herstellung dieser Vakuumrohre ist ein wesentliches Problem bei den Konstruktionen von Beschleunigern. Diese einleitenden Bemerkungen sollen das Wirkungsprinzip der Beschleuniger besser erklären.

[Hennecke, Müller, Werner 1992] und [Schwarz, W. 1995] und [Möser, Müller, Schlemmer, Werner]

3.4 Der Ringbeschleuniger

Das Grundprinzip der Teilchenbeschleuniger ist, elektrische Teilchen auf hohe Energien zu bringen, d.h. negativ geladene Elektronen und ihre positiv geladenen Antipartner die Positronen sowie geladene Protonen auf fast Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Dieses Maß an Beschleunigung drückt sich nicht mehr in Geschwindigkeitszunahme, sondern als Energieerhöhung in Elektronenvolt (eV) aus. Es gibt also keine Geschwindigkeitszunahme mehr, sondern nur noch eine Massezunahme. Die Beschleunigung geschieht durch elektrische Felder. Man setzt hier im Teilchenbeschleuniger hochfrequente elektromagnetische Wechselfelder ein. Hier bewegen sich die Teilchen wie ein Surfer auf einer Welle. Sie werden mitgeführt und beschleunigt. Die Teilchenpakete, die zu beschleunigen sind, werden in einem Hochvakuum auf einer geschlossenen Bahn geführt. Dies geschieht durch Dipolmagnete bzw. Fokussiermagnete. Diese zu beschleunigenden Teilchen werden nun in Kreisbeschleunigern (Speicherringen) beschleunigt. Wenn sie die gewollte Energie erreicht haben, werden sie herausgelenkt und in verschiedene Hallen geleitet, in denen die eigentlichen Experimente stattfinden.

Der Hera-Speicherring (Hadron-Elektronen-Ring-Anlage), welcher einen Umfang von 6,3 km hat, wurde von dem DESY in Hamburg errichtet. Hier werden 27 GeV-Elektronen in einem Ring gegen 920 GeV-Protonen in einem zweiten Ring aus supraleitenden Magneten beschleunigt. In zwei getrennten Strahlrohren laufen Protonen und Elektronen in entgegengesetzter Richtung. Für Experimente werden Elektronen und Protonen in den Experimentierhallen zur inelastischen Wechselwirkung gebracht. In einer dieser Hallen kollidieren die Protonen mit einem festen Target. Ein Beispiel für ein solches Beschleunigungsprinzip soll mit

Hilfe der Abb.5 erklärt werden. Für Elektronen und Protonen ist das Beschleunigerprinzip gleich. Erst werden sie über den Linac in den DESY Ring injiziert, dann in den PETRA- und zum Schluss in den HERA-Ring geleitet. DESY und PETRA dienen hier als Vorbeschleuniger für HERA. Als Injektor für den Elektronenspeicherring dienen das Elektronen-Synchrotron des Desy und der umgebaute Elektronen-Positronen-Speicherring PETRA. Zunächst werden Elektronen auf 14 GeV gebracht. Protonen beschleunigt man zuerst in einem Linearbeschleuniger auf ca. 50 MeV, dann werden sie weiter geleitet im Synchrotron auf 7,5 GeV und im PETRA-Ring schließlich auf 40 GeV. Zum Schluss folgt der Einschuss in den HERA-Ring mit den supraleitenden Magneten. Der HERA-Speicherring gestattet nun die Untersuchung der Eigenschaften des Protons und der Elektronen mit bisher unerreichter Genauigkeit.

[Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002] , [Schwarz, W. 1995] [DESY, 2000c]

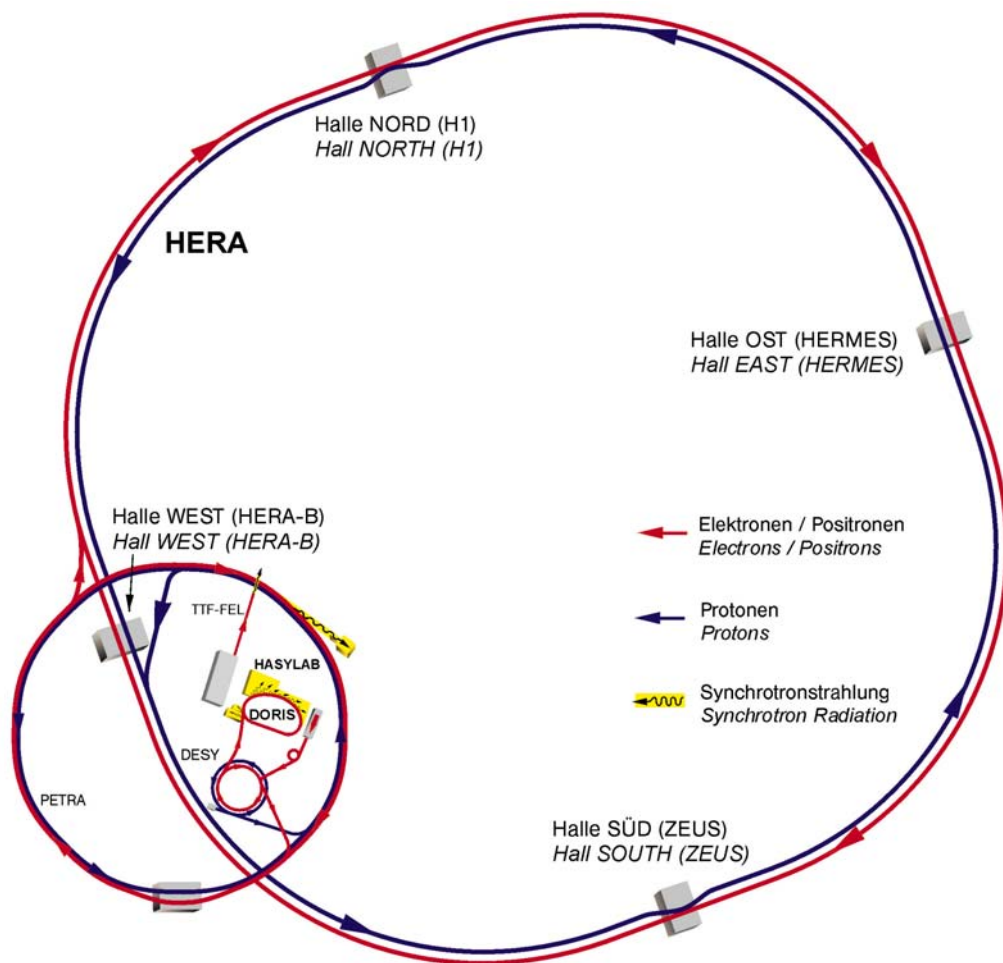


Abb.5 Das System der Vorbeschleuniger beim Desy

Abb.6 zeigt das Prinzip eines Ringbeschleunigers. Zur Fokussierung werden sogenannte Quadrupole und Sextupole benutzt, Dipole dienen zur Ablenkung, beschleunigt werden die Teilchen durch sogenannte Cavities.

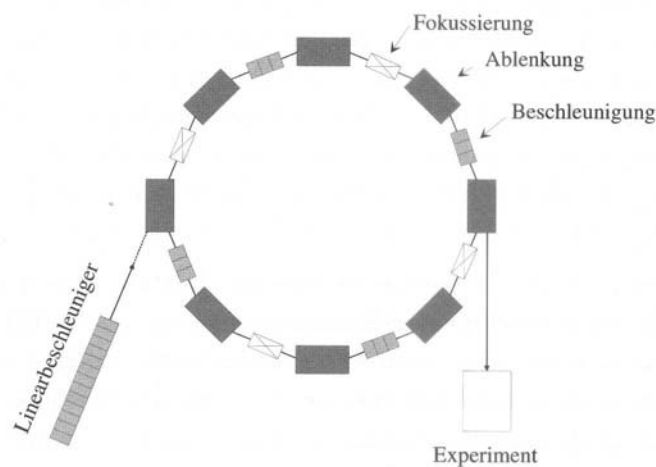


Abb.6 Schematische Darstellung eines Ringbeschleunigers [Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002, Seite 278].

3.5 Der Linearbeschleuniger

Das Prinzip des Linearbeschleunigers und der Aufbau sieht folgendermaßen aus: In metallischen zylindrischen Kammern verschiedener Längen, die für die zunehmende Geschwindigkeit der Teilchen notwendig sind, werden diese Protonen hineingeschossen und durch Umpolung der Kammern angezogen. Somit werden diese Teilchen, die sich auf einer Art Trägerwelle bewegen, immer stärker angezogen und somit beschleunigt. Zur Montage dieser Kammern treten messtechnische Aufgaben auf, die höchste Präzision verlangen. Hierbei achtet man auf die Längenmessung zur präzisen Abstandseinhaltung der Kammern. Eine Präzisionsfluchtung der Beschleuniger- bzw. Bezugsachsen muss nach Lage und Höhe höchst genau eingehalten und ausgerichtet werden.

[Hennecke, Müller, Werner, 1992]

3.6 Messtechnische Aufgaben zur Errichtung und Nutzung von Teilchenbeschleunigern

Hier müssen folgende messtechnische Verfahren bedacht und behandelt werden, da die Bedingungen an die Genauigkeit der Ausrichtung der Beschleunigeranlagen sehr hoch sind. Die exakte geometrische Zuordnung zu erfüllen, erfordert hier für den Bau des Tunnel und der Beschleunigungsanlagen sowie für die Justierung der Maschine im fertig gebauten Tunnel ein geodätisches Grundlagennetz von hoher Genauigkeit, mit einer zulässigen Fehlergrenze von unter ± 1 mm .

Es muss also viel Wert auf die Errichtung der baulichen Anlagen, die Montage der Ausrüstungen, die Justierung der Ausrüstungen und die Überwachung der Anlagen gelegt werden.

[Hennecke, Müller, Werner, 1992]

3.7 Die Ausrichtung des Linearbeschleunigers und messtechnische Aufgaben

Um einen Linearbeschleuniger auszurichten, müssen geodätische Aufgaben erfüllt werden. Diese Aufgaben bestehen aus der Verwirklichung einer Referenzgeraden zur Errichtung und Montage einer Präzisionsfluchtung des Beschleunigers nach Lage und Höhe und allgemeine geodätische Aufgaben zur Justierung und Kontrolle. Forderungen wie weitgehend automatisierte Messabläufe sowie Justierung und Überwachung sollten gewährleistet sein.

Optische Messsysteme mit Theodoliten oder Alignementfernrohr sind für diese Entfernung und die geforderten Genauigkeiten nicht geeignet. Bei kürzeren Fluchtungen hat sich die Fluchtung mit einem dünnen Messdraht bewährt. Bei Längen von z.B. 3.000 m wird allerdings noch eine laseroptische Methode nach dem Prinzip von Huygens-Fresnel gewählt. Das TESLA-Projekt, welches einen Linearbeschleuniger plant, hinter dem sich eine Länge von 33 km verbirgt, fordert über 600 Meter eine Genauigkeit von 0,2 mm in der Höhe und in der Lage 0,5

mm. Hier müssen später bestimmte Module des Beschleunigers auf eine Gerade von höchster Präzision ausgerichtet werden.

[Hennecke, Müller, Werner, 1992]

[DESY, 2002d]

4. Der Drahtfinder (Wirefinder)

4.1 Kalibrierung und Feststellung der Drahtposition

Der Drahtfinder besteht aus einer Fozelle, auf die ein Laser durch einen Schlitz scheint. Wenn die Fozelle den Draht passiert, wirft der Draht einen Schatten und das Signal der Diode verringert sich. Das Signal geht von einigen Volt bis nahezu null Volt, wenn die Fozelle von der Drahtbreite, die mit dem Fozellenspalt korrespondiert, überdeckt wird. Dieses gibt dem Drahtfinder eine hohe Sensibilität zur Oberflächenbegrenzung des Drahtes. Der Laser, der Fozellenschlitz sowie die Diode sind auf einer Bühne mit Mikrometerantrieb montiert. Die Bühne ist an einem Rahmen mit Referenzbezugskugeln installiert. Die Drahtposition kann über die Stellung der Referenzbezugskugeln festgestellt werden. Wichtig ist, dass der Draht nicht berührt wird.



Abb.7 Zu untersuchender Drahtfinder mit Unterbau, welcher zur Kalibrierung dient.

Der Laser in dem Versuchsaufbau ist ein Melles Griot Dioden Laser im sichtbarem Licht (650 nm) und einem 4 mm Durchmesser in einer kompakten Bauform. Der Schlitz ist ein Melles Griot 25 μm Präzisionsschlitz. Der Halbleiterdetector (Photodiode) und der zugehörige Verstärker sind ebenfalls von Melles Griot.

Um den Draht zu lokalisieren wird eine Referenzstromstärke an der Fotodiode abgenommen. Dieser Strom wird in dem Signalverstärker umgewandelt, an einem Ausgang in Form von Spannung ausgegeben und über ein Multimeter angezeigt. Über die Micrometerschraube wird der Laserschlitz und die Fotodiode auf die erste Seite des Drahtes ausgerichtet, bis die Referenzspannung erreicht wird. Die Position des Drahtes wird so festgehalten.

Die Mikrometerablesungen werden über 2 Spannungszustände auf jeder Seite des Drahtes festgelegt. Der Durchschnitt der Mikrometerablesung bringt den Mittelpunkt hervor.

Die Verstärkung ist so ausgelegt, das ungefähr 5 Volt am Ausgang anliegen, wenn sich kein Draht vor dem Schlitz befindet. Das Signal geht von einigen Volt bis nahezu null Volt, wenn die Diode die Distanz, die mit der Schlitzbreite korrespondiert, zurücklegt und somit der Draht mit seinem Schatten den Schlitz verdeckt. Die Festlegung eines Spannungszustandes ergibt eine Sensibilität von

ungefähr 60 mV pro 1,3 µm Abweichung. Diese 60 mV sind unter dem Rauschen, welches uns die Genauigkeit im µm-Bereich gibt.

Die obere Micrometerschraube dient nur der Verschiebung des Lasers mit der Diode. Die relative Verschiebung wird über einen Messtaster von Mitutoyo aufgezeichnet. Dieser misst im µm Bereich.

Nun wird der Detektor zur anderen Seite des Drahtes geführt bis am Ausgang des Verstärkers die gleiche Referenzspannung anzeigt und die Position aufgenommen (festgestellt) werden kann. Der Durchschnittswert der beiden Mikrometerablesungen gibt uns Auskunft über den Mittelpunkt des Drahtes, unabhängig vom Durchmesser. Die Position stellt die relative Mikrometer Nullposition fest. Eine Kalibrierung wird benötigt, um die Mikrometer Nullposition in Relation zu den Referenzbezugskugeln zu finden.

Eine spezielle Befestigung wird konstruiert, um den Drahtfinder zu kalibrieren. Die Befestigung hat einen gespannten Draht, welcher dem Drahtfinder erlaubt, beide Standardkonfigurationen des Drahtes zu lokalisieren sowie eine umgekehrte Konfiguration, indem der Drahtfinder 200 Gon zu seiner Stehachse gedreht wird. Diese beiden Messungen erlauben, die Mikrometer Nullposition in Relation zu den Referenzbezugskugeln festzustellen.

In der Standardkonfiguration wird die Drahtposition festgestellt durch:

$$X_w = X_o + X_{mic\ 1} \quad (1)$$

- X_w = die Position vom Draht in Relation zu der Referenzbezugskugel. (ball R).
- X_o = die Nullabweichung zu der Referenzbezugskugel ist die Position vom Draht, welche durch die Mikrometernullstellung gefunden wird.

- X_0 = was wir versuchen festzustellen.
- $X_{mic 1}$ = die Position vom Draht in Relation zur Mikrometer Nullposition. $X_{mic 1}$ wird gefunden durch die durchschnittliche Mikrometerablesung der rechten und linken Seite des Drahtes.

Das Bild in Abb. 8 zeigt die schematische Darstellung zur Feststellung der Standardkonfiguration.

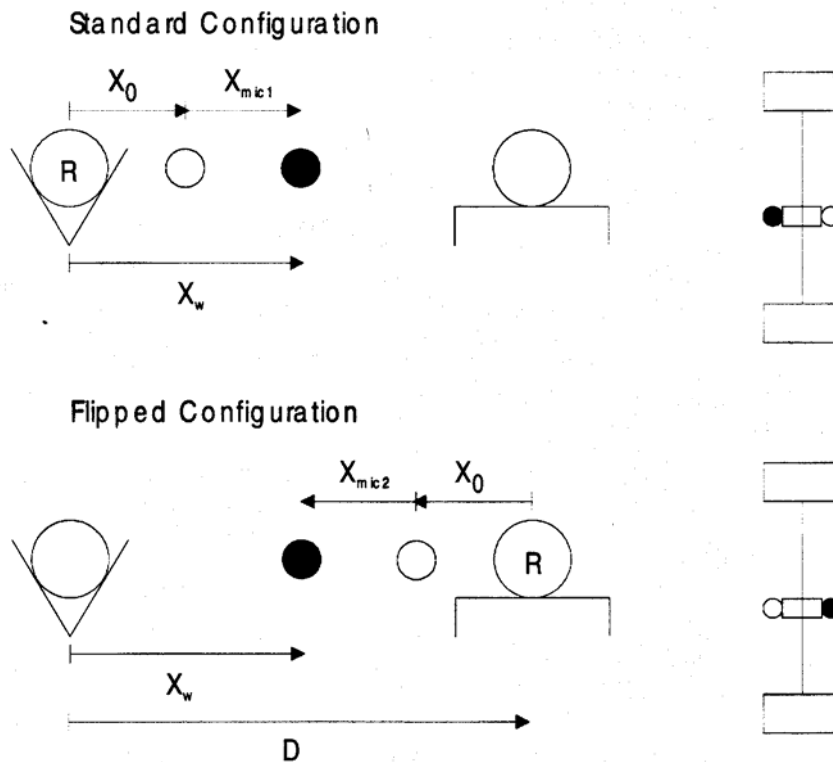


Abb.8 Schematische Darstellung zur Feststellung der Standardkonfiguration.
 [Wolf, Ruland, Dix, Arnett]

Die umgedrehte Drahtfinderposition wird gefunden mit:

$$X_w = D - X_o - X_{mic2} \quad (2)$$

D ist die Distanz zwischen den tooling-balls. X_{mic2} ist die Position des Drahtes, die vom Mikrometer vorgegeben wird. X_w stellt in (1) und (2) das gleiche da. Wir können (1) und (2) für X_o lösen.

$$X_o = D/2 - (X_{mic1} + X_{mic2})/2 \quad (3)$$

Die Nullabweichung, die wir mit dieser Prozedur bekommen, ist immer wiederholbar. In einem Test wird die Nullabweichung fünfmal bestätigt. Die relative Messabweichung dieser Messung variiert um $1,3 \mu\text{m}$. In Betrieb wird die Standardkonfiguration eingesetzt und die Nullabweichung wird zur Mikrometerablesung addiert, um die Drahtposition relativ zu den Referenzbezugskugeln zu finden.

[Ruland, R. 1995] und [Wolf, Ruland, Dix, Arnett]

Die Drahtpositionsmessungen müssen mit der Referenzbezugskugel in Verbindung gebracht werden. Um den Drahtfinder festzuhalten, wird er während der Messungen auf einer Kalibrierungsvorrichtung zur Fixierung mit der großen Referenzbezugskugel sowie mit zwei kleinen Kugeln kinematisch montiert. Die mechanische Befestigung wird verwirklicht durch eine Kombination aus einem Standardkonus, einer V-Rille und einer Plattform (siehe Abb.9). Die große Referenzbezugskugel sitzt in einem geformten Konus. Eine erste kleine Kugel sitzt in einer V-Rille, um eine verbleibende Rotation zu vermeiden, welche den Drahtfinder vor dem Verrutschen in den Achsen stoppt. Die zweite kleine Bezugskugel, die im 90° Grad Winkel zur ersten steht, verhindert das Kippen des Drahtfinders. Um eine Kalibrierung zu vollenden, muss die Distanz zu der großen Referenzbezugskugel, welche in dem geformten Konus sitzt, gemessen werden. Hierfür wird die Drahtposition in Bezug zu der Referenzbezugskugel genutzt.

Der Drahtfinder besteht aus einer Photodiode und einem Laser, beide sind auf einem Schlitten befestigt, welcher auf einer Platte installiert ist. An der Platte sind Bezugsreferenzkugeln installiert, dieses zeigt Abb.9.

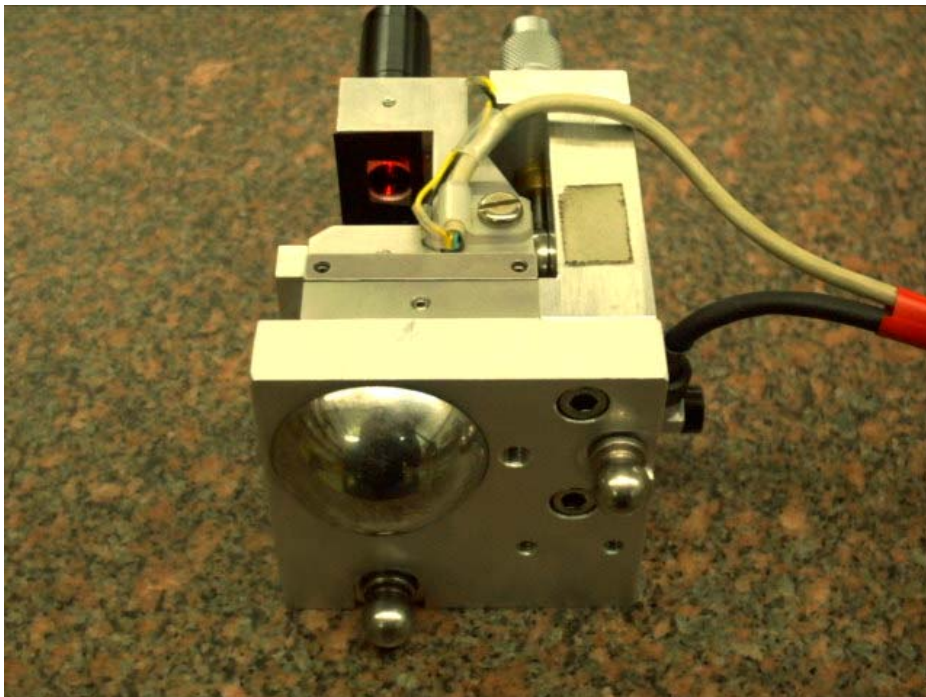


Abb.9 Drahtfinder installiert auf der Platte mit seinen Referenzbezugskugeln

Eine Mikrometervorrichtung wird gebraucht, um die Laserstrahlposition anzuzeigen. Die Mikrometereinstellungen werden notiert und geben die relative Abweichung der Laserstrahlposition zur Null-Position des Mikrometers an. Die relativen Mikrometerabweichungen zu der Referenzbezugskugel werden benötigt, um die relative Position des Laserstrahls zu der Referenzbezugskugel herzustellen.

[Ruland, R., 1999] und [Wolf, Ruland, Dix, Arnett, 2002]

Zusammenfassung:

Das Zentrum des Drahtes ist gegeben durch die Vermittlung der beiden Drahtseiten. Eine Kalibrierung erlaubt den Mikrometerablesungen, eine Auskunft über die Drahtposition in Relation zu der Referenzbezugskugel zu geben.

Der Drahtfinder besteht aus einer Photodiode, einem Schlitz und einem Laser. Die Diode steht zentrisch unter dem Laserstrahl. Der Drahtfinder arbeitet im μm Bereich .

Zur genaueren Untersuchung werden nun noch andere Tests mit dem Drahtfinder durchgeführt. Folgende Punkte werden für eine weitere Geräteuntersuchung festgelegt.

- Beurteilung und Einlaufverhalten der Komponenten wie:
Laser, Empfangsdiode, Mess- und Anzeigegeräte
- Kontrolle der Skalierung des Mitutoyo-Messtasters mittels
HP-Laser-Interferometer
- Untersuchung von Drahtstärken
- Verdrehung des Lasers zu Draht und Diode
- Verdrehung der Diode zu Draht und Laser
- Untersuchung sämtlicher Justierbedingungen des Messgerätes wie:
Ausrichtung des optischen Schlitzes, Ausrichtung der Laserlinie,
Verschiebemik, Anbringung des Mitutoyo-Messtasters, Anordnung der

Komponenten zueinander.

5. Untersuchung des Systems

5.1 Untersuchung und Überprüfung des Einlaufverhaltens der Komponenten: Laser und Empfangsdiode, Mess- und Anzeigegeräte

5.1.1 Untersuchung bzw. Überprüfung des Einlaufverhaltens des Lasers in Zusammenhang mit der Diode

Die beiden Bauteile Laser und Fotodiode werden zusammen überprüft, da nach gründlichen Recherchen, technische Angaben über die einzelnen Teile gefunden wurden. Laut Angabe des Herstellers sind diese beiden Komponenten mehr als ausreichend für die Messzwecke des Drahtfinders geeignet. Falls dies die überprüfende Messung nicht bestätigen sollte, müssten die Komponenten noch einmal einzeln betrachtet werden.

5.1.2 Angaben zum Laser

Es handelt sich in unserem Fall um einen Dioden Laser mit einer Wellenlänge von 650 nm, welcher mit einer 5 Volt Spannung versorgt wird. Der erste kontinuierlich arbeitende Laser (Helium Neon Laser) wurde von Juvon, Bennet jr. und Herriot gebaut. Seine Röhre enthält 15 % Helium und 85 % Neon. Ein Ende der Röhre ist als ebener Spiegel ausgebildet und das andere als teilweise durchlässiger konkaver Hohlspiegel. Ein Bild aus dem Physikbuch Tipler P. zeigt das schematische Prinzip eines Neonlasers.

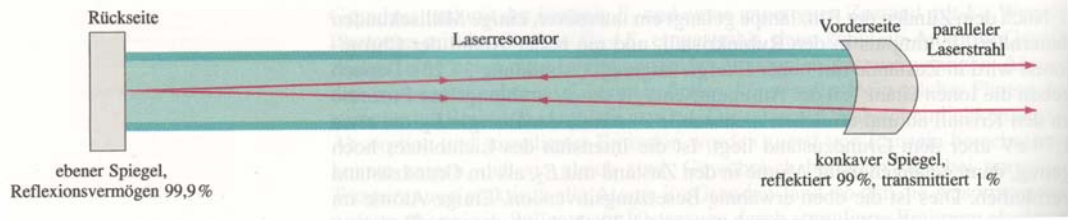


Abb.10 Schematisches Prinzip eines Neonlasers [Tipler, P.Seite 1296]

Der Laser zeichnet sich dadurch aus, dass der austretende Lichtstrahl einen geringen Durchmesser hat und praktisch parallel sowie kohärent und sehr intensiv ist. Wegen dieser Eigenschaften ist der Laser zu einem universell einsetzbaren Instrument der Forschung und Technik geworden. Die Vermessungstechnik macht sich diese Eigenschaften des Lasers inzwischen auch zu Nutze. Zum Beispiel kann mit seiner Hilfe eine Entfernung über die Laufzeit bestimmt werden.

In unserem Fall handelt es sich um einen Halbleiter- oder Diodenlaser. Dieser Typ von Laser kann sehr klein gebaut werden und Strahlungsleistungen bis zu 200 mW abgeben. Häufig bestehen sie aus Halbleitern mit p-n-Übergängen. Legt man eine Spannung an, kombinieren die freien Elektronen des Dotierungselements mit den "Löchern" im Kristallgitter und es wird Licht emittiert. Der benutzte Laser hat eine Wellenlänge von 650 nm (sichtbares Infrarot), eine Stabilität von 0,1 % PC und verhält sich linear bei einer Temperatur von + 10° C - + 40° C. Weitere Angaben zum Laser sind in Abb. 11 und Abb. 12 zusammengestellt .



**SPECIFICATIONS:
LABORATORY ALIGNMENT DIODE LASER ASSEMBLIES**

Optical

Wavelength: 650 nm, nominal
Power Stability: 0.1%/°C
Polarization: 100:1 nominal, minor axis
Centration: ± 0.25 mm
Boresight Error: < 3 mrad
Warmup Time: 5 minutes to rated stability
Power Requirements: 120 or 220 Vac (with /A option)
Operating Temperature: $+10^{\circ}\text{C}$ to $+40^{\circ}\text{C}$

Abb.11 Laser des Drahtfinders mit spezifischen Angaben des Herstellers [Melles Griot, 1999, Katalog Seite 46.4].

Dieser Laser ist ideal für die Vermessung (z.B. Interferometrie) auf Grund seiner stabilen Frequenz, einer kurzen Einlaufzeit und das Einhalten dieser genannten Punkte über mehrere Stunden. Abb.11 zeigt das Verhalten des Melles Griot Laser in Abhängigkeit von der Temperatur.

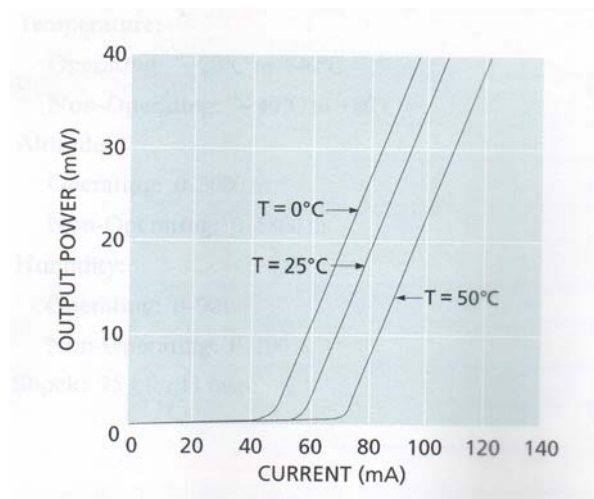


Abb.12 Verhalten des Melles Griot Laser in Abhängigkeit von der Temperatur.
[Melles Griot, 1999, Katalog Seite 46.3]

Laut Angaben über diese Art von Laser ist eine Einlaufzeit von allerhöchstens 10 Minuten nötig. Dieses gilt es nun zu kontrollieren und zu überprüfen, ob diese stabil bleibt, damit eine Aussage über die Dauerbelastung des Lasers getroffen werden kann.

Der Laser, die Photodiode und der Signalverstärker sind von der Firma Melles Griot. Diese genannten Komponenten sind vom Hersteller aufeinander abgestimmt, so dass sie höchst genau als eine Einheit miteinander fungieren. [Melles Griot 1999], [Tipler, P.A., 1994] [Leute, 1995]

5.1.3 Die Fotodiode

Wie schon erwähnt, ist die Gegenkomponente des Lasers eine Photodiode, die an ein Verstärkerbord gekoppelt wird und die Intensität des Lasers aufnimmt. Sie wandelt die Lichtintensität des Strahls in Stromstärke um. Der Signalverstärker nimmt ihn auf. Die Verstärkung des Stroms wird nun in Form von Spannung ausgedrückt. Diese wird durch eine zweite Buchse am Verstärker vom Multimeter aufgenommen und angezeigt.

Die Fotodiode ist eine Halbleiterdiode. Bei einfallendem Licht entstehen freie Löcher und Elektronen. Die Abb.13 zeigt das Funktionsprinzip der Diode. Der Übergang ist in Durchlassrichtung geschaltet. Das einfallende Licht fördert die Diffusion der Löcher von der p- zur n- Seite (und der Elektronen in der Gegenrichtung) und führt so zu einem Strom.

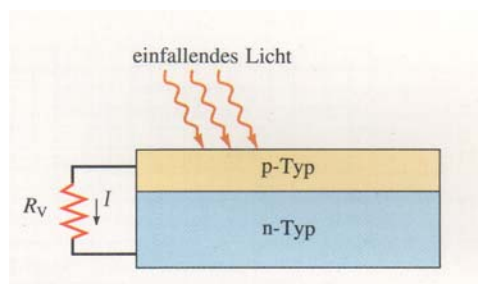


Abb.13 Funktionsprinzip der Diode. [Tipler, P.]

Die Fotodiode wird in Sperrrichtung betrieben. Die freien Löcher und Elektronen erhöhen den Sperrstrom proportional zur Lichtintensität. Fotodioden eignen sich hervorragend zur Lichtmessung mit Infrarotstrahlung. Zu den wichtigsten Kenngrößen für Dioden, die zur optischen Leistungsmessung benutzt werden, gehören:

Die Empfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge, die leistungsabhängige Linie sowie die Bandbreite und das Eigenrauschen je nach Anwendung. Vor allem im μ Bereich ergeben sich Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Diode. Das Eigenrauschen und der Dunkelstrom bestimmen die Messgenauigkeit. Der Kurzschlussbetrieb einer Fotodiode mit einem Transimpedanzverstärker ermöglicht genaue Leistungsmessungen über mehr als 6 Dekaden mit weniger als 1 % Linearabweichung. Diese Fotodioden brauchen keine Einlaufzeit. Sie reagieren auf Grund ihrer Bauweise sofort, das heißt sie reagieren, sobald sie dem für sie lichtempfindlichen Bereich ausgesetzt werden.

Eine weitere Studie über die Abhängigkeit zum Verhalten der Temperatur wird hier auch in einem Diagramm in Abb.14 dargestellt.

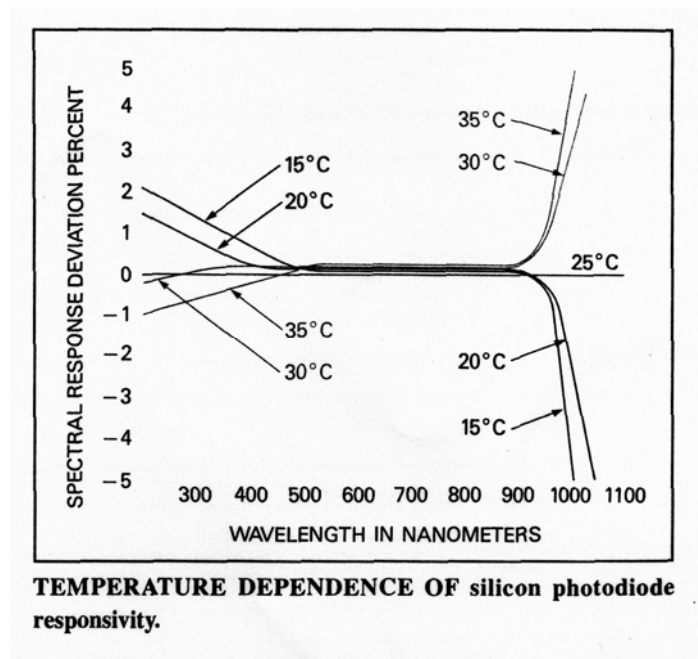


Abb.14 Temperaturverhalten der Diode [Melles Griot, 1999]

Dieses Diagramm zeigt das Verhalten der Fozelle im Bereich der Wellenlänge von 500 bis 900 nm von 15 bis 35° C , welches sich immer in einem konstanten Messbereich bewegt. Man kann dort eine eindeutige Linearität erkennen. Dies bedeutet, dass die Komponenten (der Laser und die Photodiode) sehr gut aufeinander abgestimmt sind.

Die Eigenschaften dieser Photodiode sind:

- ein geringer Dunkelstrom
- geringe Strombelastung gegenüber Widerstand
- keine direkte Ansteuerung von Relais, Verstärker nötig
- geringe Verlustleistung 20 bis 100 m Watt
- erkennbare Wechsellvorgänge bis 100 KHz
- große spektrale Empfindlichkeit im Infra-Rot-Bereich
- aktives Bauelement
- Temperaturabhängigkeit sehr gering
- kleine Bauweise (> 1 mm Durchmesser), Mikroelektronik
- als Photoelement verwendbar mit zunehmender Beleuchtung, zunehmende Spannung.

[Melles Griot, 1999], [Tipler, P.A. 1994]

[e-online, 2002],[Photowiderstand, 2002]

5.1.4 Messaufbau und Durchführung zur Überprüfung des Lasers und der Silicon-Photodiode

Der Laser wird mit einem 5 Volt Netzteil betrieben. Die Fotodiode bzw. dessen Strom fließt zu einem Signalverstärker, welches den Ausgangsstrom in Volt umwandelt und über ein Multimeter anzeigt. Die Spannung wird über ein Multimeter (Multimeter Prema 5000) mit Scanner abgenommen und zeitlich über ein Messprogramm von Texas Instruments (Labview) aufgezeichnet. Das Multimeter verfügt über eine IEEE-Schnittstelle. Die Ergebnisse werden interpretiert. Der Aufbau ist in Abb. 15 ersichtbar.

Bei allen Messungen wird beachtet das System von äußeren Einflüssen abzuschirmen, das heißt äußere Lichteinwirkung, Luftbewegungen, und Temperaturschwankungen auszuschließen.

Hierzu ist eine Abschirmung des Drahtfinder nötig. Zusätzlich wird der Raum verdunkelt und die Klimaanlage abgestellt.

Der Laser wird im ersten Versuch kalt angestellt, alle anderen Komponenten laufen vorher 30 Minuten warm. Der Strom der nun über die Diode abgegeben wird ist sehr gering, deswegen wird er über einen Signalverstärker aufgenommen und umgewandelt als Spannung ausgegeben, welche das Multimeter aufnimmt und ausgibt. Die Daten werden über mehrere Stunde aufgezeichnet.

Die zweite Messreihe wird auch mehrere Stunden aufgezeichnet. Allerdings ist hier der Laser sowie alle anderen Komponenten warmgelaufen, die Diode wird im Kaltzustand eingeschaltet. Der Laser wird vorher ausgebaut, damit sein Lichtstrahl nicht auf die Diode trifft.

Der dritte Versuch ist auch ein Langzeitversuch, der über mehrere Stunden läuft. Hier wird Laser und Diode kalt angestellt und alle anderen Komponenten laufen vorher warm. Die Integrationszeit des Multimeters beträgt hier 1/100 sec.

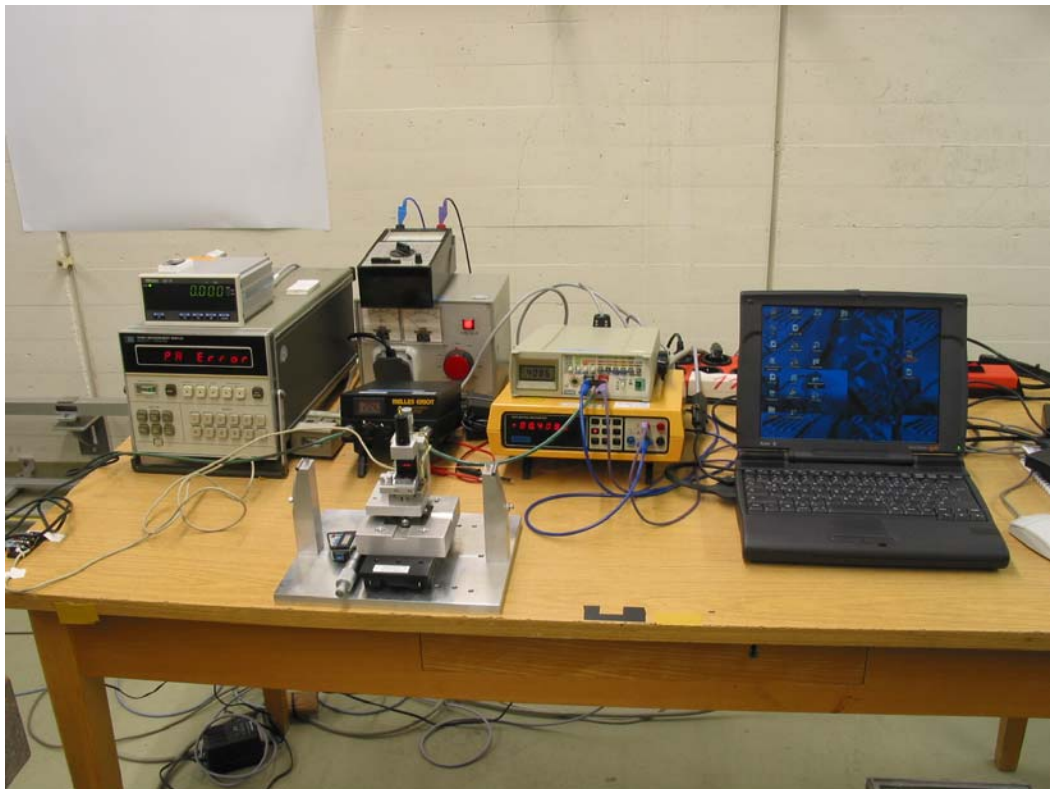


Abb.15 Messaufbau ohne abgeschirmten Drahtfinder.

5.1.5 Ergebnisse des Einlaufverhaltens von Laser und Diode

Die Ergebnisse des Einlaufverhaltens von Laser und Diode bringen folgende Schlussfolgerungen hervor. Auf den Abbildungen 16 - 17 ist keine eindeutige Einlaufzeit zu erkennen. Die Diagramme zeigen die Spannungskurve des Einlaufverhaltens der Diode im Kaltzustand. Alle anderen Komponenten, die mit der Messung in Zusammenhang stehen, sind eine Stunde vorher in Betrieb genommen worden.

Die Diode schwankt in einem Bereich zwischen $-0,089$ Volt und $-0,092$ Volt. Diese Schwankungen sind auf die Bauweise (Materialbeschaffenheit, spektrale Empfindlichkeit) sowie das Eigenrauschen der Diode zurückzuführen. Auch die Messgenauigkeit des Multimeters fließt hier wahrscheinlich ein. Wichtig ist jedoch, dass die Diode sofort reagiert und keine Einlaufzeit braucht. Es sollte trotzdem eine Warmlaufzeit von 10 Minuten eingehalten werden. Die Abweichungen von $\pm 3 \mu\text{V}$ sind für die weiteren Messungen nicht ausschlaggebend. Andere Ergebnisse liefern uns Abbildung 18 und 19, welche den 2. Versuch mit dem Laser im Kaltzustand beschreiben. Das Diagramm zeigt die Spannungskurve des Einlaufverhaltens des Lasers im Kaltzustand. Alle anderen Komponenten, die in Zusammenhang mit der Messung stehen, sind vorher eine Stunde in Betrieb genommen worden.

In Abb. 20, die das Zusammenwirken beider Bauteile im Kaltzustand beschreibt, verändert sich nach den ersten 10 Minuten auch nichts mehr. Alle anderen Komponenten, die in Zusammenhang mit der Messung stehen, sind vorher eine Stunde in Betrieb genommen worden.

Der Laser scheint allerdings eine 10 minütige Warmlaufzeit zu benötigen, da die Werte in Abb. 19 anfangs stärker schwankten. Die Spannungsschwankungen überschreiten die der Diode allerdings nicht. Um eine 100 prozentige Stabilität des Lasers zu gewährleisten, empfiehlt sich auch hier eine Einlaufzeit von 10 Minuten einzuhalten. Anders sieht es aus, wenn die Komponenten des Drahtfinders unter normalen Umständen benutzt werden. Das heißt Temperaturschwankungen, Luftbewegungen und Refraktion im Raum sowie Lichteinwirkung von außen lassen die Spannung hier um ca. 60 mVolt schwanken.

Um hier eine Aussage treffen zu können, wie sich die Spannung auf den Weg auswirkt, bzw. wie groß die Spannungsschwankungen sind und inwiefern sie in

Millimetern ausgedrückt werden können, wird eine Spannungskurve erstellt (siehe Abb. 21). Diese Kurve wurde unter Einstellung der Spannung aufgezeichnet, welche um ± 60 mVolt schwankt. Das rote Dreieck zeigt die Wegdifferenzen in Bezug zu den Spannungsunterschieden. Bei dieser Kurve wird die Spannung eingestellt und der dazu gehörige Messwert notiert. Hier muss allerdings die Integrationszeit von 1/100 Sekunden auf 1 Sekunde heraufgesetzt werden, damit die Spannungswerte von Hand eingestellt werden können. Die Werte schwanken auch hier im Bereich von 60 mV und weniger. Sie sind jedoch innerhalb dieses Bereiches gut einstellbar. Da auf beiden Seiten der Kurve die gleichen Spannungswerte angefahren werden, können hier die Differenzen der Abstände zum Nullpunkt errechnet werden. Hierbei ergibt sich eine Standardabweichung (bei einer Genauigkeitseinstellung der Spannung von < 60 mV) von ca. $1,3 \mu\text{m}$. Nun kann über diese Spannungswerte und die entstehenden Differenzen auch der Mittelpunkt des Drahtes errechnet werden, indem man zwei paar Werte herausgreift und deren Streckendifferenzen mittelt.

Einlaufverhalten der Diode

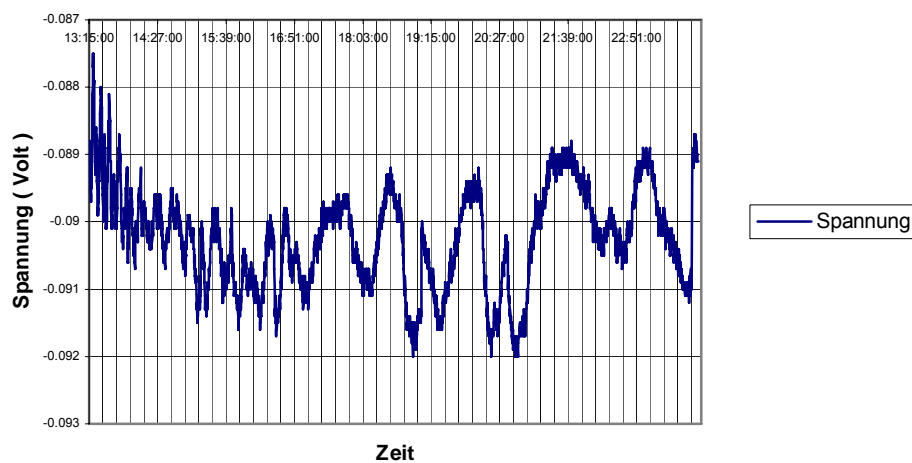


Abb.16 Spannungskurve des Einlaufverhaltens der Diode im Kaltzustand

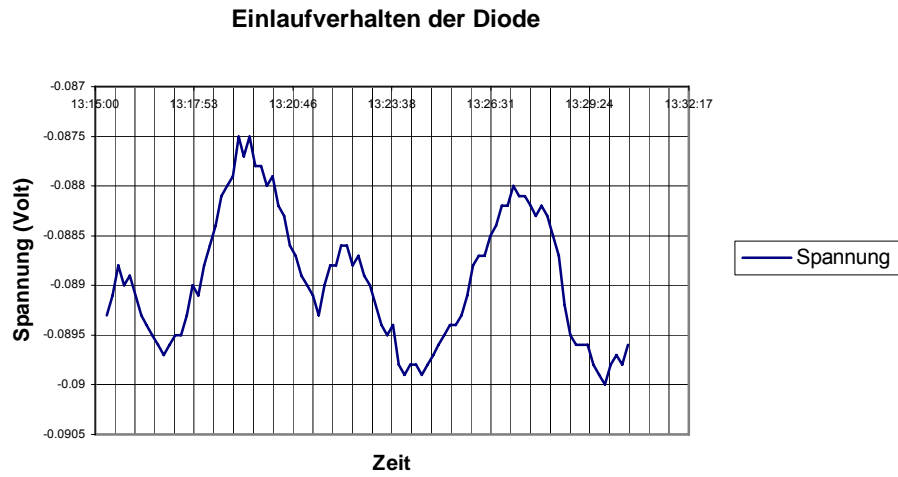


Abb.17 Ausschnitt des Einlaufverhaltens der Diode im Kaltzustand über ca. 15 Minuten aus Abb. 15

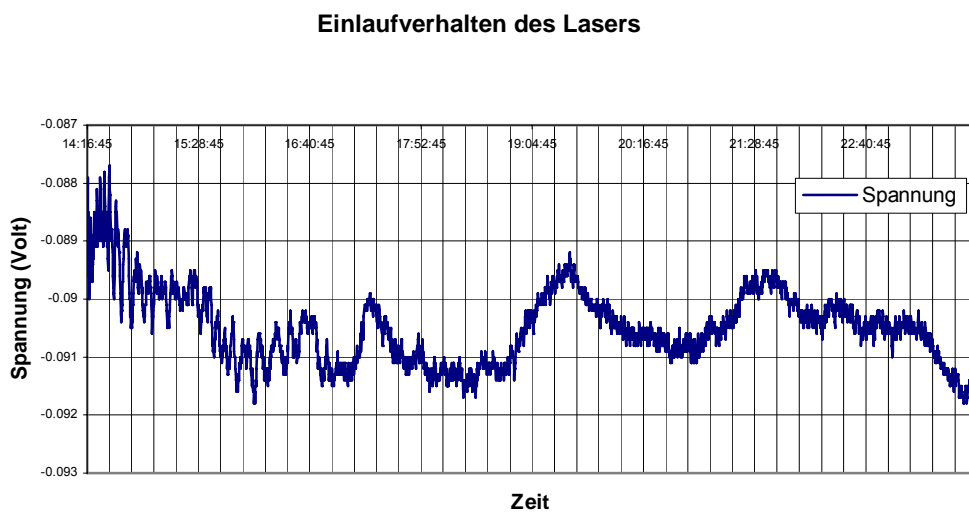


Abb.18 Spannungskurve des Einlaufverhaltens des Lasers im Kaltzustand.

Einlaufverhalten Laser

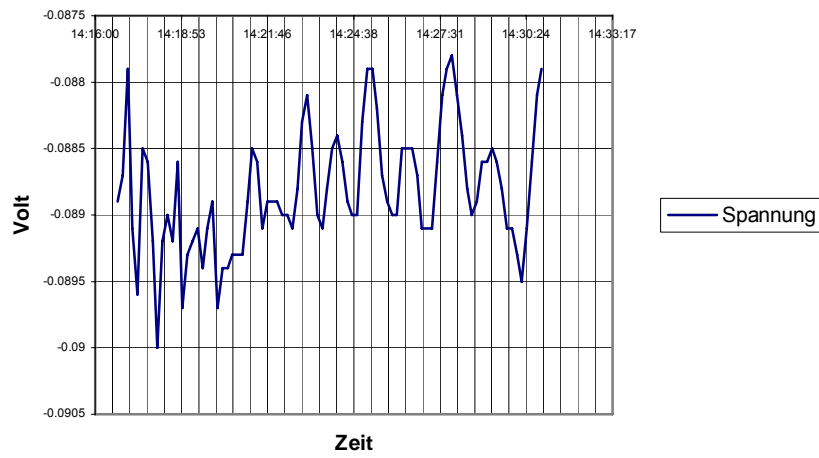


Abb.19 Ausschnitt des Einlaufverhaltens des Lasers im Kaltzustand über ca. 15 Minuten aus Abb.17.

Einlaufverhalten Laser - Diode

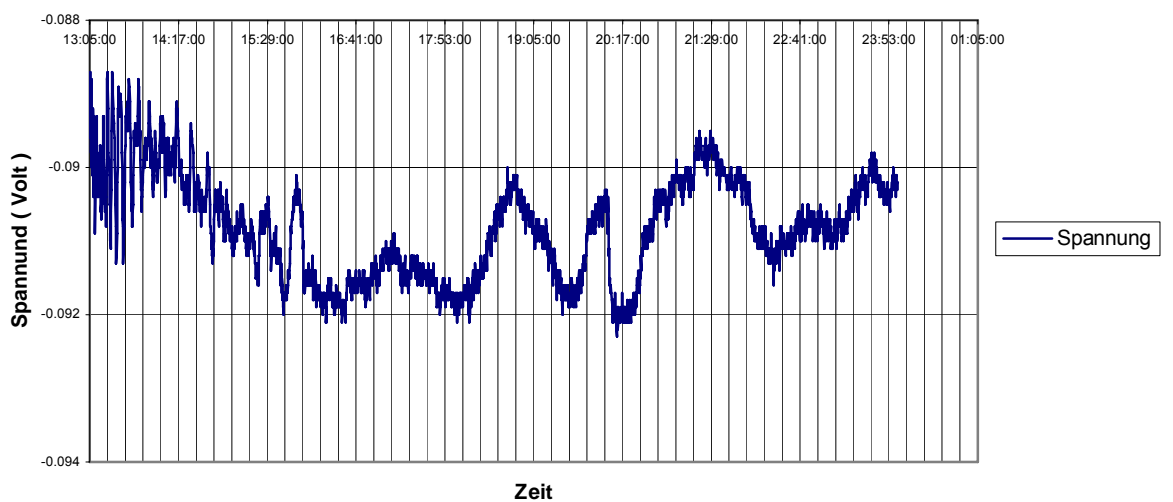


Abb.20 Spannungskurve von Laser und Diode im Kaltzustand eingeschaltet.

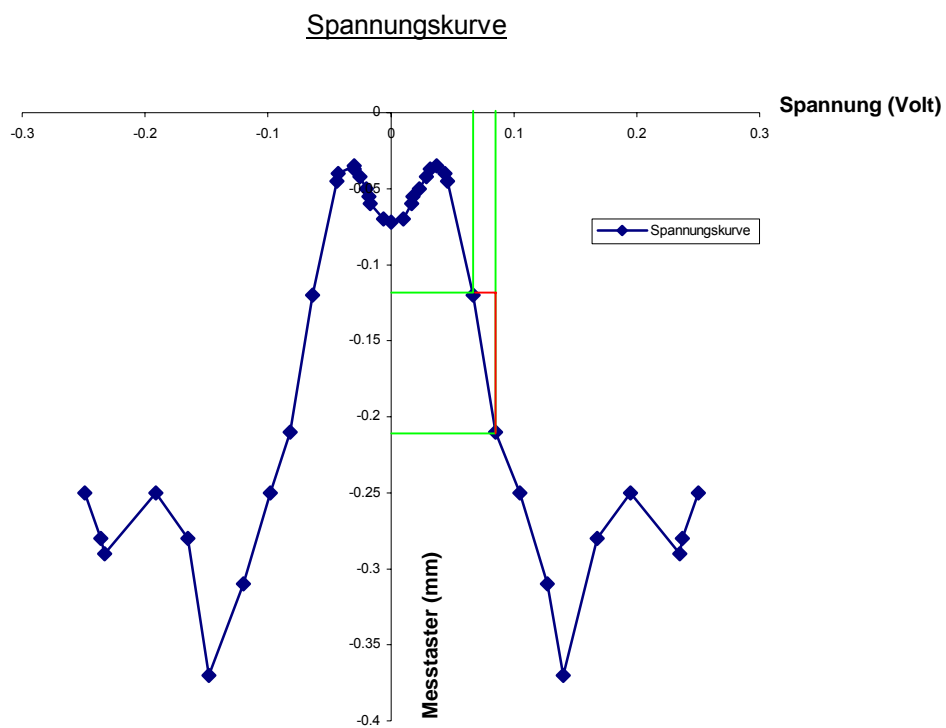


Abb. 21 Spannungskurve des Drahtfinders mit 0,1 mm starkem Draht unter Einstellung der Spannung aufgezeichnet.

5.2 Einlaufverhalten des Multimeters

Um das Einlaufverhalten bzw. die Messgenauigkeit des Multimeters zu kontrollieren, wird eine Kalibrierungsquelle der Firma Bruster Gemsbach Digistant Typ 6705 von 3 mV an das Multiprema angeschlossen. Das Multimeter wird im Kaltzustand angestellt und die Spannungsquelle läuft 20 Minuten warm, um ihre Spannung konstant zu halten. Die Messung wird 45 Minuten beobachtet.

5.2.1 Ergebnisse des Einlaufverhaltens des Multimeters

Wie man deutlich in Abbildung 22 erkennen kann, schwankt das Multimeter nur um 0,1 mV und hält von Anfang an seinen Messbereich ein. Abb.22 zeigt das Einlaufverhalten des Multimeters, dargestellt durch die blaue Linie und die Konstantspannung des Kalibriergerätes, hier durch die rote Linie dargestellt, über den Zeitraum von einer Stunde.

Hier ist noch nicht einmal eine Einlaufzeit zu bemerken. Trotzdem sollte auch laut Hersteller eine Warmlaufzeit von 20 Minuten eingehalten werden .

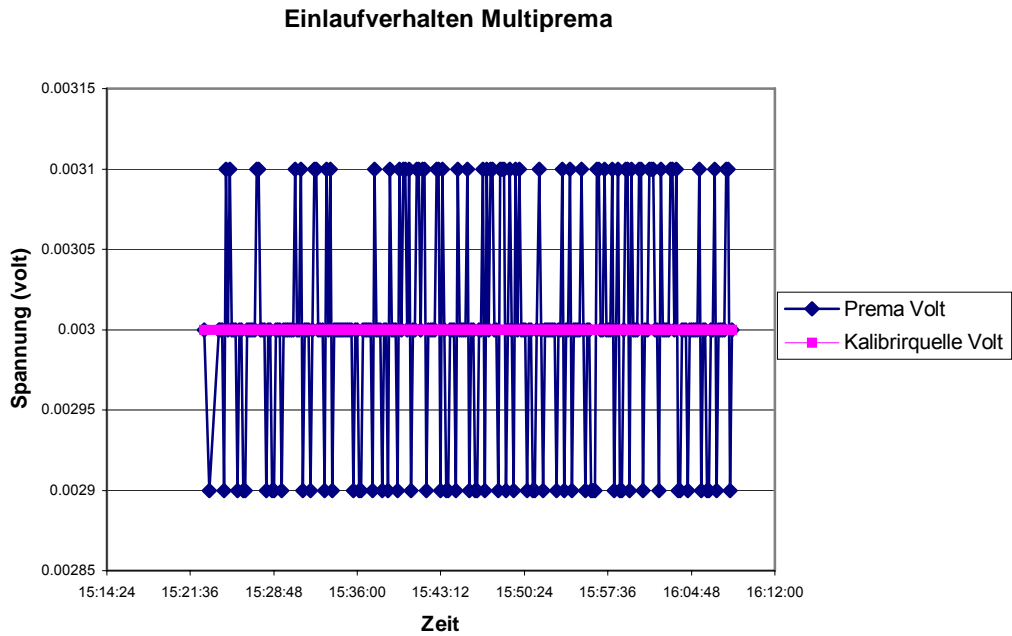


Abb.22 Einlaufverhalten des Multimeters.

5.3 Einlaufverhalten des Signalverstärkers

Um das Einlaufverhalten des Signalverstärkers zu überprüfen, wird die Diode von diesem abgeklemmt und der Signalverstärker an eine Konstantstromquelle von 0.01mA angeschlossen. Die Konstantstromquelle läuft 20 Minuten warm, der Signalverstärker wird im Kaltzustand angestellt. Die Messung erfolgt indirekt, da das Verhalten über die umgewandelte Spannung interpretiert wird, die vom Multimeter gemessen und über einen Laptop aufgezeichnet wird. Die Messung erfolgt über ca. eine Stunde. Die Abb.23 zeigt den benutzten Signalverstärker von Melles Griot.



Abb.23 Signalverstärker von Melles Griot, entnommen aus dem Katalog
Melles Griot 1999

5.3.1 Ergebnisse des Einlaufverhaltens des Signalverstärkers

Wie man aus den Daten erkennen kann, braucht der Signalverstärker ca. 30 Minuten um sich aufzuwärmen und pendelt sich dann relativ konstant ein. Geringe Schwankungen sind auch hier nur im μVolt Bereich zu erkennen, wie aus der Abb.24 entnommen werden kann.

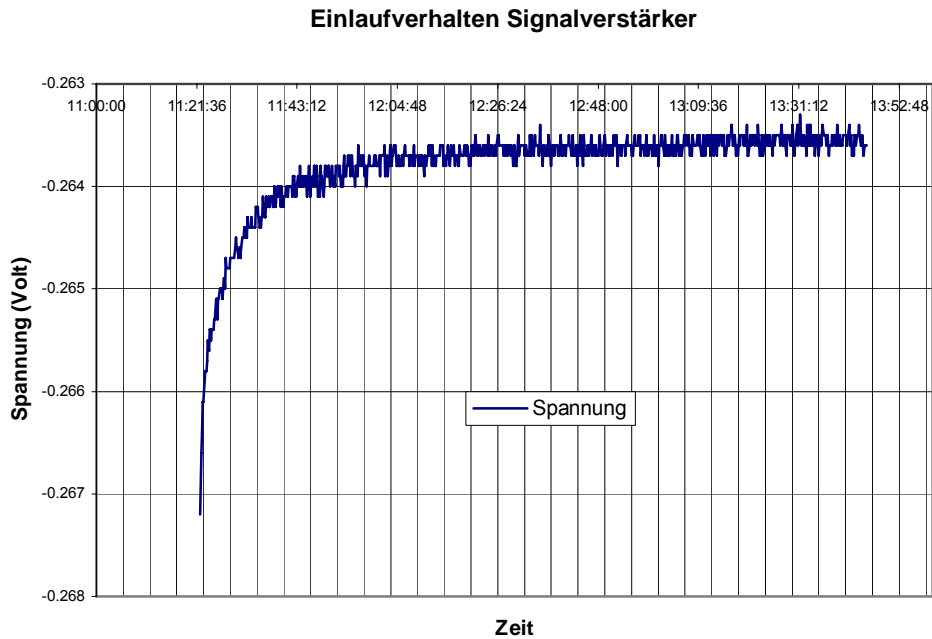


Abb. 24 Einlaufverhalten des Signalverstärkers

5.4 Messaufbau zur Überprüfung der Skalierung des Messtasters mit Hilfe eines Interferometers

Zur Überprüfung des Messtasters wird dieser am Wirefinder ausgebaut, da er hier seitlich am Verschiebeschlitten angebracht ist und so kein Prisma davor befestigt werden kann, da sonst das ABBE'sche Komparatorprinzip nicht einzuhalten ist. Dieses besagt, dass Maßverkörperung und anzumessende Strecke in einer Flucht liegen müssen, damit sich das Spiel in den Führungen des Messgerätes nur noch unwesentlich auf das Messergebnis auswirken kann.

[Schwarz, W. 1995]

Hierzu wurde eine Vorrichtung entwickelt, welche dieses Prinzip einhält. Der Messtaster wird in einer Flucht mit einem Verschiebeschlitten, der durch eine Mikrometerschraube bewegt wird, befestigt. Vor dem Schlitten wird das Interferometerprisma angebracht. Interferometer und Messtastervorrichtung stehen auf einem Marmortisch der Ebene 0, welcher sich auf einem eigenen Fundament befindet. Prisma und Interferometer sind ungefähr 25 cm voneinander entfernt. Abb.25 zeigt den ausgebauten Messtaster in der neuen Messvorrichtung unter Einhaltung des ABBE'schen Komparatorprinzip.

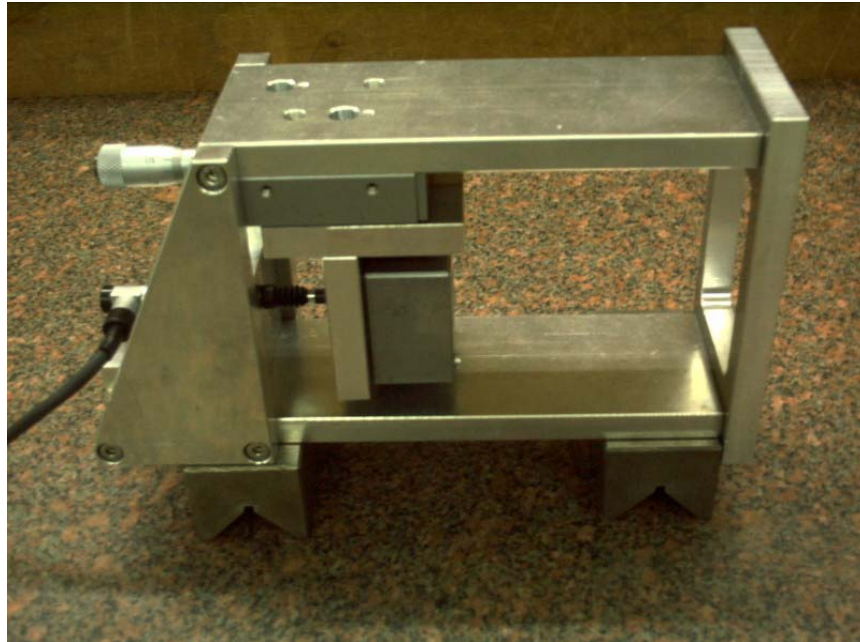


Abb.25 Ausgebauter Messtaster in der neuen Messvorrichtung unter Einhaltung des ABBE'schen Komparatorprinzips.

Schiefstellung des Messtasters

Besonders bei kurzen Strecken von wenigen Zentimetern können auch bei Einhaltung des ABBE'schen Prinzips systematische Fehler auftreten. Die Messabweichungen werden durch die zu messende Strecke und den Richtungsunterschied hervorgerufen. Deshalb kann der Messtaster, wenn er nach Augenmaß eingerichtet wird, eine Schiefstellung von 2° verursachen. Dieses würde für einen Messweg von 5 mm eine seitliche Auslenkung des Tasters von 0,17 mm mit sich führen.

[Schwarz, W. 1995]

Deshalb muss dieser Fehler zusätzlich durch weitere Messrichthilfen reduziert werden, welche im Folgenden erläutert werden.

Ausrichtung des Interferometers zum Messtaster

Die auf dem Marmortisch aufgebauten Messelemente sind wie zuvor nicht präzise genug mit dem Augenmaß auszurichten, deshalb bedient man sich eines Näherungsverfahrens mit Hilfe eines Theodoliten, welches ein indirektes Einrichten einer Geraden ermöglicht.

Zuerst geht es darum, den Theodoliten, hier ein T2 von Kern, über einen Verschiebeschlitten in eine Flucht mit dem Interferometer und der Messtastervorrichtung zu bringen. Dazu wird der Interferometerlaserpunkt an die Messvorrichtung des Messtasters und an die dahinter liegende Wand projiziert. (Messvorrichtung ist noch abnehmbar).

Nun wird der Theodolit mit Hilfe eines Verschiebeschlittens durch Anzielung der beiden sichtbaren Laserpunkte in die Gerade geschoben, bis er eine Flucht mit den Laserpunkten bildet.

Da der Theodolit nun in einer Achse mit dem Interferometer steht, muss nur noch der Verschiebeschlitten der Messtastervorrichtung genauer ausgerichtet werden. Der Aufbau für die Ausrichtung ist im Bild in Abb. 26 ersichtlich. Im Hintergrund wird das Messlabor der Vermessungsabteilung des DESY Hamburg dargestellt.



Abb. 26 Versuchsaufbau zur Ausrichtung des Messtasters.

Genauere Ausrichtung des Verschiebeschlittens (Messvorrichtung)

Die geringe Schiefstellung der Messvorrichtung wirkt sich auf den Verschiebeweg des Prismas aus, welches am Verschiebeschlitten befestigt ist, (wie zuvor beschrieben). Um hier auch eine präzisere Ausrichtung zu erlangen, wird der Laser wieder auf die Messvorrichtung projiziert, d.h. auf das Prisma, welches eine Blende mit einem Fadenkreuz besitzt. Zuvor wird der Laser jedoch mit dem Interferometerprisma ohne Blende ausgerichtet. Das Interferometer liefert uns ein Intensitätssignal über die Genauigkeit der Ausrichtung. Nun wird das Prisma mit dem Schlitten aus- und eingefahren. Wie nun zu erkennen ist, verschiebt sich ein Fadenkreuz, welches sichtbar mit Hilfe einer Magnetplatte vor dem Prismamittelpunkt befestigt wird. Um hier eine Mittlung bzw. bessere Ausrichtung zu erlangen, wird folgendermaßen vorgegangen:

Der Mittelpunkt des Laserpunktes wird durch äußeres Anmessen der Ränder über die Horizontalwinkel bestimmt. Dies geschieht mit eingefahrenem und mit ausgefahrenem Taster. Nun bestimmt man die Abweichungen auf der Strecke zwischen den Punkten mit Hilfe der Bogenformel. Bei dieser Messung ergibt sich eine Abweichung von $0,7 \mu\text{m}$ auf 5 mm . Hier bedarf es keinerlei weiterer Ausrichtung. Eine Winkeldifferenz von $0,8 \text{ mgon}$ stellt sich als nicht signifikant für die Messung heraus. Dies zeigt eine Winkelmessung in Abb. 27.

Winkelmessung zur Ausrichtung des Tasters Horizontal:

Messtaster eingefahren 0 mm			Mittel 1	Mittel 2	Gesamtmittel Mittelp.
Links	399,2784	399,2783	399,3655	399,3645	399,3650
Rechts	399,4526	399,4506			
Messtaster ausgefahren 5.0 mm					
Links	399,2836	399,2843	399,3648	399,3669	399,3658
Rechts	399,4460	399,4496			
Winkeldifferenz :		0,8mgon			
Messabweichung errechnet über Bogenformel:		0,7µm			

Abb.27 Tabelle der Winkelmessung zur Ausrichtung des Tasters .

5.4.1 Kontrolle und Skalierung des Mitutoyo-Messtasters mittels HP Laserinterferometer (Durchführung)

Der Streckenvergleich erfolgt kontinuierlich über die ganze Weite des Messtasters (ca. 5 mm). Die Auflösung des Mitutoyo ist auf 1 µm eingestellt. Die Skala misst in mm und zeigt 4 Stellen nach dem Komma an. Dies ist auch die Grenze der Einstellung, eine 5. Stelle wäre wünschenswert. Das Interferometer hat eine Auflösung von 0,01 µm – 1,0 mm. Es wird nun die Strecke von 0 angefangen mit eingefahrenem Messtaster hin und zurück gemessen. Zur Kontrolle wird eine zweite Messung durchgeführt. Dasselbe wird noch einmal wiederholt mit ausgefahrenem Taster als Ausgangspunkt. Die Aufzeichnung der Werte erfolgt auf dem EDV Wege. Das Prisma wird durch die Mikrometerschraube verschoben. Es wird sich nach dem Interferometer gerichtet um die Streckendifferenzen einzustellen. Die Werte werden mit Hilfe eines Messprogrammes aufgezeichnet und ausgewertet.

Hierbei ist großes Fingerspitzengefühl erforderlich, um die Werte am Interferometer einzustellen, denn schon die kleinste Bewegung an der Mikrometerschraube bewegen den Messwert im μ -Bereich und es kann zu Registrierfehlern durch die schnelle Datenübertragung kommen. Somit werden grobe Fehler schnell sichtbar und können herausgelöscht werden.

Atmosphärischer Einfluss und Einlaufverhalten

Um möglichst genaue Streckenwerte zu errechnen, ist natürlich auch hier darauf zu achten, dass das Laserinterferometer ca. 2 Stunden warmlaufen muss, damit Laser und elektronische Teile genau arbeiten. Atmosphärische Einflüsse, die das Messergebnis systematisch beeinflussen, müssen hier auch berücksichtigt werden. Somit wird Lufttemperatur und Luftdruck automatisch über einen Sensor registriert und berücksichtigt und in die Streckenberechnung mit einbezogen.

Der Messtaster braucht keine Einlaufzeit. Die Skala jedoch, welche die Werte anzeigt und mit Strom betrieben wird, sollte auch 20 Minuten in Betrieb sein.

5.4.2 Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung des Messtasters

Die folgenden Diagramme zeigen die Streckendifferenzen zwischen Interferometer und Messtaster. Abb. 28 und Abb. 29 zeigen die Streckenvergleichsmessungen zwischen Interferometer und Messtaster. Dargestellt sind die Streckendifferenzen von Hin- und Rückmessung. Die Ausgangssituation der Messung beginnt mit eingefahrenem Taster.

Die Abb. 30 stellt das gleiche dar, allerdings beginnt die Ausgangssituation der Messung mit ausgefahrenem Taster.

Streckenvergleich Interferometer - Messtaster Mitutoyo
1.Messung

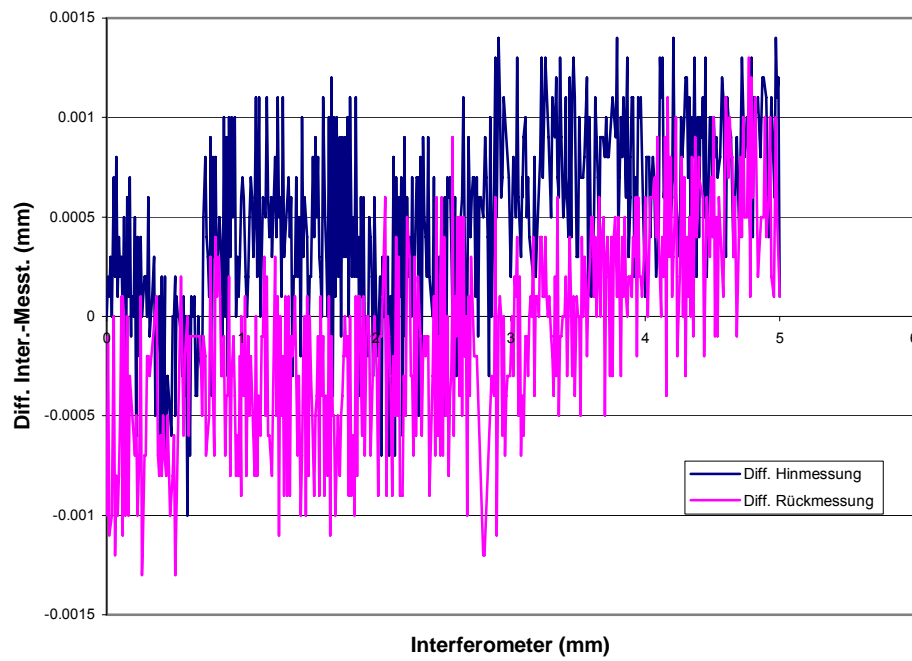


Abb.28 Streckenvergleichsmessung zwischen Interferometer und Messtaster.
Ausgangssituation: eingefahrener Taster.

Steckenvergleich Interferometer - Messtaster
2.Messung

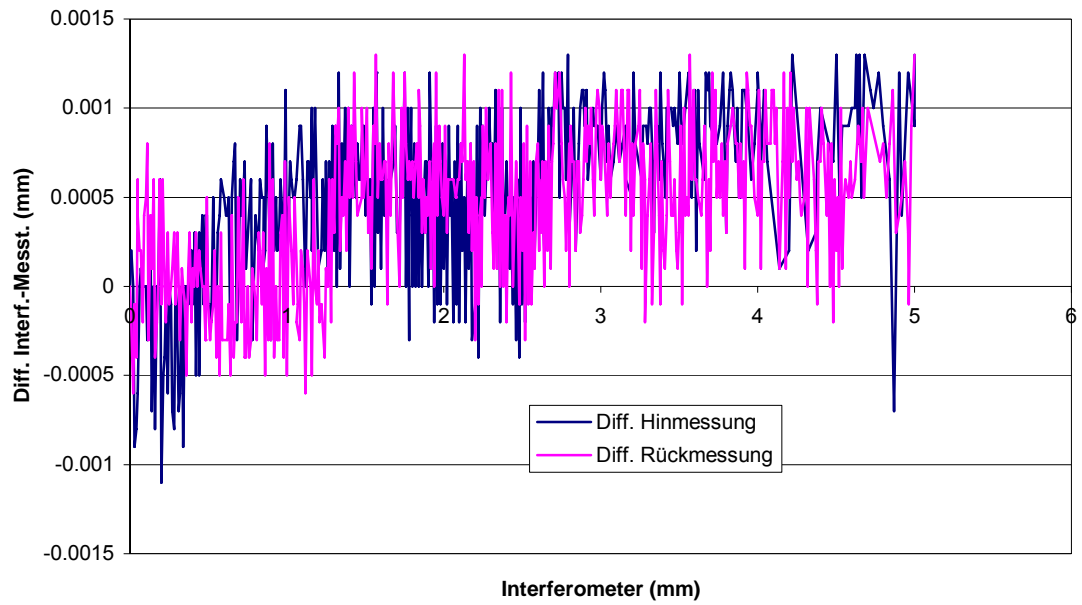


Abb.29 Zweite Streckenvergleichsmessung zwischen Interferometer und Messtaster. Ausgangssituation: eingefahrener Taster.

Streckenvergleich Interferometer- Messtaster
3. Messung

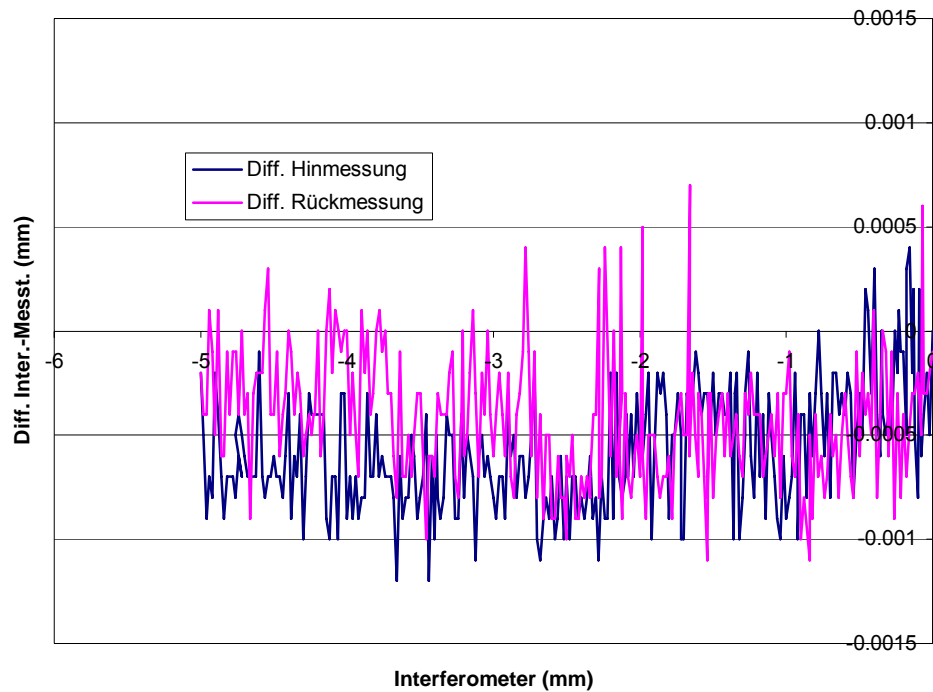


Abb.30 Streckenvergleichsmessung zwischen Interferometer und Messtaster.
Ausgangssituation: ausgefahrener Taster.

Der Messtaster ist ausschlaggebend für die Genauigkeit des Systems, da nach ihm über die Voltangaben der Nullpunkt eingestellt wird. Das bedeutet, die Streckengenauigkeit des Tasters spiegelt indirekt die Genauigkeit des Systems wieder.

Die Genauigkeiten, die sich für das System ergeben, liefern die gewünschten Genauigkeiten im μm Bereich.

5.4.3 Fehlerbetrachtung (Standardabweichung)

Die erste Messung ergibt eine maximale Abweichung von 1,4 µm bei einer Standardabweichung von 0,61 µm, die zweite Messung eine Standardabweichung von 0,66 µm und eine max. Abweichung von 1,1 µm. Die dritte, mit der Ausgangsposition Messtaster ausgefahren, bringt eine Standardabweichung von 0,58 µm bei einer max. Abweichung von 1,2 µm hervor. Die Gesamtstandardabweichung der Werte aus allen Messungen beträgt : 0,62 µm.

Die Standardabweichungen werden nach folgenden Formeln berechnet :

[Höpcke, W. 1980] [Häßler, Wachsmuth, 1994]

- **Standardabweichung einer Einzelmessung L_i**

$$s = \sqrt{\frac{v_1 v_1 + v_2 v_2 + \dots + v_n v_n}{n - 1}} = \sqrt{\frac{[vv]}{n - 1}}$$

_ **Gesamtstandardabweichung**

$$S_{ges} = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}{n}}$$

5.5 Grundkurve / Drahtpositionsmessung

Wie zuvor beschrieben besteht der Drahtfinder aus einer Fozelle, auf die ein Laser durch einen Schlitz scheint. Der Basislaser erlaubt es, die Drahtposition herauszufinden, ohne den Draht zu berühren. Die Vorrichtung besteht aus einem Laseremitter, der so befestigt ist, dass der hervortretende Strahl durch einen Schlitz über den Draht zu einem Receiver auf die andere Seite geleitet wird. Nach der Messung wird die Intensität des Signals aufgefangen und eine Berechnung auf dem Signalprofil basierend sowie die genaue Position des Drahtes erstellt. Dies zeigt sehr gut Abb.31 aus dem Projektbericht. Auf der linken Seite ist eine idealisierte Spannungskurve (blau) und die Hilfslinien (rot) zur Mittelpunktserrechnung des Drahtes dargestellt. [Ruland, R, 1999]

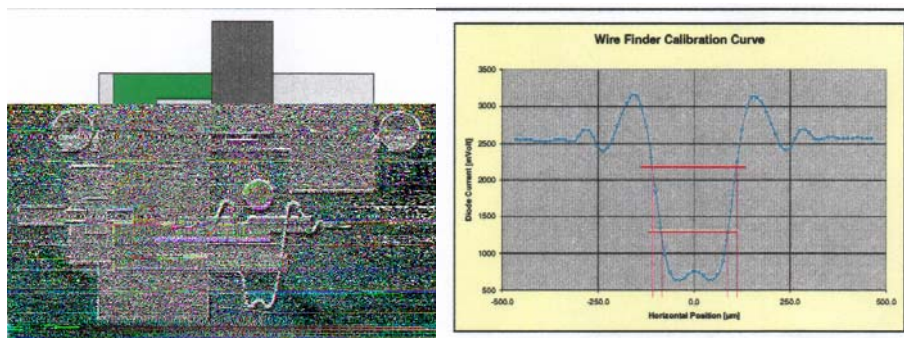


Abb.31 Schematisches Modell des Drahtfinders im Querschnitt und seine Funktionsweise. [Ruland, R. ,1999].

Die aktuelle Feststellung der Drahtposition wird durch das Verschieben des Lasers mit der Diode über das Drahtprofil durchgeführt. Die Mikrometerablesungen des Messtasters werden über die Spannungswerte der Diode festgelegt, wenn die Drahtkanten passiert werden. Den Durchschnitt der Mikrometerablesungen bringt die Mittelpunktposition hervor. Es gilt nun herauszufinden, in welchem Bereich das Signalprofil lineare Werte anzeigt, um eine gute Mittelung der Werte zu garantieren und den Mittelpunkt zu beschreiben. Dazu wird eine Grundkurve erstellt. Der Laser sowie auch der Draht werden parallel zum Schlitz der Diode ausgerichtet. Es wird ein 0,2 mm Kupferdraht benutzt. Es soll herausgefunden werden, ob die Kurve noch verbesserungsfähig ist. Zusätzlich muss gesagt werden, dass Laser und Diode noch nicht perfekt zueinander ausgerichtet sind. Aus diesem Grund können nicht die exakt gleichen Voltwerte nach einer Verdrehung des Lasers oder der Diode angenommen werden, da diese in keiner Arretierung sitzen und somit bei ihnen nicht die gleiche Intensitätseinstellung vorgenommen werden kann. Wichtig ist jedoch, dass der Schlitz der Diode überdeckt wird. Die Diode und der Laser werden optisch zueinander ausgerichtet, so dass der Laser den Schlitz überdeckt und in einer Linie mit der Diode und dem Draht steht. Hierbei wird keine exakte Nullpunktbestimmung vorgenommen. Die Kurven werden über den Bezug des Messtasters ermittelt, welcher präzise eingestellt werden kann. Die dazugehörigen Spannungen werden ermittelt und aufgezeichnet. Diese sind nicht exakt gleich, da die Diode eine Sensibilität von ca. 60 mVolt hat. Die erste Messung ergibt die in Abb. 32 dargestellte Grundkurve mit einem 0.2 mm dicken Kupferdraht sowie die Anzahl der Messpunkte (140) zur ihrer Erstellung. Diese Grundkurve dient als Ausgangskurve für spätere Vergleiche.

5.5.1 Ergebnisse der Grundkurve

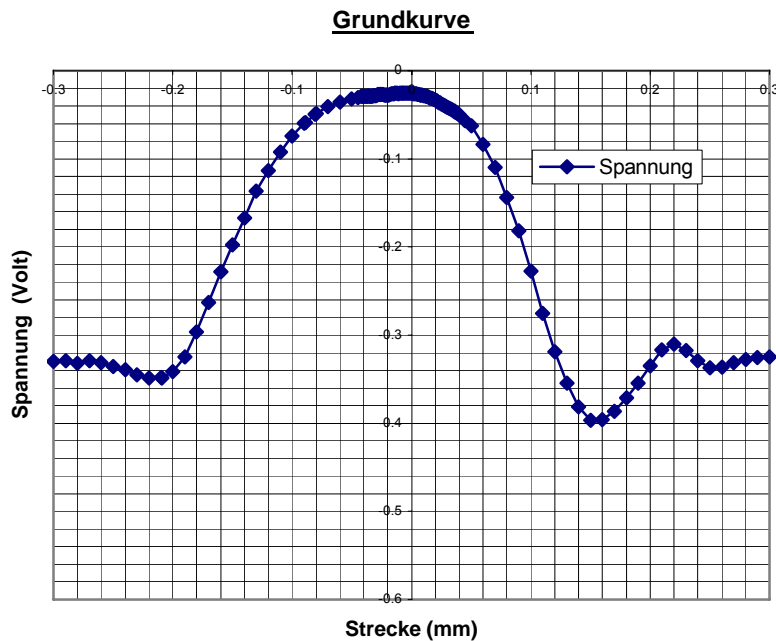


Abb.32 Spannungskurve zur Erstellung des Drahtprofils.

Auf dieser Kurve können wir erkennen, dass die Kurve nicht ganz symmetrisch verläuft.

Für die Mittelpunktbestimmung müssen die Werte aus einem linearen Bereich der Kurve ausgesucht werden. Hier ist der Bereich zwischen 0.3 – 0.15 Volt in der Kurve zu wählen.

Verbesserungsfähig ist also die Symmetrie der Kurve zur genaueren Darstellung einer besseren Abgrenzung des Bereiches zur Mittelung des Drahtmittelpunktes und eine schärfere Darstellung des oberen Bereiches der Kurve, um den Drahttrand besser abzugrenzen.

Zusätzlich werfen sich Fragen auf, ob die Signalkurve durch Drehung des Lasers zum Schlitz oder eine andere Stärke des Drahtes durch Drehung der Diode zum Draht und Laser oder durch die andere Anbringung des Drahtes (näher zur Diode oder zum Laser) verbessert werden kann. Dies wird des Weiteren untersucht und dargestellt in den folgenden Kapiteln.

5.6 Drehung des Lasers 0 / 50 / 100 gon

Wie schon beschrieben, ist die Grundkurve die dargestellt wurde noch zu verbessern, darum habe ich den Laser um 50 gon und 100 gon zum Draht und zur Diode gedreht und die Signalkurve aufgezeichnet. Zu erhoffen ist dort eine auf beiden Seiten stärkere Steigung und eine genauere Darstellung des Verlaufs.

5.6.1 Ergebnisse der Laserdrehung

Die folgenden Diagramme zeigen den Signalverlauf bei Drehung des Lasers von 0 , 50, und 100 gon. Es wurde eine Drahtstärke von 0,2 mm benutzt.

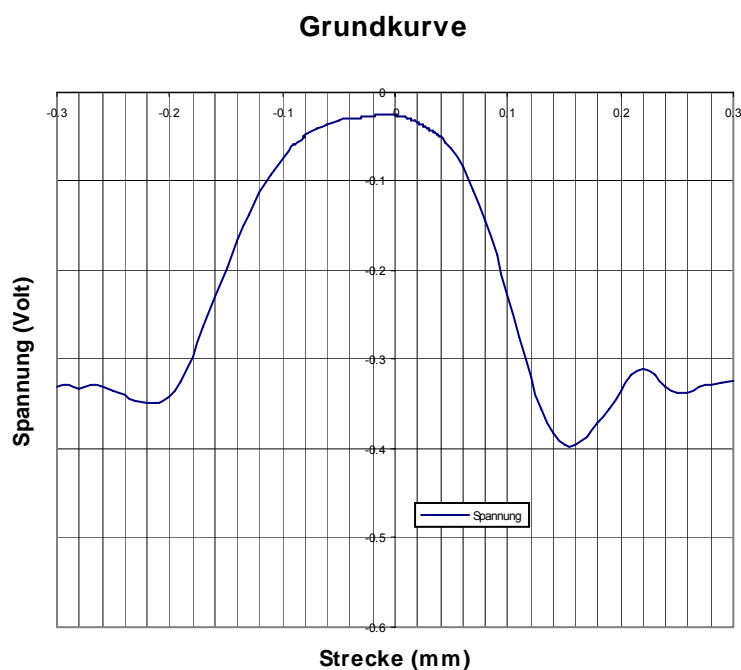


Abb.33 Spannungskurve des Drahtfinders. Laser in Ausgangsposition (0 Gon).

Grundkurve, Laser 50 Gon gedreht

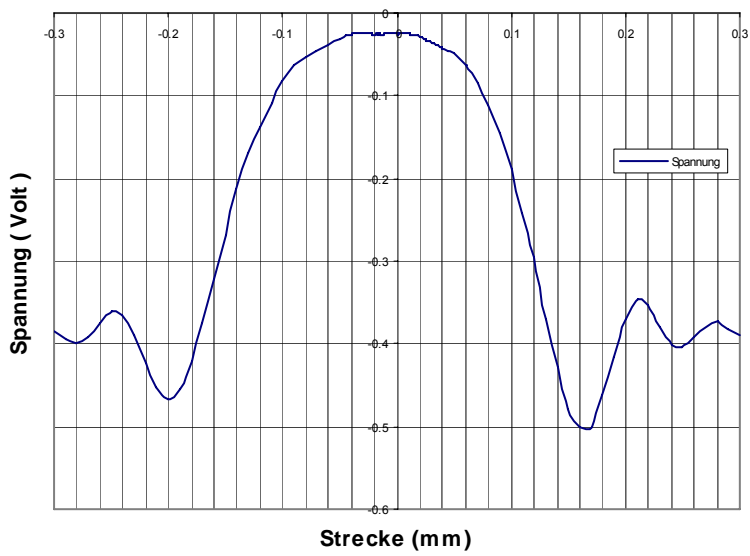


Abb. 34 Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Laser (50 Gon).

Grundkurve Laser 100 Gon Gedreht

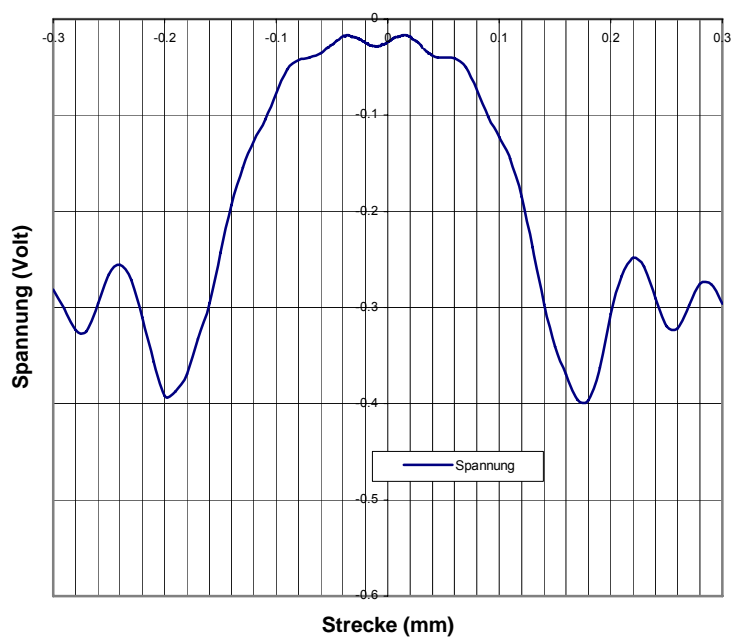


Abb.35 Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Laser (100 Gon).

5.6.2 Beurteilung der Laserdrehung

Wie man deutlich erkennen kann, wird durch die Drehung des Lasers eine immer steilere Kurvenabzeichnung dargestellt. Hier scheint die Drehung von 100 gon für die Kurve den linearsten und steilsten Verlauf im Bereich von 0.2 – 0.3 mV abzugeben. Bei 50 Gon ergibt sich zwar ein größerer Bereich zum Mitteln der Werte jedoch wird die Kurve des Drahtes nicht so scharf abgezeichnet. Die Symmetrie ist hier schlechter und somit auch die Genauigkeit der Voltwerte für die spätere Einstellung.

Deutlich zu sehen ist eine verbesserte Symmetrie der Kurve bei dem Laser in der 100 Gon gedrehten Position sowie eine deutliche Abzeichnung der Drahtkanten.

5.7 Drehung der Schlitzblende der Photodiode zum Laser

Eine weitere Überlegung geht davon aus, die Photodiode bzw. die Schlitzblende der Diode zu drehen. Der Laser wird wieder in seine Ausgangsposition gebracht (Laser parallel zum Draht, 0 Gon verdreht). Hier wird das gleiche Ziel verfolgt, nämlich die Optimierung der Spannungskurve zur Einstellung des Nullpunktes.

Die Blende des Schlitzes wird aus ihrer Fassung gelöst und in verschiedenen Positionen zum Draht gedreht. Dann wird der Draht wieder abgefahren und Messtasterwerte sowie Spannungswerte werden aufgezeichnet.

Dargestellt wird die Spannungskurve in der Ausgangsposition 0, 50 und 100 gon. Der Durchmesser des Drahtes beträgt 0.2 mm.

Dies ergibt folgende Diagrammkurven.

5.7.1 Ergebnisse der Drehung der Schlitzblende

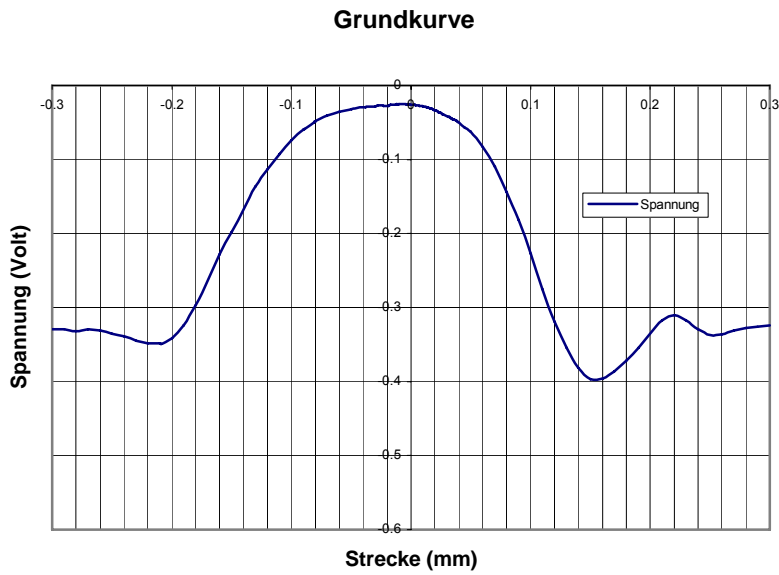


Abb.36 Spannungskurve des Drahtfinders in seiner Ausgangsposition.

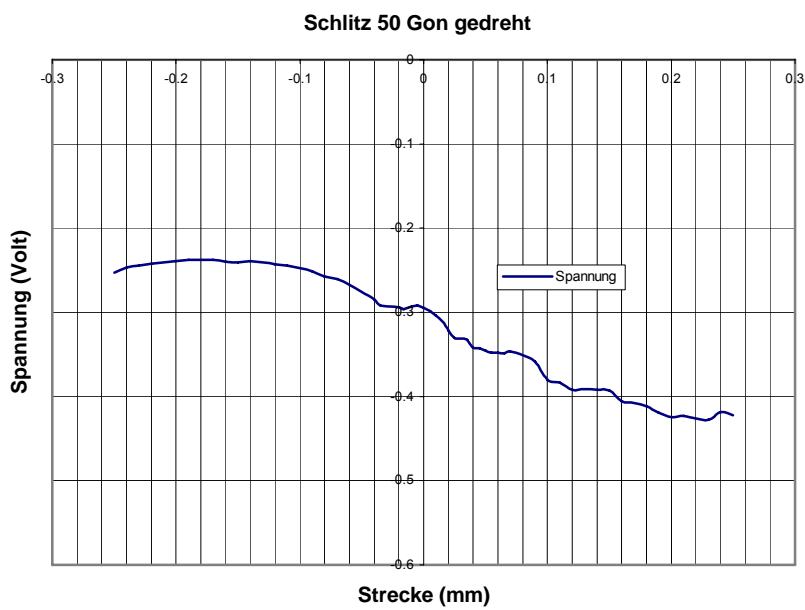


Abb.37 Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Schlitz (50 Gon).

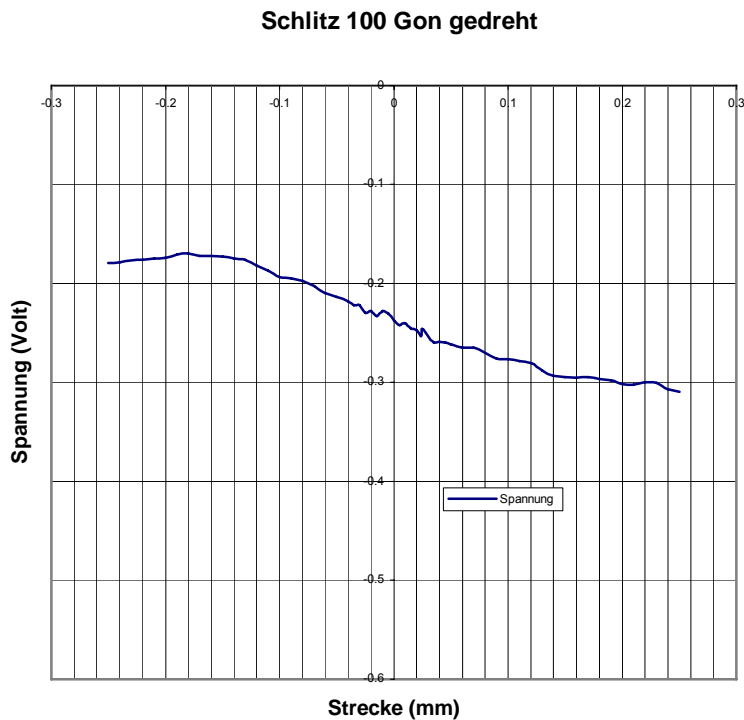


Abb.38 Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Schlitz (100 Gon).

5.7.2 Beurteilung der Drehung der Schlitzblende

Aus diesen Diagrammen ist eindeutig zu entnehmen, dass die Verdrehung der Photodiode zu keiner Verbesserung beiträgt, sondern nur die Kurve verfälscht. Durch das Drehen der Diode, welche nun schräg zum Draht und Laser steht, geht der für die darzustellende Spannungskurve Intensitätsfluss verloren. Es ist also zu empfehlen, die Diode parallel zum Draht auszurichten.

5.8 Untersuchung der Drahtstärken 0,1 mm - 0,8 mm

Um später ein optimales Drahtmesssystem nutzen zu können ist es wichtig, die richtige Drahtstärke auszuwählen, die auch hier für den Drahtfinder herausgefunden werden muss. Nur so können Drahtfinder und Drahtsystem später miteinander optimal abgestimmt werden.

Um eine praktikable Drahtstärke zu wählen und auf das System abzustimmen, müssen verschiedene Drahtstärken ausgesucht werden. Hier werden Drahtstärken von 0,1 mm – 0,8 mm ausgewählt. Gemessen werden nun die Spannungswerte, welche in Form eines Diagramms dargestellt werden. Der Laser ist hier um 100 gon gedreht. Dabei komme ich zu folgenden Ergebnissen:

5.8.1 Ergebnisse der Drahtstärkenuntersuchung

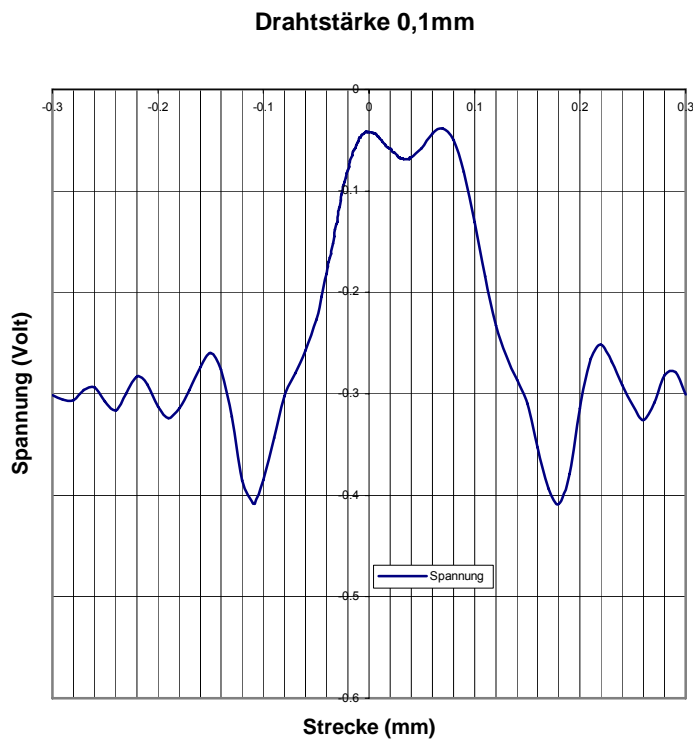


Abb.39 Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke 0.1 mm

Drahtstärke 0.2 mm

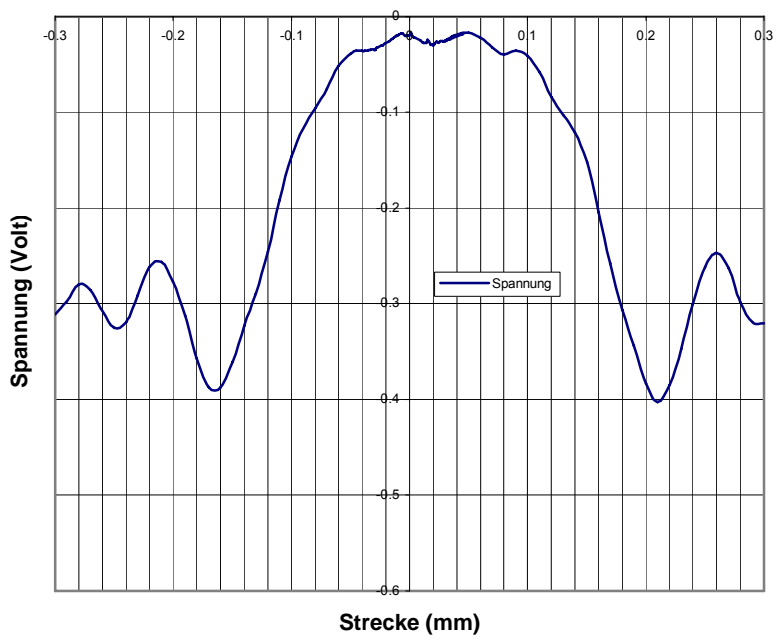


Abb.40 Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke 0.2 mm.

Drahtstärke 0.5 mm

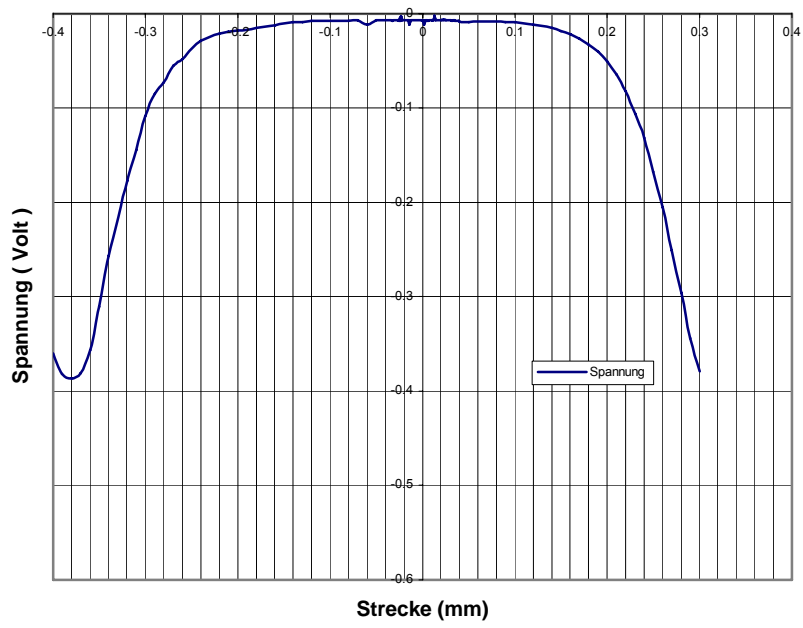


Abb.41 Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke 0.5 mm.

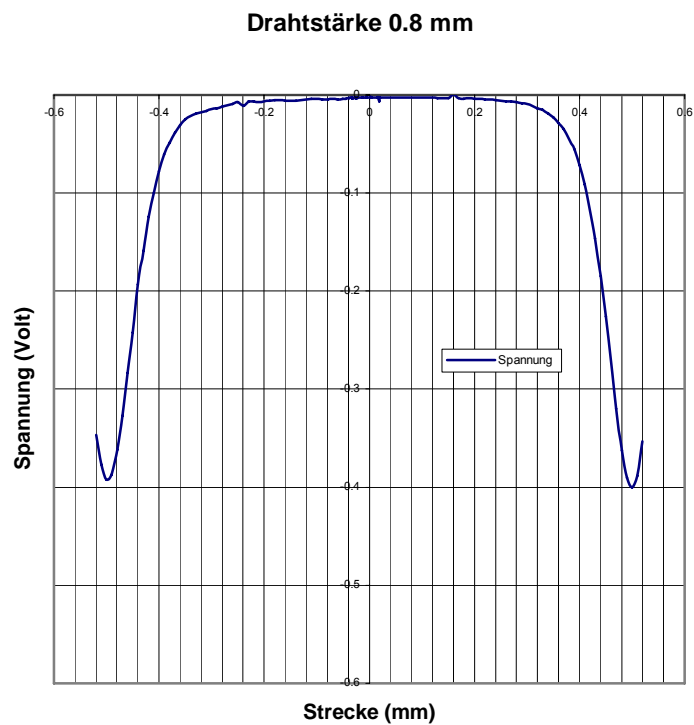


Abb.42 Spannungskurve des Drahtfinders, Drahtstärke von 0.8 mm.

5.8.2 Beurteilung der Drahtstärkenuntersuchung

Von den erprobten Drähten, die zur besseren Interpretierbarkeit der Kurve beitragen sollen, können zwei Drahtstärken in Betracht gezogen werden. Die Benutzung des Drahtes von 0,1 mm Stärke und des Drahtes von 0,2 mm Stärke ergeben hier die besten Werte für den Kurvenverlauf. Alle anderen Drähte stellen den Drahtverlauf in der Kurve nicht deutlich genug dar. Dieses liegt an den zu großen Querschnitten. Das Drahtprofil der Kurven wird bei den Drähten der Stärken von 0,1 und 0,2 mm präziser abgezeichnet und bietet einen sicheren Bereich, um den Drahtmittelpunkt zu ermitteln. Drähte die stärker als 0.2 mm sind haben zwar einen sehr steilen und linearen Kurvenverlauf, auffallend ist jedoch,

dass der Bereich der Drahtkante, welcher durch den ersten Abfall der Kurve dargestellt wird, sowie der Rest des Drahtprofils zu ungenau beschrieben wird. Dies liegt vielleicht auch an der Beschaffenheit des Drahtes.

5.9 Abstand des Drahtes zwischen Laser und Diode

Durch die Verstellung des Drahtabstandes zum Laser und zur Diode soll getestet werden, ob auch hier genauere Werte durch eine steilere oder besser abzeichnende Kurve erstellt werden können. Dazu wird der Draht aus seiner mittigen Lage näher an die Diode oder den Laser gebracht. Wieder werden in Bezug mit den Messtasterwerten die Spannungen aufgezeichnet und eine Diagrammkurve über den Verlauf erstellt. Sie zeigt die Spannungskurve des Drahtfinders mit gedrehtem Laser (100 Gon) und einer Drahtstärke von 0.2 mm unter Änderung des Abstandes zu Laser und Diode. Diagramme und Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

5.9.1 Ergebnisse der Abstandsmessung des Drahtes vom Laser – Diode

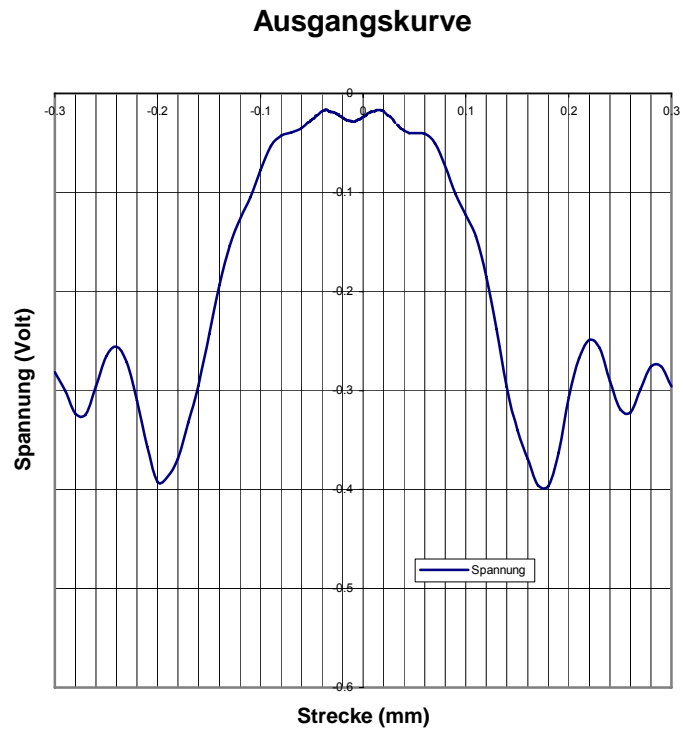


Abb.43 Spannungskurve des Drahtfinders mit unverändertem Drahtabstand.

Drahtabstand 0.5 cm näher zur Diode

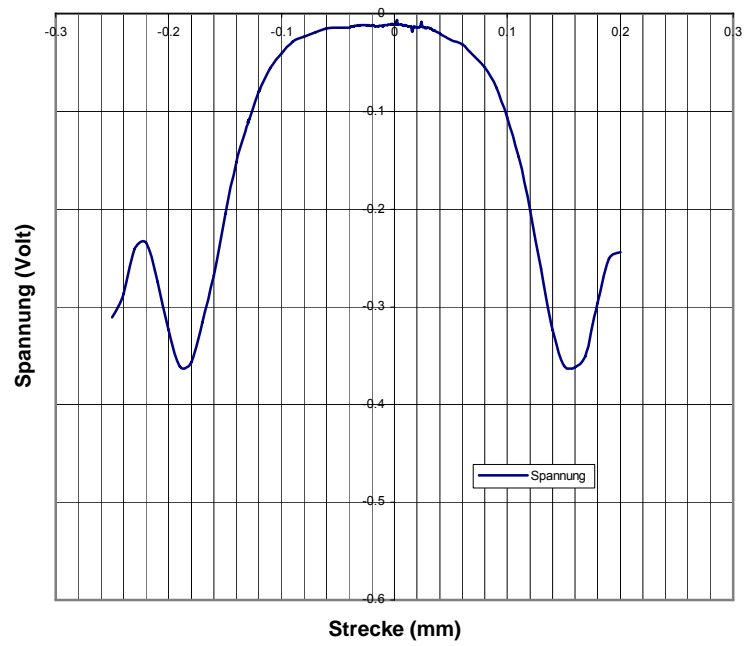


Abb.44 Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.5 cm näher zur Diode.

Drahtabstand 1 cm näher zur Diode

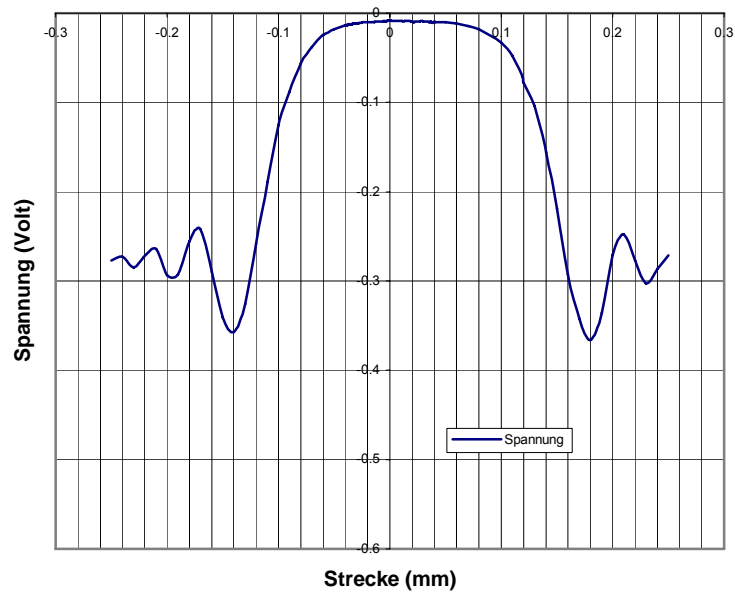


Abb.45 Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 1 cm näher zur Diode.

Drahtabstand 0.4 mm näher zum Laser

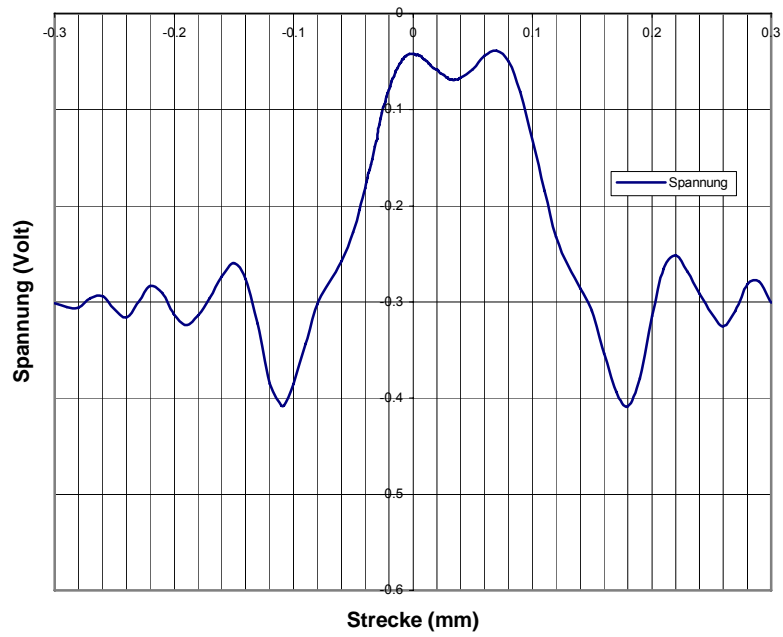


Abb.46 Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.4 cm näher zum Laser.

Drahtabstand 0.5 cm näher zum Laser

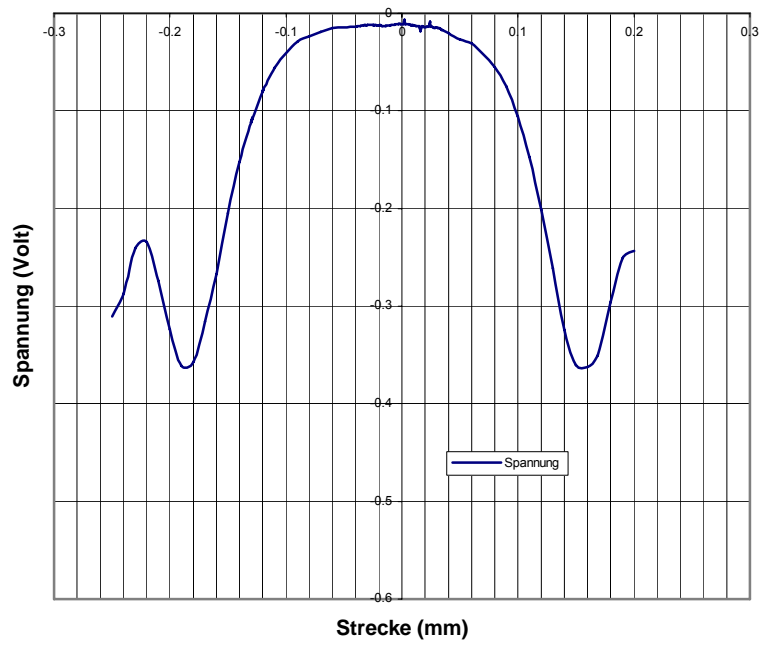


Abb.47 Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.5 cm näher an den Laser angebracht.

Drahtabstand 0.6 cm näher zum Laser

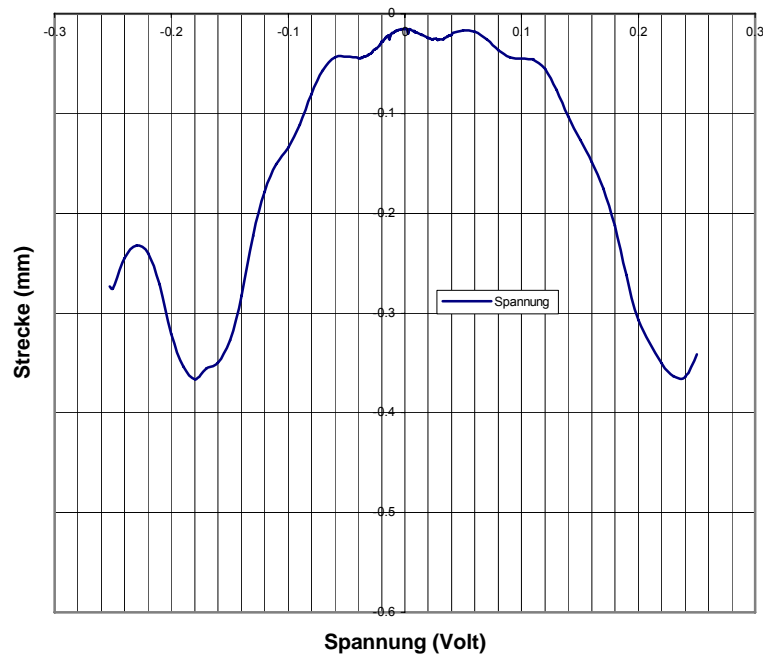


Abb.48 Spannungskurve des Drahtfinders, Draht 0.6 cm näher an den Laser angebracht.

5.9.2 Beurteilung der Abstandsmessung

Die Versuche, den Drahtabstand zur Diode zu verringern zeigen, dass sich die Spannungskurve immer mehr an Null nähert, aber ihre Steigung abnimmt.

Ein verbessertes Kurvenverhalten zu erzielen, Durch die Abstandsverringering des Drahtes zum Laser wird weder ein besseres Kurvenverhalten erzielt, noch erhält man ein genaueres Ergebnis . Es verschlechtert sich eher im Bereich der Symmetrie. Dies bedeutet in diesem Fall, den Draht mittig angebracht (zwischen Laser und Diode) als optimal positioniert anzusehen.

5.10 Abstandsveränderung des Lasers

Um beurteilen zu können, ob sich die Signalkurve verändert, indem man den Laser aus seiner Grundposition löst und den Abstand zur Diode verlängert, benutzt man eine provisorische Fassung, mit der man den Laser (100 Gon gedreht) in verschiedenen Abständen über der Diode befestigt. Die Spannungskurve des Drahtfinders wird nun aufgezeichnet.

Nun kann herausgefunden werden, in wie weit die Konstruktion in Abhängigkeit des Abstandes verändert werden kann und ob eventuell ein größerer Lichtkegel die Signalkurve beeinflusst. Der Laser hat ein sichtbares rotes paralleles Lichtbündel, welches zu den Seiten streut. In einem kleinen Versuch durch die Projektion eines Lichtstrahls an eine weiße Wand, die ca. 10,6 m entfernt ist, kann man gut erkennen, dass sich der Lichtschlitz von 1 mm auf 1,9 cm vergrößert. Dies ergibt bei einer Abstandsvergrößerung von ungefähr 3 cm eine Verbreiterung von 0,53 mm.

5.10.1 Ergebnisse der Abstandsänderung

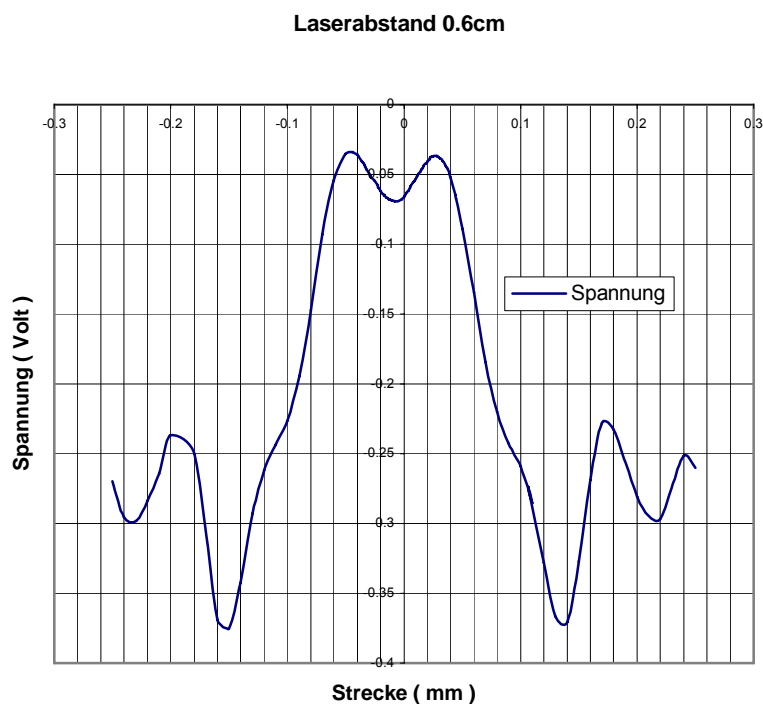


Abb.49 Spannungskurve des Drahtfinders bei einer Abstandsvergrößerung des Lasers von 0.6 cm.

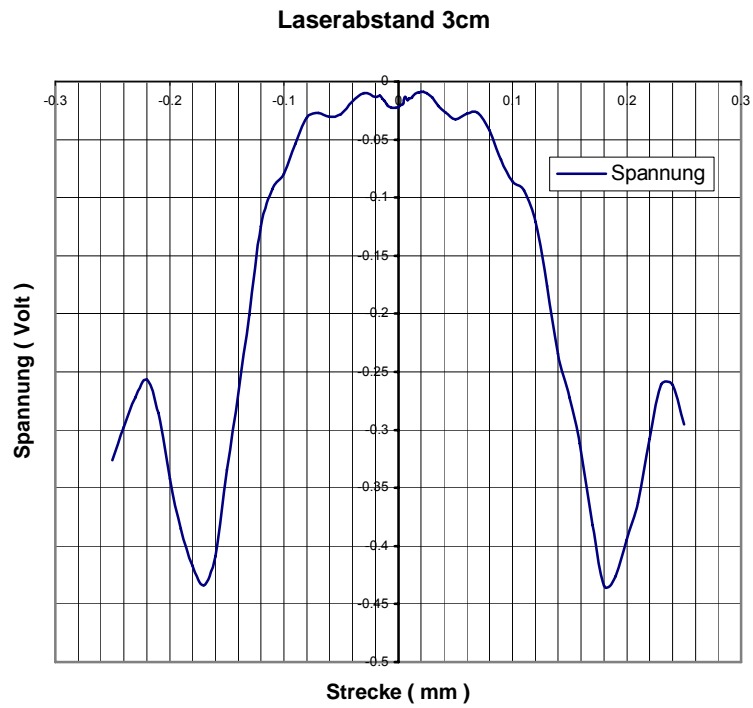


Abb.50 Spannungskurve des Drahtfinders bei einer Abstandsvergrößerung des Lasers von 3 cm.

Laserabstand 0.6 cm

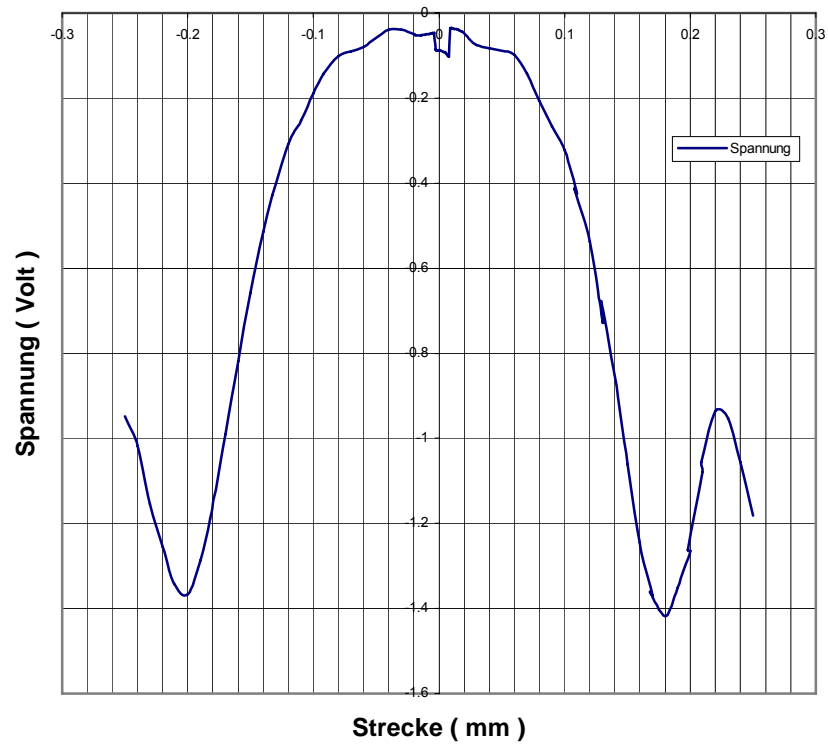


Abb.51 Spannungskurve des Drahtfinders, Abstandsveränderung des Lasers um 0,6 cm (Laser um 0 Gon gedreht).

Laserabstand 3 cm

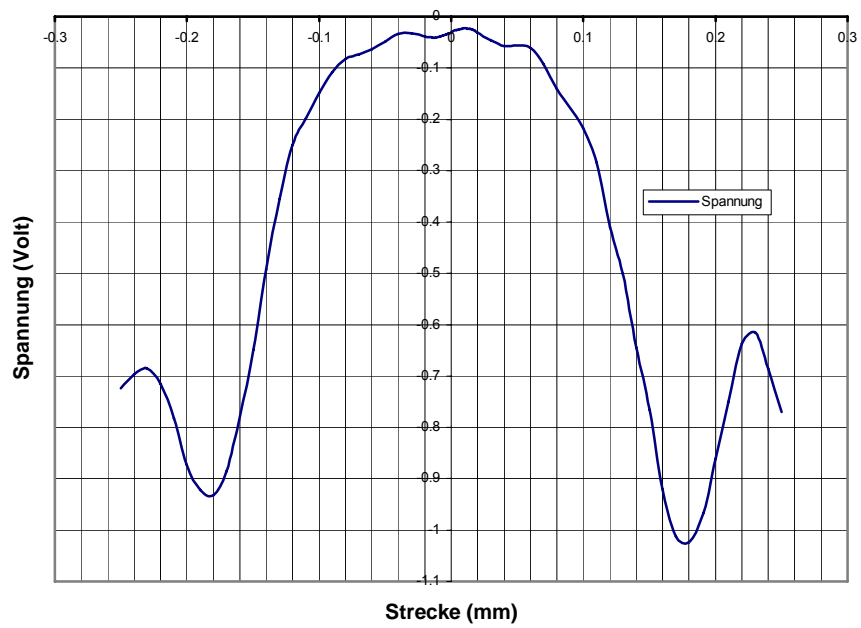


Abb.52 Spannungskurve des Drahtfinders, Abstandsveränderung des Lasers um 3 cm (Laser um 0 Gon gedreht).

5.10.2 Beurteilung der Abstandsveränderung

Bei der Abstandsveränderung des Lasers zur Diode stellt sich heraus, dass sich die Spannungskurve in ihrem Verlauf nicht wesentlich verändert. Die einzige Auffälligkeit ist die Verschiebung der Spannungskurve an Null, bei einer Abstandsvergrößerung von 3 cm mit dem 100 gon gedrehten Laser. Dies ist auf den leicht verbreiterten Lichtkegel zurückzuführen. Die Diode empfängt hier eine größere Lichtintensität. Die Spannungskurve wird hier durch die Abstandsveränderung des Lasers nicht groß beeinflusst. Wichtig ist die Überdeckung des Diodenschlitzes vom Lichtschlitz des Lasers sowohl in seiner Ausgangsposition als auch um 100 gon gedreht, so dass der Draht durch seinen Schattenwurf lokalisiert werden kann.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Beurteilung und Genauigkeitsaussage des Systems

Der Drahtfinder besteht aus einer Fozelle, auf die ein Laser durch einen Schlitz scheint. Wenn die Diode den Draht passiert wirft er einen Schatten und das Signal vom Detektor verringert sich. Das Signal geht auf fast Null, wenn die Diode um 25 μm verschoben wird und somit der Draht den Schlitz verdeckt. Dies ergibt eine Sensibilität von ungefähr 60 mV auf 1,3 μm Abweichung. 60 mV ist gleich dem Rauschen, welches uns die Genauigkeit in dem μm -Bereich liefert. Die relative Verschiebung wird über den Messtaster von Mitutoyo aufgezeichnet. Dieser liefert uns eine Standardabweichung von 0,62 μm auf 5 mm. Zur Einstellung des jetzigen vorhandenen Systems in Bezug auf die Untersuchungen ist zu sagen, dass ein Draht mit der Stärke zwischen 0,1 mm bis 0,2 mm genutzt werden sollte. Der Draht sollte mittig zwischen Laser und Diode positioniert und der Laser um 100 gon zur Diode und zum Draht gedreht werden. Die Diode sollte parallel zum Draht stehen und die Errechnung des Drahtmittelpunktes im Bereich von 0,2 V bis 0,1 V erfolgen. Dieser Bereich erscheint linear genug, um Werte abgreifen zu können, um mit ihnen zu rechnen.

Mit diesen Einstellungen wird eine optimal interpretierbare Kurve erzielt, die aus den vorhandenen Mitteln ableitbar sind. Das folgende Bild in Abb. 53 zeigt noch einmal eine optimierte Spannungskurve als Diagramm mit den oben genannten berücksichtigten Einstellungen.

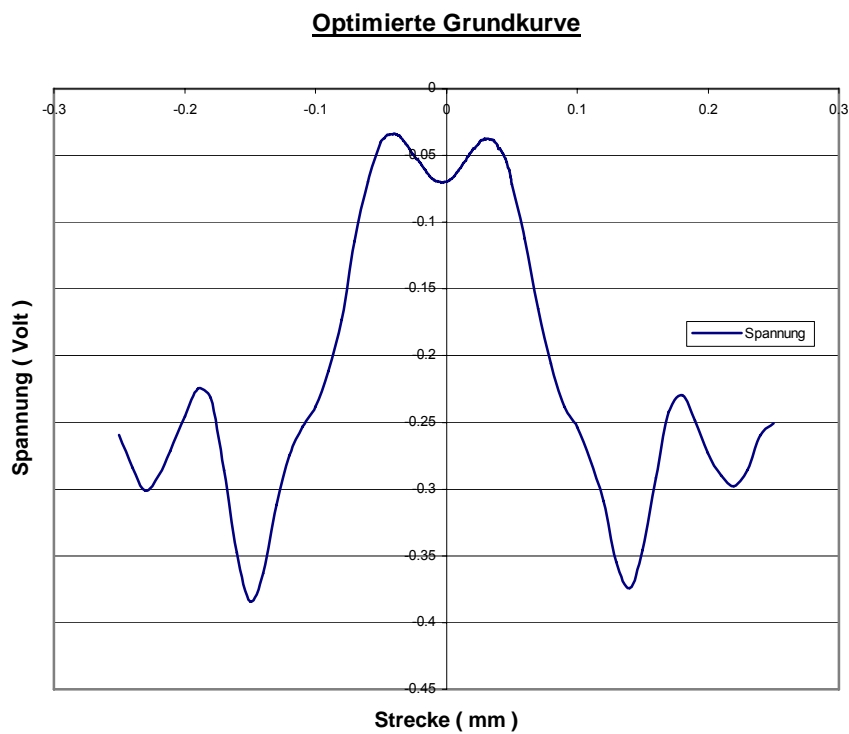


Abb.53 Optimierte Grundkurve
Spannungskurve des Drahtfinders,
Laser 100 Gon gedreht, Drahtstärke 0,1 mm.

6.2 Verbesserungsvorschläge

Der Drahtfinder erfüllt die gewünschte Genauigkeit für sein Einsatzgebiet, nämlich die Bestimmung des Drahtmittelpunktes im μm -Bereich. Seine Konstruktion ist jedoch noch verbesserungswürdig. Es wurde eine Vorrichtung zur Lagerung des Drahtfinders bei der Komponentenjustierung entwickelt. Die Lagerung auf der Platte ist so konstruiert, dass die Freiheitsgrade Drehung, Verschiebung und Kippung keinen Einfluss auf die Standfestigkeit haben. Jedoch ist der Drahtfinder immer noch leicht instabil im Stand.



Abb.54 Vorrichtung für die Lagerung des Drahtfinders bei der Komponentenjustierung.

Die Diode und der Laser sind in einem keilförmigen Verschiebeschlitten gefasst. Der Keil hat eine Neigung von $22,5^\circ$. Auf dem Keil liegt eine Stahlkugel, welche über die Mikrometerschraube heruntergedrückt wird. Somit verschiebt die Mikrometerschraube den Schlitten über die Kugel. Durch die Neigung von $22,5^\circ$ wird die Feinmotorik nochmals halbiert. Dieser indirekte Antrieb ist keine schlechte Lösung, das Problem ist jedoch, dass die Kugel sich verklemmen kann. Besser wäre ein direkter Antrieb nur über die Mikrometerschraube. Hinzu kommt, dass der Schlitten über eine Feder zurückgezogen wird, wenn man die Mikrometerschraube zurückdreht. Hier haben wir das Problem der nachlassenden

Federsteifigkeit. Eine bessere und direkte Übersetzung von der Mikrometerschraube zum Schlitten wäre über ein Bewegungsgewinde. Dieses hat aber auch ein gewisses Spiel. In Frage kommen würde auch ein spielfreier Kugelumlauftrieb.

Um noch optimalere Einstellungen tätigen zu können, sollten die Mikrometerschraube sowie der Messtaster in einer Linie mit dem verschiebbaren Schlitten angebracht werden, um das ABBE'sche Prinzip gewährleisten zu können. Dies ist jedoch von der Einsetzbarkeit der Bauteile abhängig.

Mit meiner Untersuchung des Drahtfinders (Alignementsystem mit optischem absolut messendem Drahtabgriff) erhoffe ich, Aufschluss über die optimale Einsetzbarkeit dieses Präzisionsgerätes sowie weitere Anregungen zu dessen Verbesserung gegeben zu haben.

Zu Abschluss möchte ich noch ein herzliches Dankeschön an das Desy aussprechen und mich bei den Mitarbeitern bedanken, durch die mir diese Diplomarbeit ermöglicht wurde. Besonderen Dank möchte ich Herrn Dr.-Ing. Prenting aussprechen, welcher mir diese Arbeit gestattete und mich dabei betreute, Herrn Dipl.-Ing. Liebl, welcher mir die digitale Registrierung der Messdaten ermöglichte sowie Herrn Lass, der mir immer unterstützend bei Fragen und Messdurchführungen zur Seite stand .

Auch ein herzliches Dankeschön geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Sternberg, der meine Diplomarbeit begleitete.

6.3 Literaturverzeichnis

[Häßler, Wachsmuth, 1994] Häßler, Johann; Wachsmuth, Herbert: Formelsammlung für den Vermessungsberuf; Wilhelm Bing Verlag, Korbach 1994

[Hennecke, Müller, Werner, 1992] Hennecke, Fritz; Müller, Gerhard; Werner, Hans: Maschinen- und Anlagenbau: Handbuch der Ingenieurvermessung, Herbert Wichmann Verlag GmbH, Karlsruhe 1992

[Höpcke, W. 1980] Höpcke, Walter: Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung, Walter De Gryter Lehrbuch 1980

[Kahmen, 1993] Kamen, Heribert: Vermessungskunde, Walter De Gryter Lehrbuch, Berlin – New York 1993

[Leute, 1995] Leute, Ulrich: Physik und ihre Anwendung in Technik und Umwelt, Carl Hanser Verlag München, Wien 1995

[Melles Griot, 1999] Melles Griot: The Practical Application of Light. Dioden und Laser Katalog der Firma Melles Griot USA, 1999

[Möser, Müller, Schlemmer, Werner, 2002] Möser, Michael; Müller, Gerhard; Schlemmer, Harald; Hans, Werner: Handbuch der Ingenieurgeodesie, Maschinen- und Anlagenbau, Löffler, Franz, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg 2002

[Ruland, R, 1999] Ruland R.; Arnett, D.; Carr, R.; Dix, B.; Fuss, B.; Le Cocq, C.; Wolf, Z., Projektbericht: VISA Undulator Fiducialization and Alignement International Workshop, Grenoble, France, Oktober 1999

[Schwarz, W., 1995] Schwarz, Wilfried: Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau, Vermessungswesen ; Konrad Wittwer, Stuttgart, 1995

[Tipler, P.A., 1994] Tipler, Paul A.: Physik, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg-Berlin 1994

[Wolf, Ruland, Dix, Arnett] Wolf, Z.; Ruland, RI; Dix, B.; Arnett, D.: Projektbericht: Alignement Tools Used To Locate A Wire And A Laser Beam In The VISA Undulator Project, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford 2002

[DESY, 2002a] URL: <http://www.desy.de/html/ueberdesy/ueber.html>
[Stand: 14 September 2002]

[DESY, 2002b] URL: <http://www.desy.de/html/forschung/forschung.html>
[Stand: 14. September 2002]

[DESY, 2000c] URL: <http://www.desy.de/hera/germ/chap2.html>
[Stand: 14. September 2002]

[DESY, 2002d]
URL: <http://www.desy.de/pr-info/desyhome/html/presse/hginfos/tesla/was.html>
[Stand: 10 Okt.2002]

[e-online 2002] URL: <http://www.e-online.de/sites/bau/020113.htm>
[Stand: 31 September 2002]

[Photowiderstand, 2002]
URL: <http://www.cip.informatik.unimuenchen.de/~michahel/refserv/photo.htm>
[Stand: 31 September 2002]