



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

# **Untersuchungen zur Nutzung eines Spiegeltools zur indirekten Anzielung von verdeckten Punkten mittels Lasertrackers**

## **Bachelorarbeit**

im

Studiengang Vermessungswesen  
der Hochschule Neubrandenburg

zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. K. Foppe  
Dr. rer. nat. T. Bräuer

vorgelegt von: Frank Niebauer

URN: [urn:nbn:de:gbv:519-thesis2009-0281-3](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:519-thesis2009-0281-3)

Neubrandenburg, August 2009



## **Untersuchung zur Nutzung eines Spiegeltools zur indirekten Anzielung von verdeckten Punkten mittels Lasertrackers**

### **Aufgabenstellung**

Trotz der hohen Anschaffungskosten haben sich Lasertracker neben anderen Industriemeßsystemen mittlerweile in der modernen Ingenieurgeodäsie als ein Standardmessverfahren im Nahbereich der Industrievermessung höchster Genauigkeiten fest etabliert. Da bei den praktischen Anwendungen häufig nicht alle Punkte von dem Standpunkt des Lasertrackers aus direkt anzuzielen sind, ist es wünschenswert, diese verdeckten Punkte indirekt über Planspiegel anzuzielen. Dazu ist es notwendig, die Lage und Orientierung des Planspiegels im Raum zu kennen. Zur Lösung dieses Problems wurde am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald ein sogenanntes Spiegeltool aufgebaut.

Der Kandidat hat die Aufgabe im Rahmen seiner Bachelorarbeit die Nutzung dieses Spiegeltools zur indirekten Anzielung von verdeckten Punkten mittels Lasertrackers durchzuführen und auszuwerten. Die praktische Aufgaben umfassen das Kalibrieren und Testen des Spiegeltools unter den Gesichtspunkten von der Auswahl der Spiegel über die Durchführung der Kalibriermessungen mit einer Koordinatenmessmaschine, Testmessungen mit dem Lasertracker unter Laborbedingungen, der praktischen Analyse und Auswertung von Vermessungen im Plasmagefäß bis hin zur Erstellung von Fertigungszeichnungen für ein optimiertes Spiegeltool.

In diesem Zusammenhang sind theoretische Fragestellungen zu lösen zur statistischen Analyse der Messunsicherheiten des Spiegeltools in Abhängigkeit von der Bestimmung der Spiegelebene bzw. des Spiegelnormalenvektors unter den Vorgaben: Abstand Laser Tracker – Spiegel, Abstand Spiegel – verdeckter Punkt und der Anzahl der sichtbaren Tooling Ball Reflectors (TBR's) auf dem Spiegeltool.

Neubrandenburg, 1. Juni 2009

*Prof. Dr.-Ing. K. Foppe*

## Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit 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. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder veröffentlicht, noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Neubrandenburg, \_\_\_\_\_

Ort, Datum

\_\_\_\_\_

Unterschrift

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald entstanden. Mit diesen Worten möchte ich mich bei allen Beteiligten bedanken, die mich während meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe und Dr. rer. nat. Torsten Bräuer für die fachliche Unterstützung und die Betreuung während der Arbeit.

Weiterführend möchte ich mich beim gesamten Messteam des Max-Planck-Institutes bedanken. Einem besonderen Dank gilt Stefan Siche, ohne dem eine Auswertung der Spiegeltoolmessungen nicht möglich wäre, Marcel Kissmann, der mich bei den Praxistestmessungen tatkräftig unterstützt hat, und Dipl.-Ing. (FH) Sven Müller, der mir bei fachlichen Fragen sehr geholfen hat.

Meinen besonderen Dank widme ich meiner Familie und meiner Freundin, die mich während der Bachelorarbeit moralisch unterstützt und mir ihr Verständnis entgegengebracht haben.

## Kurzfassung

Die Messungen mit dem Lasertracker zum Ausrichten von Bauteilen und Erfassen ihrer Position sollen genau und mit wenig Aufwand realisiert werden. Dies ist oft nicht möglich, da Sichtbehinderungen oder der fehlende Platz die Messungen einschränken oder Punkte nicht erreicht werden können. Dadurch sind mehrere Standpunkte notwendig. Der Einsatz des Spiegeltools soll die Vermessungsarbeiten im Institut erleichtern. Das Spiegeltool wird immer im Zusammenhang mit dem Lasertracker und Reflektoren verwendet. Mit dem Spiegeltool wird der ankommende Laserstrahl umgelenkt und trifft dann auf den Reflektor im zu messenden Punkt. Dadurch können verdeckte Punkte gemessen werden. Mit dem Einsatz des Spiegeltools soll sich so die Anzahl der Standpunkte verringern bei gleich bleibender oder geringfügig veränderter Genauigkeit. Oft ist nur wenig Platz für das Spiegeltool oder es ist nur ein kleiner Sichtbereich auf das Spiegeltool vorhanden, daher soll das Spiegeltool kompakt und leicht handhabbar sein. Die angestrebte Genauigkeit von 0,3 – 0,5 mm soll auch bei Messungen mit dem Spiegeltool erreicht werden. Beim Einsatz des Spiegeltools werden Zielweiten vom Lasertracker zum Spiegeltool zwischen 2 und 15 m und vom Spiegeltool zum jeweiligen Punkt zwischen 1 und 5 m vorhanden sein. Aufgrund der unterschiedlichen Lage der einzelnen Punkte und der wechselnden Ausrichtung des Spiegeltools zum Lasertracker werden statistische Untersuchungen zu folgenden Schwerpunkten durchgeführt:

- Streuung des Normalenvektors der Spiegeltoolebene
- Verhalten bei Änderung der Entfernungen zum Spiegel:
  - Abstand Lasertracker – Spiegel
  - Abstand Messpunkt – Spiegel
- Verhalten bei Änderung des Umlenk winkels des Laserstrahls  
→ Neigung des Spiegels
- Praxisnahe Anwendung des Spiegeltools

## Abstract

During assembly of Wendelstein 7-X laser trackers are used for alignment of components and final surveys of their position. All these measurements should be carried out precisely and with a minimum of efforts. Very often it is impossible to see all necessary points at a few locations of the laser tracker because the lines of sight to the targets are blocked. In such cases additional locations of laser tracker are necessary. The application of the mirror tool should make the measurement work in the institute easier. The mirror tool is always used in combination with the laser tracker and reflectors. With the mirror tool the laser beam is reflected in the direction of the target and then hits on the reflector in the point to be measured. In such a way hidden points can be measured. By using the mirror tool the number of the locations (necessary) should be decreased with the same or only a slightly higher inaccuracy. There is often only limited space for handling of the mirror tool and only small angles of sight to the mirror tool. That's why the mirror tool should be compact and handy. The aimed measurement accuracy of 0.3 – 0.5 mm should be reached by using the mirror tool. During application of the mirror tool distances between laser tracker and mirror tool will be 2 – 15 m whereas distances between mirror tool and target will be in a range of 1 – 5 m. To qualify the mirror tool in different situations of target position and orientation of the mirror tool to the laser tracker statistical analyses are made focused on the following objectives:

- Statistical variation of the normal vector of the mirror
- Accuracy dependency of the distances:
  - Distance laser tracker – mirror
  - Distance measuring point – mirror
- Accuracy dependency of the angle between laser beam from laser tracker and reflected beam → Inclination of the mirror
- Practically use of the mirror tool

# Inhaltsverzeichnis

Selbständigkeitserklärung .....	3
Vorwort .....	4
Kurzfassung .....	5
Abstract.....	6
1. Einleitung .....	9
1.1. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.....	10
1.2. Das Projekt Wendelstein 7-X.....	13
1.3. Vermessung im Institut für Plasmaphysik .....	15
2. Messhilfsmittel .....	19
2.1. Software XYZ.....	19
2.2. Aufbau und Funktionsweise eines Lasertracker .....	21
2.3. Verwendete Reflektoren und Zubehör .....	25
2.4. Aufbau des Spiegeltools.....	27
3. Durchführung der Messungen.....	29
3.1. Grundlegende Durchführung einer Messung .....	30
3.2. Streuung des Normalenvektors der Spiegeltoolebene .....	32
3.3. Änderung der Entfernung zum Spiegeltool .....	33
3.3.1. Abstand Punkt – Spiegeltool .....	33
3.3.2. Abstand Lasertracker – Spiegeltool .....	34
3.4. Änderung der Neigung des Spiegels zur Zielrichtung .....	35
3.5. Praxistest Messung am Plasmagefäß .....	37

4.Auswertung .....	39
4.1.Theoretische Betrachtung der Auswertung.....	41
4.2.Analyse des Verhaltens des Ebenennormalenvektors während der Messung.....	54
4.3.Direktvergleich des indirekt und direkt gemessenen Punktes.....	55
4.4.Analyse der Messungen bei unterschiedlicher Entfernung des Punktes zum Spiegeltool .....	57
4.5.Analyse der Messungen bei unterschiedlicher Entfernung des Lasertrackers zum Spiegeltool .....	59
4.6.Analyse der Messungen mit verschiedenen Neigungen des Spiegeltool zur Zielrichtung .....	60
4.7.Analyse der Messung mit wiederholter Einstellung des Spiegeltools.....	62
4.8.Auswertung der Plasmagefäßmessung .....	63
4.8.1.Praxistestmessung 1 .....	63
4.8.2.Praxistestmessung 2.....	68
4.9.Fehlerbetrachtung .....	69
5.Schlussfolgerung .....	70
6.Begriffe und Abkürzungen.....	71
7.Literaturverzeichnis .....	73
Abbildungsverzeichnis .....	75
Tabellenverzeichnis .....	76
Anhang .....	77



# 1. Einleitung

F. R. Helmert hat die Geodäsie mit den Worten „*Die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche*“ [9] beschrieben. Er unterteilt die Geodäsie in „*höhere Geodäsie*“ und „*niedere Geodäsie*“. Die „*höhere Geodäsie*“ umfasst die Bereiche Erdvermessung und Landesvermessung. Die Erdmessung befasst sich mit der Bestimmung der Erdfigur, einschließlich des äußeren Schwerefeldes der Erde. Als Aufgabe der Landesvermessung kann die Gewinnung von Informationen über die Oberfläche eines Landes angesehen werden. Mit Hilfe der topographischen Landesaufnahme und der Darstellung der Landflächen auf Basis der Grundlagenvermessung in den topographischen Landeskartenwerken wird diese Aufgabe realisiert. Detaillierte Information über die Erdoberfläche werden durch die „*niederen Geodäsie*“ bestimmt.

Die drei Hauptbereiche Erdmessung, Landesvermessung und Einzelvermessung sind miteinander verknüpft und ergänzen sich gegenseitig. Dabei werden Informationen über Teile der Erdmessung von der Landesvermessung bestimmt, die wiederum in die Arbeit der Erdmessung einfließen. Diese Ergebnisse werden als Grundlage für die Durchführung von Einzelvermessungen genommen.

In den dem Bereich der Ingenieurvermessung, die als Teilbereich der „*niederen Geodäsie*“ gilt, ist eine Verwendung von getrennten Bezugssystemen (Lage und Höhe) unzweckmäßig. Dadurch werden bei örtlichen begrenzten Objekten und bei Vermessungen mit höherer Genauigkeit lokale dreidimensionale Koordinatensysteme erzeugt.

Durch die Messung im dreidimensionalen Raum haben Punkte eindeutige Koordinaten. Bei einer Messung mit einer Umlenkung der Zielrichtung ist es wichtig, den Umlenkpunkt im Raum eindeutig zu bestimmen. Dies kann durch eine Bestimmung einer Ebene, in der sich der Umlenkpunkt befindet, geschehen.

Diese Bachelorarbeit umfasst die Bestimmung, unter Einbezug der Genauigkeit, einer Referenzfläche und eines indirekt gemessenen Punktes im dreidimensionalen Raum.

## 1.1. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) besteht aus zwei Instituten, die sich in Garching in Bayern und Greifswald in Mecklenburg-Vorpommern befinden. Das Institut für Plasmaphysik ist der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und dem Europäische Fusionsprogramm angehörig.

Im IPP Garching und Greifswald werden die Grundlagen für ein Fusionskraftwerk erforscht. Mit dem Fusionskraftwerk soll mit der Fusion von leichten Atomkernen Energie erzeugt werden, die der Energieentwicklung auf der Sonne ähnelt. Die Fusionsforschung in Garching wurde am TOKAMAK und am Wendelstein 7-AS durchgeführt. Mit den Erkenntnissen und der weiterführenden Forschung wurde der Wendelstein 7-X entwickelt. Dieser wird seit 2005 im Teilinstitut Greifswald montiert.

Im Max-Planck-Institut sollen die Forschungen Aufschluss darüber geben, wie aus der Verschmelzung von Atomkernen, in diesem Fall Wasserstoffatomen, Energie gewonnen werden kann. Die Forschung beinhaltet jedoch nicht nur die Methode zur Erzeugung von Energie sondern auch die Untersuchung, welche Einflüsse und deren Folgen ein sicheres Fusionskraftwerk Stand halten muss. Es werden im Institut insgesamt neun wissenschaftliche Bereiche erforscht:

- Untersuchung des Einschlusses von Wasserstoff-Plasmen hoher Temperatur in Magnetfeldern
- Entwicklung von Anlagen zur Plasmaheizung
- Entwicklung von Messverfahren zur Analyse der Plasmaeigenschaften
- Erforschung der Magnetfeldtechnik
- Datenerfassung und –verarbeitung
- Plasmatheorie

- Materialforschung
- Erforschung von Plasmawand-Wechselwirkungen
- Systemstudien zur Fusion

Die Fusion stellt einen wesentlichen Prozess bei der Bildung unseres zurzeit bestehenden Universums einschließlich unseres Sonnensystems und der Erde dar. So sind alle bekannten chemischen Elemente durch eine Fusion von Wasserstoffteilchen hervorgegangen. Im großen Maßstab trifft im heutigen Universum Fusion auf der Sonne und den Sternen auf. Es gibt 3 verschiedene Wasserstoffarten Leichter Wasserstoff (Wasserstoff), Schwerer Wasserstoff (Deuterium) und Superschwerer Wasserstoff (Tritium). Von denen gibt es Wasserstoff und Deuterium natürlich auf der Erde. Miteinander verschmelzen am leichtesten Deuterium und Tritium. Durch eine Fusion beider Wasserstoffatome entstehen ein Helium-Kern und ein Neutron (Abbildung 1). Im Gegensatz zum Deuterium, welches im Meerwasser vorhanden ist, muss Tritium innerhalb des Fusionskraftwerkes aus Lithium gebildet werden. Eine geringe Menge (1 Gramm) der beiden Brennstoffe würde ausreichen um durch die Fusion 90 000 Kilowattstunden Energie zu erzeugen. Diese Energie entspricht der Wärmeenergie, die bei der Verbrennung von 11 Tonnen Kohle entsteht.

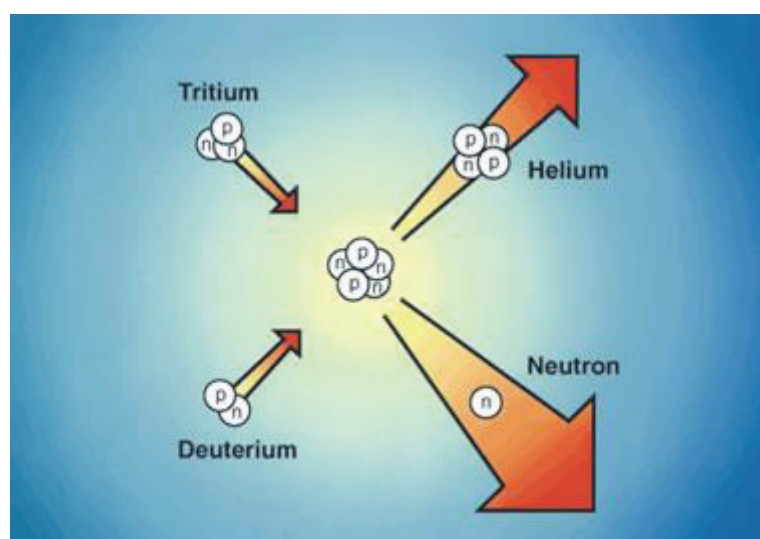


Abbildung 1: Fusion von Tritium und Deuterium [7]

Die Erkenntnis darüber, dass durch ein Fusionskraftwerk Umwelteinflüsse gering gehalten werden und die Gefahren niedrig sind, wird solch ein Fusionskraftwerk als zukünftiger Energielieferant betrachtet. Im Fusionskraftwerk wird die Fusion mithilfe eines Gemisches der Fusionskomponenten durchgeführt. Das Gemisch wird Plasma genannt und ist ein weiterer Aggregatzustand der Materie. Im natürlichen Prozess verflüssigen sich feste Stoffe, wenn die Temperatur erhöht wird. Durch weitere Einwirkung der Temperatur gehen diese Stoffe vom flüssigen Zustand in den gasförmigen Aggregatzustand über. Über diesen Zustand hinaus wird die Materie zu einem Plasma, in dem die Atome in ihre Bestandteile aufgeteilt sind. Das Plasma weicht von den Eigenschaften eines Gases stark ab. So ist das Plasma elektrisch leitend und kann durch elektrische und magnetische Felder beeinflusst werden. Um eine Fusion durchführen zu können, müssen Bedingungen erschaffen werden, die das Plasma entzünden. Die Zündbedingungen entstehen, wenn die Teilchen im Plasma oft und heftig zusammenstoßen und die Wärmeenergie nicht zu schnell nach außen abgegeben wird. Daher wird in der Fusionsanlage um das Plasma ein magnetisches Feld aufgebaut, welches das Plasma zusammen drückt und es von den Gefäßwänden fern hält. Neben der Dichte und der Wärmeisolation des Plasmas wird auch eine hohe Temperatur benötigt, damit die Fusionskomponenten vom gasförmigen Zustand zum Plasma übergehen. Auf der Sonne entstehen Fusionen schon bei 15 Millionen °C. Da die Bedingungen auf der Erde nicht gleich der auf der Sonne sind, muss diese Temperatur bei mindestens 100 Mio. °C liegen und das Plasma durch das Magnetfeld auf eine Dichte von  $10^{14}$  Teilchen pro  $\text{cm}^3$  komprimiert werden. Der Einschluss des Plasmas in ein Magnetfeld wird dadurch realisiert, dass durch den Aufbau eines ringförmigen Kraftwerks ein Ringmagnetfeld (Torusgeometrie ähnlich einem Fahrradschlauches) entsteht. Dadurch können sich die Teilchen nur noch entlang der torodial umlaufenden Magnetfeldlinien frei bewegen. Die Feldstärke nimmt zum Rand hin ab, was zur Folge hat, dass die Teilchen leichter an die Gefäßwände gelangen können und sich abkühlen. Um diese Wirkung zu minimieren, wird das Magnetfeld verdrillt. Durch diese

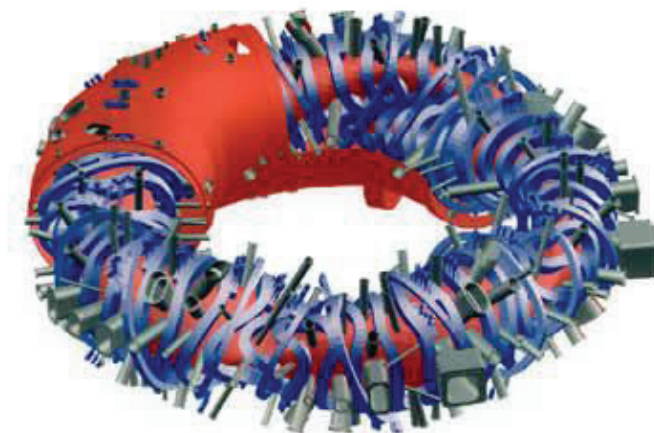
Verdrillung werden die Teilchen innerhalb des Feldes gehalten und die Dichte sowie die Temperatur bleiben annähernd auf einem Niveau.

Das Institut für Plasmaphysik ist neben dem Europäischen Gemeinschaftsexperiment JET (Joint European Torus) auch an vielen anderen Experimenten in der Fusionsforschung beteiligt.

## 1.2. Das Projekt Wendelstein 7-X

Derzeit wird im Teilinstitut Greifswald des Max-Planck-Institutes der Stellarator Wendelstein 7-X gebaut. In diesem soll das weltweit größte Fusionsexperiment auf Stellaratorbasis durchgeführt werden. Die Experimente sollen zeigen, dass mit dem Stellarator, als dauerhaftes Kraftwerk, Energie erzeugt werden kann. Neben dem Stellarator hat das Max-Planck-Institut auch den Pulsator TOKAMAK in die Forschung mit eingeschlossen. Jedoch war die Nutzung des TOKAMAK ohne Zusatzmaßnahme nur pulsweise möglich. Der Stellarator Wendelstein 7-X basiert auf den Ergebnissen des Wendelsteins 7-AS, der in Garching gebaut wurde. Er hat ein idealisiertes Magnetfeld und eine neu entwickelte Mikrowellenheizung.

Für die Erzeugung des Magnetfeldes werden zwei Arten von Spulen verwendet. Dabei handelt es sich um planare und nichtplanare Spulen.



**Abbildung 2: Kryostat, Magnetspulen und Plasmagefäß von Wendelstein 7-X [7]**

Die nichtplanaren Spulen gehören zum Aufbau des Stellarators und erzeugen das Hauptmagnetfeld. Die planaren Spulen werden im Umfang

der Forschung in Greifswald mit eingebaut. Durch die Hinzuschaltung dieser planaren Spulen soll das Hauptmagnetfeld äußerlich beeinflusst werden. Der Stellarator umfasst im Gesamten 50 nichtplanare und 20 planare supraleitende Magnetspulen. Der Spulenverband der 50 nichtplanaren Spulen bildet das verdrehte Hauptmagnetfeld, das das erhitzte Plasma umschließt. Neben diesem Kernstück des Stellarators gehören das Plasmagefäß mit dem Divertor, die Systeme zum Aufheizen des Plasmas, der Kryostat sowie die Maschinensteuerung und die Messgeräte zum experimentellen Aufbau dazu.

Im Zusammenhang mit dem Bau des Stellarators Wendelstein 7-X werden viele europäische Firmen und Forschungseinrichtungen eingebunden. So ist zum Beispiel die Mikrowellenheizung durch das Forschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart und einem europäischen Industrieunternehmen entwickelt worden und das Forschungszentrum Jülich beteiligt sich an der Entwicklung von Messgeräten. Die Finanzierung des Projektes wird durch Mitteln der Europäischen Union, des Bundes und dem Land Mecklenburg-Vorpommern gewährleistet.

#### **Technische Daten des Projektes Wendelstein 7-X:**

Größe des Experiments:	16 m Durchmesser, 5 m Höhe
Masse:	725 t
Großer Plasmaradius:	5,5 m
Kleiner Plasmaradius:	0,53 m
Magnetfeld:	3 Tesla
Entladungsdauer:	bis 30 Minuten Dauerbetrieb mit Mikrowellenheizung
Plasma:	Wasserstoff, Deuterium
Plasmavolumen:	30 Kubikmeter
Plasmamenge:	5 – 30 Milligramm
Plasmaheizung:	14 Megawatt
Plasmatemperatur:	60 – 100 Mio. °C
Plasmadichte:	bis $3 \cdot 10^{20}$ Teilchen/m <sup>3</sup>

Der Stellarator ist ein Ringsystem, das für die Montage in 5 Module aufgeteilt wurde. Ein Modul besteht auf Grund seiner Größe aus zwei Halbmodulen. Da die Halbmodule klappsymmetrisch sind, werden zur Realisierung des verdrehten Magnetfeldes nur fünf verschiedene Spulen benötigt. Ein Halbmodul besteht aus fünf nichtplanaren und zwei planare Spulen sowie dem Plasmagefäß. Die Montage der Halbmodule geschieht auf den Montageständen I/a und I/b. Die Zusammenführung beider Halbmodule wird auf dem Montagestand II durchgeführt. Diese Montagestände befinden sich in der Montagehalle. Die weiterführenden Arbeiten werden überwiegend in der Torushalle, dem Endstandort, durchgeführt. Hier werden auf den Montageständen III/a und IV/a die supraleitenden Bussysteme und die Helium-Kühlrohre installiert. Die Vorarbeiten werden durch das Einsetzen der Module in die unteren Außenschalen komplettiert. Die Endmontage umfasst die Zusammenführung aller Module auf dem Maschinenfundament, dem Anbringen der Versorgungs- und Diagnostikstutzen und dem Aufsetzen der oberen Außenschale. In der Halle 22, der Bauteilenvorbereitungshalle, werden die einzelnen Komponenten eines Halbmoduls vorbereitet. Anschließend werden die Spulen mit einigen Tests, die mit der Funktionalität zusammenhängen, in der Kryogenetik-NBI-Halle geprüft. In der Torushalle werden nach der Vollendung des Stellaratorbaus die Experimente durchgeführt.

### 1.3. Vermessung im Institut für Plasmaphysik

Ein Projekt wird dadurch realisiert, dass die Komponenten nach Modellvorgaben zusammengeführt werden. Ein wesentlicher Bestandteil ist daher die Vermessung. Bei der Montage des Stellarators Wendelstein 7-X ist die Vermessung unter anderem eine Grundlage für das Gelingen des Projekts. Die einzelnen Komponenten müssen innerhalb einer Genauigkeit zueinander passen und dem Modell entsprechen. Die Vermessung kommt von der Eingangskontrolle bis zur Endmontage der Module zum Einsatz. In den einzelnen Montageschritten der Spulen sowie der Plasmagefäße werden ständig ihre Position und Kontur mit der Vermessung überwacht

bzw. kontrolliert. Dabei wird mit Hilfe der Photogrammetrie die Form und mit dem Lasertracker der Aufbau und die Lage der Komponenten zueinander kontrolliert. Die Messungen werden mit den Soll-Koordinaten aus der Modellierung verglichen.

Die Eingangsvermessung soll Aufschluss darüber geben, inwiefern die gelieferten Komponenten (Plasmagefäße, Spulen und Außenschalen) zum Modell passen. Es werden 8H7-Passbohrungen mit dem Lasertracker gemessen, die Geometrie mit der Photogrammetrie erfasst und anschließend durch Transformation in das Soll-Koordinatensystem überprüft. Die 8H7-Passbohrungen befinden sich auf Spulenoberfläche. Durch die Transformation der gemessenen Passbohrungen in das Stellarator-Koordinatensystem ist erkennbar, ob die Passbohrungen an der richtigen Stelle angebracht worden sind und die geforderte Toleranz nicht überschritten ist. Die Passbohrungen sind für den weiteren Verlauf wichtig, da anhand dieser, die Lage der Spule überprüft oder die Spule in die richtige Lage gebracht werden kann. Die Photogrammetrie benutzt diese Punkte, um die photogrammetrische Messung in die Modellierung zu transformieren.

Der weitere Verlauf der Montage wird von der Vermessung ständig begleitet. Nach der Eingangskontrolle werden die Komponenten zu Halbmodulen zusammengesetzt. Dies beinhaltet das Ausrichten des Plasmagefäßes, der Spulenstandfüße und der Spulen sowie der Montage des Zentralringes. Für die Messungen auf den Montageständen I/a und I/b werden Referenzpunkte am Plasmagefäß bzw. Passbohrungen an der Spule mit Reflektoren ausgesteckt und kontinuierlich angezielt. Diese Punkte werden permanent gemessen. Beim Ausrichten werden die Werte der Referenzpunkte auf Null gebracht. Nach der Ausrichtung wird die tatsächliche Lage aufgemessen.

Nach der Montage der Halbmodulkomponenten in den Montageständen I/a und I/b werden die Halbmodule auf den Montagestand II umgesetzt. Während des Transports wirken äußere Kräfte auf das Halbmodul. Daher wird eine Neuvermessung des Spulenverbands durchgeführt. Auf dem Montagestand II werden die Plasmagefäß-Halbmodule zusammen-



geschweißt. Hierbei werden die Plasmagefäße in ihre Solllage ausgerichtet und für die Dauer des Schweißens fixiert. Im Montagestand II werden Punkte für die Aufbauteile wie Bolzen für Halterungen von Versorgungsleitungen abgesteckt. Nach der Fertigstellung des Moduls auf dem Montagestand II, wird es in die Torushalle umgesetzt und die Lage der Spulen sowie des Plasmagefäßes kontrolliert. In der Torushalle werden weitere Absteckungen von Punkten durchgeführt.

Die Photogrammetrie kommt dann zum Einsatz, wenn überprüft werden soll, wie die Geometrie der einzelnen Komponenten ist. Es wird aber auch die Lage der Einbauten im Plasmagefäß überprüft. Die Photogrammetrie ist eine begleitende Vermessung wie die Messung mit dem Lasertracker. Bei der Eingangsvermessung soll die Oberfläche der Spule erfasst werden und mit einem Modell verglichen werden. Zur Erstellung eines photogrammetrischen Abbilds der Spule wird diese mit reflektierenden Marken beklebt. Diese teilen sich in einfache reflektierende Klebepunkte und codierte Marken auf. Zur Kennzeichnung der Passbohrungen werden reflektierende Adapter benutzt. Diese sind codiert und müssen so gedreht sein, dass sie aus mehreren Blickwinkeln fotografiert werden können. Anhand der reflektierenden Klebepunkte, die auf der Oberfläche der Spule angebracht sind, kann die Geometrie der Spule erfasst werden. Die codierten Marken werden derart angebracht, dass durch die Photographie entstandene Bilder miteinander verknüpft werden können. Dies wird in der Nacharbeit mit der Auswertesoftware von AICON durchgeführt. Die Halbmodule werden im Montagestand I nach dem Ausrichten und Zusammenführen photogrammetrisch aufgemessen. Dabei wird die Lage der Spulen zueinander mit dem Modell verglichen. Dies ist derart wichtig, da durch die Anordnung der Spulen das Magnetfeld gegenüber dem Projekt Wendelstein 7-AS optimiert werden soll. Diese Art der Erfassung der Gesamtgeometrie der Spulen zueinander erfolgt erneut nach dem Zusammensetzen der Halbmodule auf dem Montagestand II und jedem Umsetzen des Moduls.

Die Geometrie einiger Komponenten lassen sich schwer mit dem Lasertracker oder der Photogrammetrie erfassen. Um auch diese Bauteile mit dem Modell vergleichen zu können, werden diese mit einem

Laserscanner am FARO-Arm oder nach der Lichtschnittmethode erfasst. Die Geometrie und die Position von Leitungsanschlüssen werden mit dem Taster oder Handscanner des FARO-Arms aufgenommen. Zu Beginn einer Messung mit dem FARO-Arm werden mit dem Taster die Passbohrungen an der Spule angetastet. Die Passbohrungen werden zur Transformation in das Stellaratorkoordinatensystem benutzt. Nach der Stationierung des FARO-Arms können nun Messungen mit dem Handscanner durchgeführt werden, die dann in der Auswertung mit CAD-Daten verglichen werden. Mit dem Handscanner wird die Geometrie direkt mit einem Streifenlaser erfasst und von der Software POLYWORKS verarbeitet. Zum Vergleich der eingebauten Modulkomponenten mit dem Modell werden Scans in den Montageständen durchgeführt und die Ist-Lage erfasst.

Größere Komponenten des Stellarators wie die Stützen werden nach dem Lichtschnittverfahren erfasst. Dabei werden lokale Referenzpunkte für eine Best-Fit-Transformation um das Objekt gesetzt und in einem lokalen Koordinatensystem eingemessen. Das Lichtschnittverfahren funktioniert nach dem Prinzip der Triangulation. Durch Projektion eines Linienmusters auf das Objekt und der Erfassung durch eine Kamera kann bei bekanntem Blickwinkel die Oberfläche erfasst werden. Während der Messung eines Abschnittes auf dem Objekt wird das Linienmuster derart verändert, dass der Hell-Dunkel-Abstand verringert wird. Dies dient zur Verfeinerung der Messung. Mit den Referenzpunkten und frei wählbaren Verknüpfungspunkten werden die einzelnen Bilder zusammengefügt und ergeben durch eine Best-Fit-Anpassung ein Modell, welches wiederum mit dem Modell aus der Planung verglichen werden kann.

## 2. Messhilfsmittel

### 2.1. Software XYZ

Im Bereich der Vermessung des Max-Planck-Institutes wird die Software XYZ und Metrolog für die Bedienung des Lasertrackers verwendet. Die Messungen mit dem Spiegeltool wurden mit dem Leica Lasertracker und der dazu gehörigen Software XYZ durchgeführt.

XYZ ist eine Software, die verschiedene Instrumente steuern und die Messwerte verarbeiten kann. Die Software ist für Messungen mit Theodolitsystemen, Totalstationen und Lasertrackern geeignet. XYZ ist somit eine Software für 3 dimensionale Messungen. Es arbeitet mit Datenbanken und besteht aus mehreren Modulen. Das sind das CDM (Core Data Module), PAM (Process Automation Module), STM (Single Theodolite Module), MTM (Multi Theodolite Module), LTM (Laser Tracker Module), CAD & VIEW als Zusatzmodule.

Das CDM beinhaltet die Datenverwaltung und die geometrische Datenanalyse. Im CDM können die Messwerte in andere Koordinatensysteme transformiert und bearbeitet werden.

Zur Vereinfachung von Messungen kann das Zusatzmodul PAM benutzt werden. Durch dieses Modul können Messungen vorprogrammiert werden und erleichtern somit beispielsweise den Ablauf von Überwachungsmessungen. Das PAM unterstützt alle Messfunktionen und automatisiert so die Messung.

Das STM ist ein Zusatzmodul für Messungen mit der Totalstation. Hiermit können jedoch nur Polaraufnahmen durchgeführt werden. Für Vorwärtsschnitte und Polarverfahren muss das MTM benutzt werden. Dieses kann mit mehreren Theodoliten oder Totalstationen genutzt werden.

Die 3D Vermessung mittels Lasertracker geschieht mit dem LTM. Es können wie beim MTM mehrere Stationen erstellt werden und die

gleichzeitige Nutzung mehrerer Instrumente ist gewährleistet. Es sind somit auch Vorwärtsschnitte und Polarverfahren möglich.

Zur Darstellung der gemessenen und berechneten Objekte kann das Modul CAD & VIEW benutzt werden. Mit dem Modul können die Messdaten mit CAD-Daten verglichen und mit grafischen Berichten im Soll/Ist-Vergleich dargestellt werden.

Die Anwendungsgebiete der XYZ-Software und der dazugehörigen Instrumente sind in der Montage-, der Werkzeug- und Präzisionsprüfung. Sie wird auch im Bereich des Reverse Engineering eingesetzt.

Die Alternativsoftware Metrolog hat im Gegensatz zu XYZ eine direkte Verbindung zum CAD-Bereich, d.h., dass die gemessenen Punkte und Geometrieelemente direkt angezeigt werden. Zusätzlich können mit Metrolog weitere Lasertrackerkomponenten benutzt werden, die es ermöglichen, einen Punkt handgeführt aufzumessen. Im Gesamten sind XYZ und Metrolog von der Handhabung und Auswertung bzw. den Berechnungen gleich und werden gleichwertig eingesetzt.

## 2.2. Aufbau und Funktionsweise eines Lasertracker

Im Institut werden die Lasertracker LTD 500, 800 verwendet. LTD steht für Laser Tracker Distance. In Abbildung 4 ist der grobe Aufbau des Lasertrackers dargestellt. Der Lasertracker besteht aus mehreren Umlenkspiegeln, Motoren (2), einem Positionsdetektor (PSD) (3), einem Strahlenteiler, dem Laser-Interferometer (IFM) (4), dem Absolutdistanzmesser (ADM) (5) und der Kontrolleinheit, die die Daten der Messung auswertet sowie die Motoren für die Positionierung des Laserstrahls oder zur Zielverfolgung steuert. Zusätzliche Komponente des Lasertrackers sind ein Neigungssensor und eine CCD-Kamera. Neuere Komponenten sind T-Cam, T-Probe, T-Scan und T-Mac (Abbildung 3). Die klimatischen Bedingungen im Raum können mit einer Meteostation automatisch in die Messung eingebracht werden.



**Abbildung 3: Zusatzkomponenten T-Cam, T-Probe, T-Scan, T-Mac [3][10]**

Mit dem Lasertracker werden Winkel und Distanzen gemessen. Hierfür sind im Lasertrackerkopf zwei Winkel-Encoder (1) mit den dazugehörigen Motoren (2) eingebaut. Diese drehen den Kopf um die Vertikalachse und einen Spiegel um die Horizontalachse. Die Encoder entschlüsseln die Daten der Winkelmessung. Die Distanzmessung wird mit dem Interferometer, welches Entfernungsunterschiede misst, und dem Absolutdistanzmesser gemessen. Das Laser-Interferometer (4) sendet einen Laserstrahl aus, der am Reflektor (1) reflektiert wird und in der gleichen Richtung zum Interferometer zurückgelangt. Der reflektierte Laserstrahl wird an einem Strahlenteiler teilweise auf einen zweiachsigen Photosensor (3) abgelenkt und zum Interferometer durchgelassen.

Zusätzlich wird ein Laserstrahl vom Absolutdistanzmesser (5) über einen Spiegel umgelenkt und mit dem Laserstrahl des Interferometers

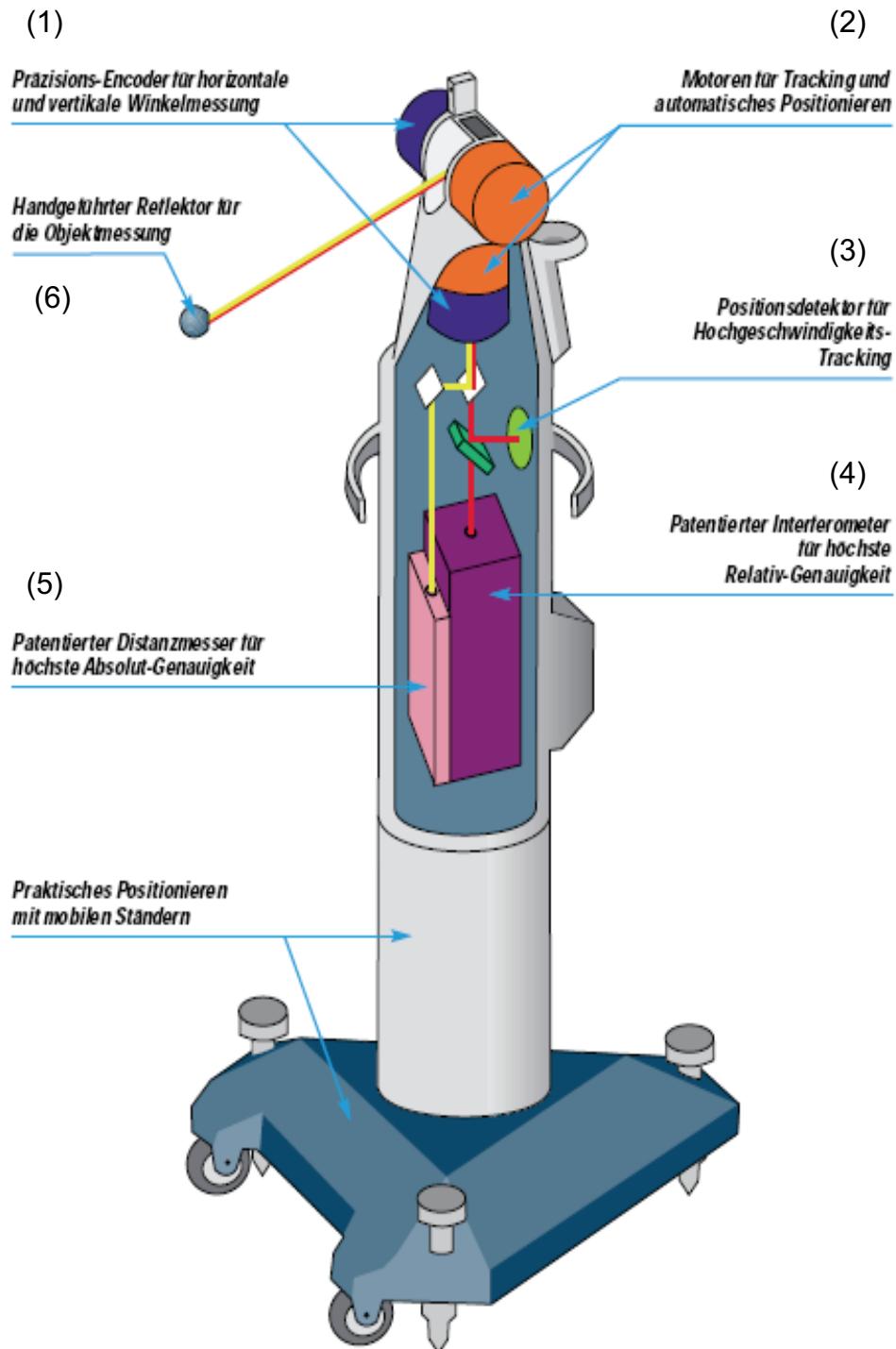


Abbildung 4: Aufbau eines Lasertrackers [4]

überlagert. Auf dem Photosensor ergibt sich durch die Bewegung des Reflektors ein Unterschied der Lage des Laserpunktes zum Koordinatenursprung des Sensors. Anhand dieses Unterschieds ist es möglich, das Ziel, in diesem Fall der Reflektor, automatisch zu verfolgen.

Das Interferometer misst Distanzänderungen. Durch eine vordefinierte Startentfernung zu einem Reflektor können absolute Distanzen angegeben werden. Eine feste Entfernung zu einem Punkt wird durch Leica derart definiert, dass am Lasertracker eine Schale, das sogenannte „Vogelbad“ befestigt ist. In der Schale sind Magnethalterungen für einen 1,5“ oder 0,5“ großen Reflektor. Die Entfernung zum „Vogelbad“ wird für den jeweiligen Reflektor in der Kalibrierung des Lasertrackers gemessen und festgelegt. Wird die Sicht zwischen Lasertracker und Reflektor gestört, so muss für eine absolute Distanzangabe der Reflektor erneut in das „Vogelbad“ oder auf einen anderen bekannten, selbst definierten Punkt, zurückgelegt werden. Das Interferometer basiert auf dem optischen Prinzip der Überlagerung einer ausgesendeten und einer reflektierten Lichtwelle. Dabei entsteht ein Wechsel von hell und dunkel, wenn sich der Reflektor bewegt. Bei der Überlagerung von Lichtwellen mit gegenseitigen Maxima wird die Welle ausgelöscht und es entsteht ein dunkles Erscheinungsbild. Überlagern sich dagegen die Wellen derart, dass beide Maxima auf einer Seite liegen, erscheint die Lichtwelle heller. Die Helligkeit der überlagerten Lichtwelle hängt von der Phasenverschiebung und der Wellenlänge ab. Das Interferometer sendet eine reine Lichtwelle, einen roten Laserstrahl aus, und empfängt den vom Reflektor reflektierten Strahl. Durch Überlagerung dieser beiden Strahlen entsteht ein Hell-Dunkel-Wechsel. Durch Zählen der Wechsel kann die Streckenänderung bestimmt werden. Daher ist es wichtig, dass bei einer Messung mit dem Interferometer der Laserstrahl nicht unterbrochen wird. Die Wellenlänge beim Leica Interferometer beträgt  $0,6 \mu\text{m}$  und ermöglicht eine sehr genaue Entfernungsbestimmung.

Damit bei einer Unterbrechung des Messstrahls während einer Messung der Reflektor nicht in die Ausgangslage zurückgelegt werden muss, ist zusätzlich ein Absolutdistanzmesser (ADM) im Lasertracker eingebaut.

Der ADM funktioniert jedoch erst ab einer Entfernung von 2 m. Der ADM sendet einen infraroten Lichtstrahl (780nm) aus, der in den Strahlengang des Interferometers eingekoppelt wird. Die Messung mit dem ADM beruht auf dem Fizeau-Prinzip. Mit Hilfe eines elektrooptischen Kristalls wird das polarisierte Licht mit einer Modulationsfrequenz von 900 MHz moduliert. Da der ADM neben dem Interferometer im Lasertracker angebracht und somit der Strahlenweg länger ist, wird eine Additionskonstante angebracht. Die Additionskonstante im Tracker beträgt 680 mm. Zu dieser inneren Additionskonstante muss noch die Additionskonstante des Reflektors hinzugerechnet werden. Diese entspricht dem Unterschied zwischen dem optischen und dem materiellen Zentrum.

Das Koordinatensystem des Lasertrackers ist derart aufgebaut, dass der Ursprung durch den Schnittpunkt der Kipp- und Drehachse definiert wird (Abbildung 5). Im Ruhezustand des Lasertrackers sind die Achsen des Basiskoordinatensystems so definiert, dass die X-Achse der Kippachse entspricht und die Y-Richtung positiv auf der gegenüberliegenden Seite des Vogelbades, rote Markierung am Trackerkopf, ist. Das Zentrum des Vogelbades und die Markierung am Trackerkopf bilden eine Achse. Die positive Z-Achse zeigt nach oben und entspricht nicht der Lotrichtung. Durch den Aufsatz eines Neigungssensors kann das Basiskoordinatensystem zur Lotrichtung ausgerichtet werden. Der Lasertracker hat einen Winkelmessbereich von  $\pm 45^\circ$  in der Vertikalen und  $\pm 235^\circ$  in der Horizontalen. Die Distanz kann bis 35 m gemessen werden. Die Nullrichtung des Horizontalkreises entspricht in etwa der roten Markierung am Trackerkopf (Richtung der positiven Y-Achse) und sollte vor der Initialisierung des Lasertrackers eingestellt werden.



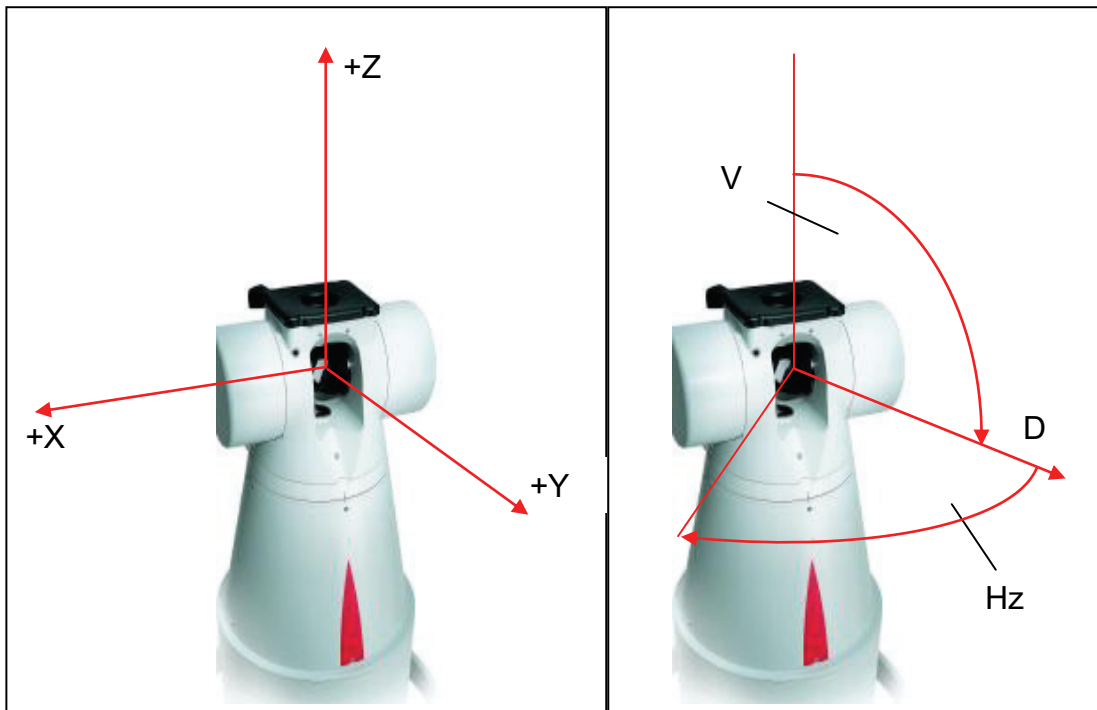


Abbildung 5: Koordinatensystem und Messelemente des Lasertrackers [4]

### 2.3. Verwendete Reflektoren und Zubehör

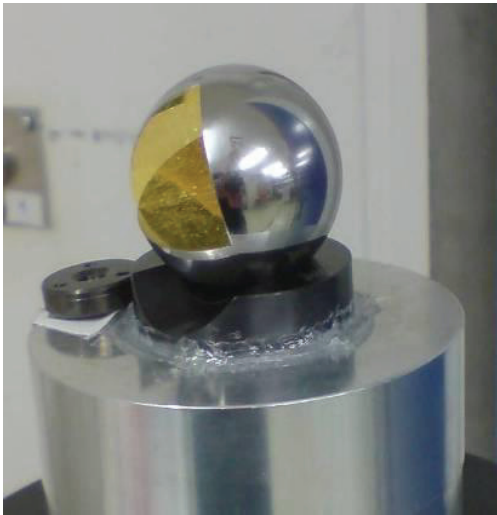
Für die Messungen mit dem Lasertracker ist es notwendig spezielle Reflektoren zu verwenden. Diese Reflektoren sind derart aufgebaut, dass der ankommende Strahl parallel reflektiert wird. Durch die Kontrolleinheit wird der Kopf des Lasertrackers so gedreht, dass der Laserstrahl die Mitte des Reflektors trifft und sich die Laserstrahlen überlagern. Dadurch wird garantiert, dass der Weg des ankommenden gleich dem des reflektierten Strahls ist.

Die Realisierung eines parallelen Strahlenganges wird mit dem Tripel-Spiegel-Reflektor (CCR – Corner Cube Reflector), dem Katzenaugen-Reflektor (CER - Cat-eye Reflector) oder dem Messkugel-Reflektor (TBR - Tooling Ball Reflector) realisiert. Für einen festen Einbau eines Reflektors wird meist ein RFI (Reflector for Fixed Installation) verwendet. Die Größen der Reflektoren sind auf 1,5“ und 0,5“ beschränkt.

Der Tripel-Spiegel-Reflektor besteht aus 3 rechtwinklig zueinander angeordneten ebenen Spiegeln und ist in ein Metallgehäuse eingefasst. Der Katzenaugen-Reflektor besteht aus mindestens zwei unterschiedlich

großen Glaskugeln. Dagegen bestehen die Messkugel-Reflektoren aus einem kleinen Glasprisma. Für die Vermessung können auch bruchsihere Reflektoren verwendet werden. Der bruchsihere Reflektor (BRR - Break Resistant Reflector) ist dem Tripel-Spiegel-Reflektor nachempfunden. Er ist eine Stahlkugel mit 3 senkrecht aufeinander stehenden beschichteten Flächen.

Bei den Messungen im Labor sind die TBRs (Tooling Ball Reflectors) und der BRR (Break Resistant Reflector) (Abbildung 6) verwendet worden. Für die Messungen im Plasmagefäß wurden auch Tripel-Spiegel-Reflektoren (CCR – Corner Cube Reflector) ausgesteckt.

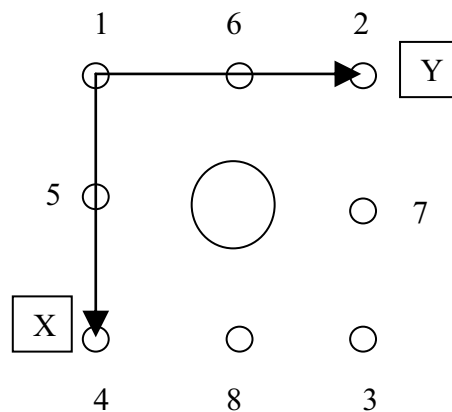
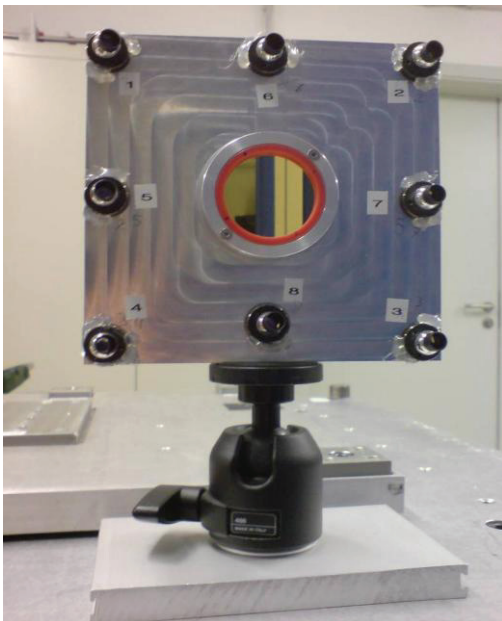


**Abbildung 6: Break Resistant Reflector (BRR)**

Die Referenzpunkte werden oft durch Bohrungen vermarktet. Um die Reflektoren auf diesen Punkten fixieren zu können, wurde von der Firma Hubbs ein Adapter entwickelt, der die Verbindung zwischen der Bohrung und dem Reflektor herstellt. In diesen Haltern (Supports) sind Magnete integriert, die das metallene Gehäuse des Reflektors festhalten. Durch die Auflage der Reflektoren in der Magnethalterung sind die Reflektoren immer über den Messpunkt zentriert. Die Supports sind für die verschiedenen Größen der Reflektoren erhältlich. Die Reflektoren können in jede beliebige Richtung ausgerichtet werden.

## 2.4. Aufbau des Spiegeltools

Das Spiegeltool besteht im Wesentlichen aus einer ebenen Aluminiumplatte, einem oberflächenbeschichtetem Planspiegel sowie den Halterungen (Supports) für die 0,5" TBRs. Die Aluminiumplatte ist an einem freibeweglichen Kugelkopf, der durch eine Klemme fest gestellt werden kann, befestigt (Abbildung 8). Für die Messungen im Labor ist das Spiegeltool auf einem Fotostativ befestigt (Abbildung 9). Bei der Messung



**Abbildung 7: Koordinatensystem der Kalibrierung**

**Abbildung 8: Spiegeltool mit Halterung; Alu-Platte zum Aufbau auf Alu-Balken und TBRs**



**Abbildung 9: Halterung Spiegeltool im Labor und im Plasmagefäß**

Plasmagefäß, ist der Kugelkopf mit dem Spiegeltool an einer Aluminiumplatte befestigt, die auf einen Aluminiumbalken im Plasmagefäß mit Nutzensteinen befestigt werden kann.

Das Spiegeltool hat eine Größe von 170 x 170 mm. Um den mittig angebrachten Planspiegel sind 8 Supports befestigt. Diese 8 Supports liegen annähernd am Rand der Aluminiumplatte. In den 8 Supports werden für die Messung TBRs eingesetzt, die zum Lasertracker ausgerichtet werden. Durch die Messung der TBRs soll eine Ebene beschrieben werden, die als Referenzfläche des Spiegeltools fungiert.

Das Spiegeltool wird auf einer Koordinatenmessmaschine kalibriert. Der daraus entstandene Datensatz wird für die Auswertung der Messungen mit dem Spiegeltool verwendet und beinhaltet die Koordinaten der TBRs in den Supports und den Antastpunkten der Spiegeloberfläche. Bei jeder Messung wird ein TBR 10mal und die Spiegeloberfläche 13mal angetastet. Die Messung mit der Koordinatenmessmaschine wird 3mal durchgeführt und die Mittelwerte als Kalibrierdaten gespeichert.

Das Koordinatensystem des Spiegeltools (Abbildung 7) wird durch die Kalibrierung derart festgelegt, dass im Punkt 1 der Koordinatenursprung liegt und die X-Achse durch den Punkt 4 geht. Die Y-Achse verläuft rechtwinklig dazu in Richtung des Punktes 2. So ergibt sich, dass die XY-Ebene des TBR-Koordinatensystems durch die Punkte 1, 2 und 4 geht. Die Z-Achse ergibt sich durch die Komplettierung des rechtwinkligen mathematischen Koordinatensystems und hat ihre positive Richtung zum Lasertracker.

### 3. Durchführung der Messungen

Jede Messung bedarf einer gründlichen Vorbereitung. Dazu gehört neben der praktischen Vorbereitung auch die theoretische Vorbereitung. Wird davon ausgegangen, dass die Oberfläche des Spiegels am Spiegeltool eben ist, so muss der Einfallswinkel des Laserstrahls gleich dem

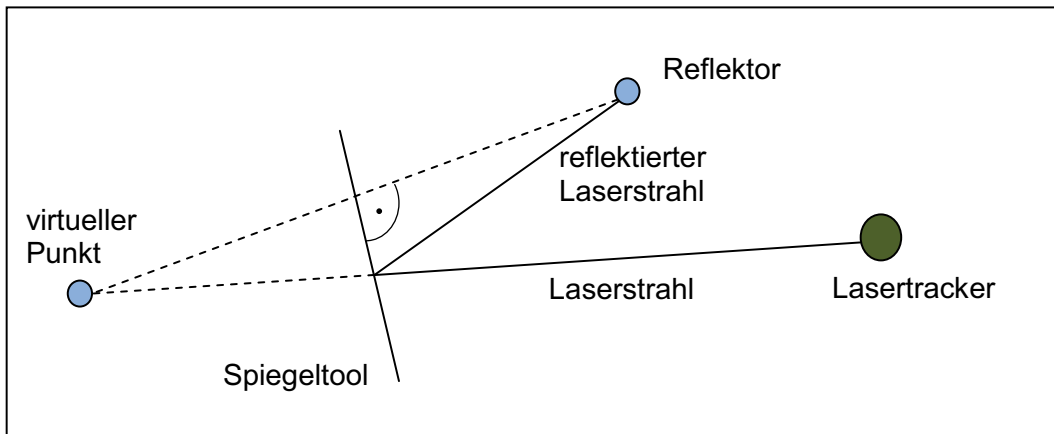


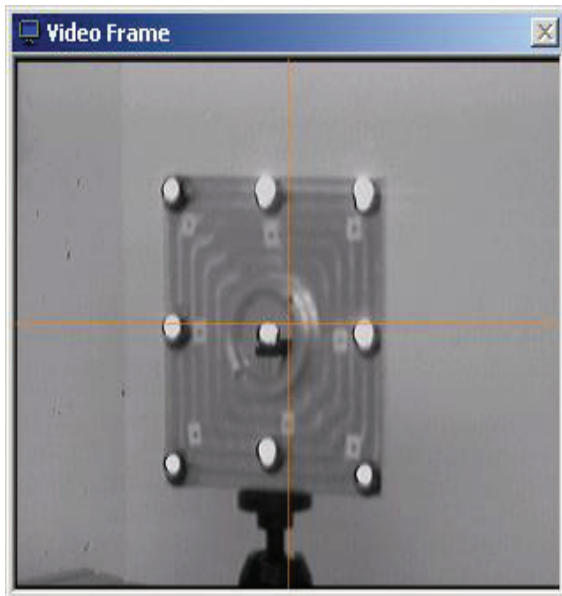
Abbildung 10: Messungsaufbau

Ausfallswinkel sein. Somit ergibt sich die Überlegung, dass der indirekt gemessene Punkt bei einer Spiegelung an der Spiegelfläche die gleichen X- und Y-Koordinaten sowie eine entgegengesetzte Z-Koordinate haben muss (Abbildung 10).

Bei den Testmessungen im Labor werden die Punkte indirekt mit dem Spiegeltool und direkt mit dem Lasertracker gemessen. Die direkte Messung des Punktes ergibt für den Versuchsaufbau Soll-Koordinaten des Punktes zum Vergleich, ob die Koordinaten aus der indirekten Messung nach der Auswertung gleich der der Direktmessung sind. Werden das Spiegeltool, der zu messende Punkt und der Lasertracker über die Dauer einer Messung nicht verändert, so müssen die Ergebnisse der jeweiligen Tests miteinander vergleichbar sein.

### 3.1. Grundlegende Durchführung einer Messung

Für die Messungen mit dem Spiegeltool werden der Lasertracker, das Spiegeltool und der zu messende Punkt im Labor festgelegt. Das Spiegeltool muss nun so ausgerichtet werden, dass der Laserstrahl über den Spiegel auf den zu messenden Punkt umgelenkt wird. Hierzu wird der Laser grob auf die Mitte des Spiegels gerichtet. Durch Lösen der Klemme am Kugelkopf kann der Spiegel so eingestellt werden, dass der umgelenkte Laserstrahl auf den ausgerichteten Reflektor trifft. Für die Bestimmung der Spiegeltoolebene müssen die TBRs am Spiegeltool zum Lasertracker hin ausgerichtet werden.

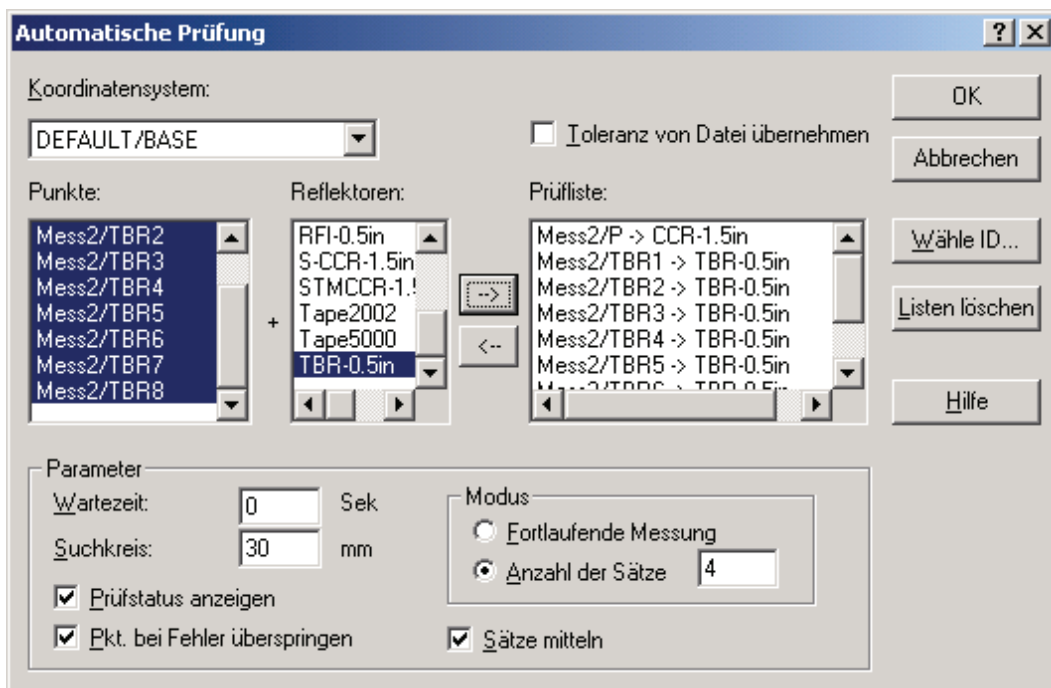


**Abbildung 11: CCD-Kameraansicht der Reflektoren**

Nach dem Ausrichten der Messutensilien kann die eigentliche Messung beginnen. Die Messungen werden mit der Auto-Inspect-Funktion von XYZ durchgeführt. Dafür benötigt XYZ ein Referenzdatensatz. Die Referenzdaten dienen dazu, dass die Position automatisch grob angesteuert und die aktuelle Position eines Punktes gemessen werden kann.

Die Auto-Inspect-Funktion ist eine Vergleichsfunktion zwischen Soll-Daten und dem Ist-Zustand eines Punktes. Der Referenzdatensatz für die Messung mit dem Spiegeltool besteht aus den 8 TBR-Koordinaten und der Punktkoordinate des indirekt angemessenen Punktes. Für die

Referenzkoordinaten werden die TBRs nacheinander mit der Übersichtskamera angezielt und gemessen (Abbildung 11). Nach dem Messen der TBRs wird der zu messende Punkt über den Spiegel angezielt und gemessen. Die erzeugten Messdaten müssen nun in die Referenz kopiert werden. Beim Starten der Auto-Inspect-Funktion werden nun die zuvor gemessenen Referenzpunkte und die dazugehörigen Reflektorarten ausgewählt (Abbildung 12). Mit der Auto-Inspect-Funktion können einzelne Messwerte oder Mittelwerte gespeichert werden. Weiterhin kann die Anzahl der Umläufe, wie oft die Punkte angesteuert werden sollen, eingestellt werden. Es ist sinnvoll die Messungen mit 4 Umläufen durchzuführen. Damit die Messwerte nicht miteinander vermischt werden, ist es wichtig, die Referenzmessung umzubenennen. Dies gilt auch für die



**Abbildung 12: Auswahl von Auto-Inspect-Punkten**

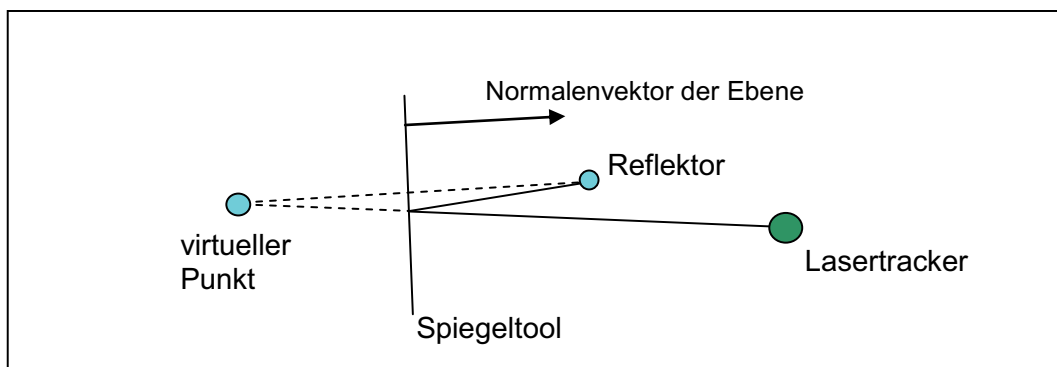
weiteren Testmessungen, da bei jedem Versuchsaufbau mehrere Messungen mit der gleichen Aufstellung durchgeführt werden. Je Versuchsaufbau wird eine Referenzmessung solange benutzt, bis eine Veränderung am Aufbau gemacht wird. Ist die Messung zum eingestellten Punkt beendet, wird der nächste zu messende Punkt eingestellt und erneut ein Referenzdatensatz erzeugt.

Die Nacharbeit der Messung besteht darin, dass der mit dem Spiegeltool gemessene Punkt die Koordinaten erhält, als wäre er direkt gemessen

worden. Durch die Messung mit dem Spiegeltool wird ein virtueller Punkt erzeugt, der hinter dem Spiegel in Zielrichtung des Lasertrackers liegt. Die gewünschten realen Koordinaten des Punktes werden durch eine Transformation in die Spiegelebene und ein Negieren der Z-Koordinaten erzeugt.

### 3.2. Streuung des Normalenvektors der Spiegeloolebene

Mit diesem Versuch soll gezeigt werden, inwiefern sich der Messfehler auf die Lage des Normalenvektors der Spiegelebene im Raum auswirkt. Die Veränderungen der Messungen untereinander werden erkennbar, wenn die Normalenvektoren der Ebene durch die TBRs der jeweiligen Messung miteinander verglichen werden. Der Versuchsaufbau zur Analyse der Streuung des Normalenvektors der Spiegelebene wurde so gewählt, dass



**Abbildung 13: Aufbauschema zur Analyse des Normalenvektors**

ein möglichst geringer Einfluss der Strahlenlenkung vorhanden ist. Hierzu wurden der Lasertracker, das Spiegeltool und der Reflektor nahezu in einer Linie aufgebaut (Abbildung 13).

Eine aussagekräftige Anzahl an Messungen wird hier mit 49 Messungen angenommen. Der Messaufbau wird während der 49 Messungen nicht verändert. Nach der Auto-Inspect-Messung wird der Punkt direkt gemessen. (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.2)

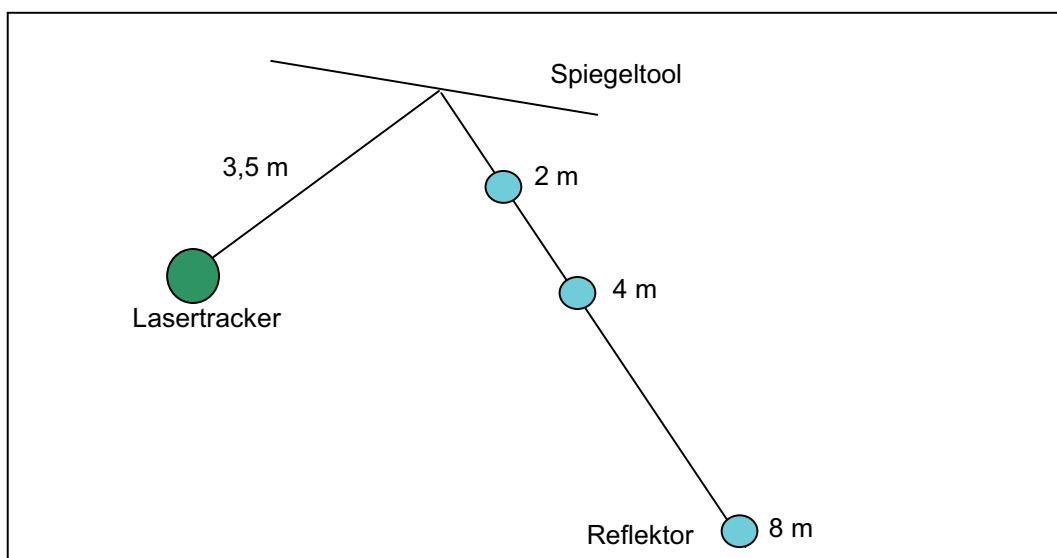
Um eine Aussage über die Genauigkeit der Messung mittels Spiegeltool machen zu können, werden die gleichen Messwerte benutzt und die gespiegelten mit den direkt gemessenen Punkten verglichen. (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.3)



### 3.3. Änderung der Entfernung zum Spiegeltool

#### 3.3.1. Abstand Punkt – Spiegeltool

Ein weiterer Versuchsaufbau soll Erkenntnisse über die Streuung der Messungen geben, bei denen der Abstand zwischen dem zu messenden Punkt und dem Spiegeltool verändert wird. Es werden drei Punkte in einem Abstand von ca. 2, 4 und 8 m zum Spiegeltool, auf einer Linie



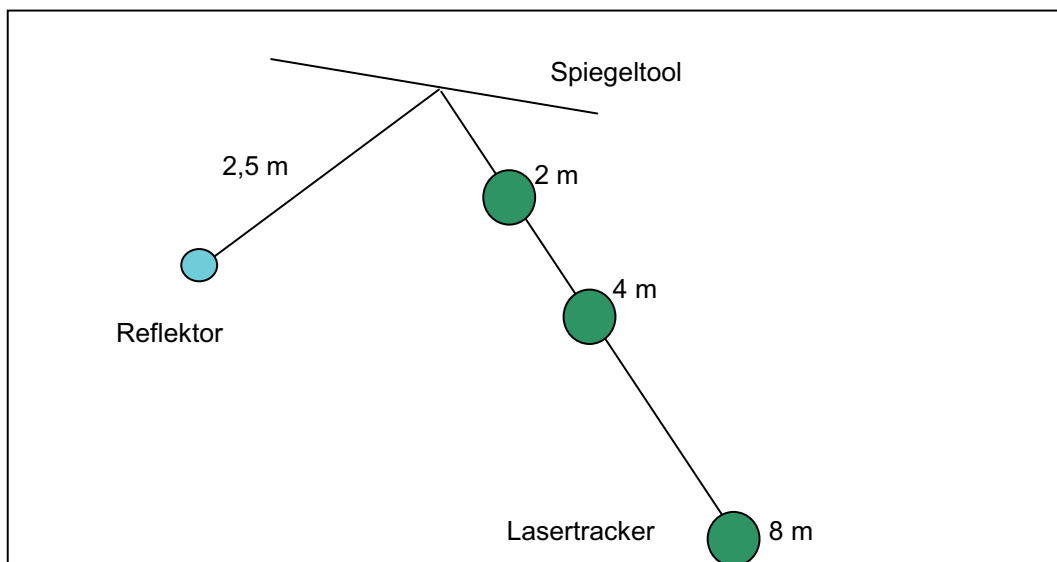
**Abbildung 14: Veränderung Abstand Punkt zum Spiegeltool**

liegend, markiert (Abbildung 14). Desweiteren werden während der Messung der Lasertracker und das Spiegeltool in ihrer Position nicht verändert. Dadurch sollen Fehlereinflüsse durch die Spiegeleinstellung nicht zum Tragen kommen. Der Laserstrahl wird auf den jeweiligen Punkten annähernd um den gleichen Winkel umgelenkt. Wie die Abbildung 14 zeigt, stehen der Lasertracker, das Spiegeltool und der Punkt annähernd in einem Winkel von  $90^\circ$ . Bei diesem Versuchsaufbau steht der Lasertracker in ca. 3,5 m Entfernung zum Spiegeltool. Es werden je Punkt 25 Messungen mit je 4 Umläufen gemessen. Für den Soll-Ist-Vergleich der Punktkoordinaten der Indirektmessung und der Direktmessung wird der Punkt vor und nach den 25 Messungen direkt gemessen. Die Werte der Direktmessung werden gemittelt. Die direkte Messung des Punktes vor und nach den 25 Messungen gibt eine

Aussage, ob der Punkt sich zwischenzeitlich bewegt hat oder stabil geblieben ist. (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.4)

### 3.3.2. Abstand Lasertracker – Spiegeltool

Die Genauigkeit einer Messung wird nicht nur durch die unterschiedliche Entfernung des Punktes zum Spiegeltool bestimmt, sondern auch vom Abstand des Lasertrackers zum Spiegeltool. Der Abstand des Lasertrackers zum Spiegeltool bestimmt die Genauigkeit der Messung der TBRs und somit die Bestimmung der Spiegeltoolebene. Die Anordnung des Lasertrackers, des Spiegeltools und des zu messenden Punktes wird annähernd aus dem Versuchsaufbau der Abstandsänderung des Punktes

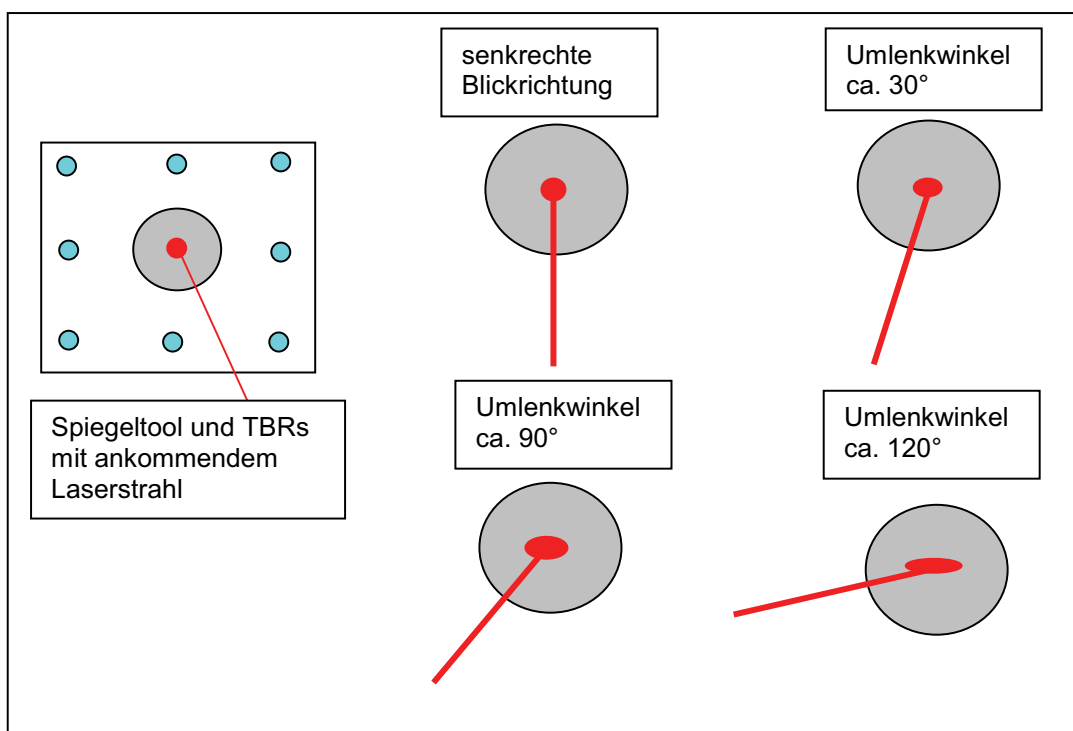


**Abbildung 15: Veränderung Abstand Lasertracker zum Spiegeltool**

übernommen. Es werden wiederum Markierungen für die Abstände des Lasertrackers zum Spiegeltool in 2, 4 und 8 m auf einer Linie liegend gemacht. Der Punkt steht in 2 m Entfernung zum Spiegeltool und annähernd rechtwinklig zur Zielrichtung des Lasertrackers zum Spiegeltool (Abbildung 15). Sind die 25 Messungen auf der ersten Markierung durchgeführt worden, wird der Lasertracker über die nächste Markierung gestellt und eine Referenzmessung durchgeführt. (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.5)

### 3.4. Änderung der Neigung des Spiegels zur Zielrichtung

Trifft der Laserstrahl senkrecht auf den Spiegel des Spiegeltools auf, so ist das Aussehen des Auftreffpunktes etwa kreisrund. Wird das Spiegeltool weiter aus der Zielrichtung herausgedreht, so trifft der Laserstrahl nicht mehr senkrecht auf und es entsteht ein ellipsenartiger Auftreffpunkt. Je mehr das Spiegeltool aus der Zielrichtung herausgedreht wird, desto größer wird die Ellipse des Auftreffpunktes (Abbildung 16). Es entsteht ein



**Abbildung 16: Auftreffpunkt bei unterschiedlicher Zielrichtung des LT auf den Spiegel** schleifender Schnitt des Laserstrahls mit der Spiegelfläche. Zur Analyse inwieweit die Veränderung des Auftreffpunktes vom Kreis zu einer stark gestreckten Ellipse Auswirkung auf die Genauigkeit einer Messung hat, werden unterschiedliche Umlenkwinkel augenscheinlich eingestellt. Das prinzipielle Einsatzgebiet des Spiegeltools umfasst Umlenkwinkel von 0° bis 180°. Jedoch ist der Einsatz des Spiegeltools nur bis zu einem bestimmten Umlenkungswinkel sinnvoll. Die Messungen wurden aus diesem Grund nur bis 120° durchgeführt. Für die Untersuchung der Auswirkungen auf die Messungen sind Winkel von etwa 30, 60, 90 und 120° eingestellt worden. Da die Auswirkung einer Verdrehung des Spiegels in der horizontalen Richtung gleich der einer Kippung in der

vertikalen Richtung ist, wird in einer ersten Messreihe die Messung auf die horizontale Veränderung des Winkels beschränkt. Um die Einwirkung einer vertikalen Verstellung des Spiegeltools zu Minimieren, sind die drei Komponenten der Messung, der zu messende Punkt, der Lasertracker und das Spiegeltool, annähernd in einer Höhe aufgebaut.

In einer zweiten Messreihe wurde die Auswirkung einer Veränderung der Winkels in horizontaler und vertikaler Richtung getestet. Hierzu wird der Laserstrahl um  $90^\circ$  in der horizontalen und um  $30^\circ$  in der vertikalen Richtung umgelenkt. Dies ergibt einen Umlenkwinkel im Raum von  $100^\circ$ . (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.6)

In der Praxis werden die Punkte einmalig eingestellt, die Messung durchgeführt und der nächste Punkt eingestellt. Es kann jedoch passieren, dass ein Punkt erneut eingestellt werden muss. Daher wird bei einem weiteren Test nach jeder Auto-Inspect-Messung der Punkt neu eingestellt. Für diesen Versuch bleiben der Lasertracker und der zu messende Punkt unverändert. Der Laserstrahl wird um etwa  $90^\circ$  umgelenkt. Je Spiegeleinstellung werden 4 Auto-Inspect-Umläufen durchgeführt. Insgesamt wurden 25 Spiegeleinstellungen gemacht. Nach jedem erneuten Einstellen des Spiegeltools muss ein Referenzdatensatz gemessen werden. Der Punkt wird je Versuchsanordnung einmal vor und nach den 25 Messungen direkt gemessen. (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.7)

### 3.5. Praxistest Messung am Plasmagefäß

Der Praxistest soll zeigen, inwiefern das Spiegeltool außerhalb von Laborbedingungen einsetzbar ist. Für diesen Test wird das Spiegeltool auf die Aluminiumplatte (Abbildung 8) und für den Verlauf der Messung im Plasmagefäß auf einen Aluminiumbalken ( Abbildung 18) befestigt.



Abbildung 17: Plasmagefäßreferenzpunkt

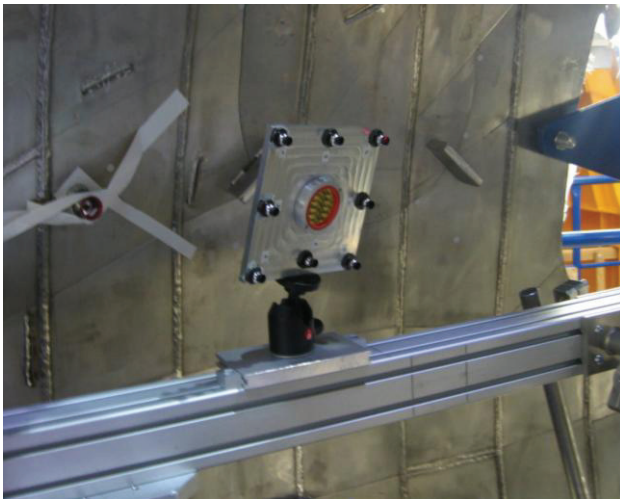


Abbildung 18: Einbau im Plasmagefäß

Das Plasmagefäß des Moduls 1 steht auf dem Montagestand IV in der Torushalle. Im Umfang der Messung werden die Gefäßreferenzpunkte im Plasmagefäß (Abbildung 17) mittels Spiegeltool gemessen. Diese Gefäßreferenzpunkte werden zum Beispiel für die Ausrichtung des Plasmagefäßes bei der Zusammenführung zweier Halbmodule genutzt. In diesem Plasmagefäß sind 35 Gefäßreferenzpunkte angebracht. Im Vergleich mit einer direkten Lasertrackermessung entfällt beim Einsatz des Spiegeltools eine Vielzahl von Standpunkten, da mit dem Spiegeltool verschiedene Winkel eingestellt und somit mehrere verdeckte Punkte von einem Standpunkt aus gemessen werden können. Die Messungen von außen in das Plasmagefäß können nur von den Öffnungen an den Enden des Gefäßes oder durch die Stützenöffnungen des Plasmagefäßes durchgeführt werden. Die Wahl einer geeigneten Stützenöffnung kann mit der Übersichtskamera des Lasertrackers vereinfacht werden. Für den Einbau des Spiegeltools wird mittels Laserstrahls der mögliche Sichtbereich des Lasertrackers abgefahren. Der Planspiegel des

Spiegeltools muss mittig im Sichtbereich der Stutzenöffnung sein. Während der Messung auf dem Montagestand IV stand der Lasertracker in einer Entfernung von etwa 6 m und die Punkte lagen in Entfernungen von 1 bis 4 m zum Spiegeltool. Insgesamt wurden bei der Messung 22 Punkte von dem Standpunkt aus gemessen. 6 Punkte sind für die Transformation ins Koordinatensystem des Plasmagefäßes direkt und 16 über das Spiegeltool gemessen worden. Je eingestellten Punkt wurde ein Referenzdatensatz erzeugt, mit dem die 4 Auto-Inspect-Umläufe der Messung für diesen Punkt durchgeführt wurden. Danach wurde der nächste Punkt eingestellt und wieder ein Referenzdatensatz für die Messung erzeugt. Zur Überprüfung der Messung wurde eine zweite Messung durchgeführt. Anhand von Soll-Koordinaten kann nach der Auswertung der Messungen überprüft werden, ob die Messungen mit dem Spiegeltool im Montagestand durchführbar sind. Aufgrund der Ergebnisse aus dieser ersten Testmessung wurde ein zweiter Praxistest durchgeführt. (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.8.1)

Im zweiten Praxistest wurden vordergründig die Genauigkeit der Messung und die Abweichungen zwischen zwei Messungen betrachtet. Der Test



**Abbildung 19: Spiegeltool mit eigenem Referenzpunkt**

wurde in der Montagehalle am Plasmagefäß des Moduls 4 auf dem Montagestand II durchgeführt. Eine Erweiterung der Messung bestand darin, dass durch selbst ausgesteckte Referenzpunkte (Abbildung 19) die Bewegung des Plasmagefäßes über den Messzeitraum erfasst werden soll. Desweiteren wurden die Gefäßreferenzpunkte direkt gemessen und somit eigene Soll-Koordinaten erzeugt. Die Referenzpunkte, zur Kontrolle

der Messungen, wurden auf das Plasmagefäß gesetzt und konnten durch ihre Anordnung während einer Auto-Inspect-Messung direkt gemessen werden. Die Soll-Koordinaten der Plasmagefäßpunkte wurden von einem zweiten Standpunkt aus gemessen. Hierfür wurden als Verknüpfungspunkte Wandpunkte in der Montagehalle genutzt, die vorher vom ersten Standpunkt ebenfalls gemessen wurden. Beim Bestimmen der Soll-Koordinaten der Gefäßpunkte wurden die Referenzpunkte mitgemessen. Für die Messung am Plasmagefäß wurde der Lasertracker auf ein ausfahrbares Stative gestellt. So konnte durch eine Stutzenöffnung in das Plasmagefäß gezielt und gemessen werden. Das Spiegeltool wurde wie beim ersten Test auf einem Aluminiumbalken temporär befestigt. Da in der ersten Testmessung gezeigt wurde, dass von einem Standpunkt mit dem Spiegeltool mehr Punkte aufgemessen werden können als bei einer Direktmessung, wurde die Messung auf 8 Plasmagefäßpunkte begrenzt. Je Punkt wurde eine Auto-Inspect-Messung mit 4 Umläufen gemessen und die Messwerte gemittelt. Die Auto-Inspect-Messung beinhaltete das Anzielen der 8 TBRs, des zu messenden Punktes und die Referenzpunkte zur Kontrolle der Plasmagefäßbewegung während der Messung. (numerische Ergebnisse → Kapitel 4.8.2)

## 4. Auswertung

Die Nacharbeit der Messungen erfolgte mit der Leica Software XYZ. Die Ergebnisse der Nacharbeit wurden mit EXCEL analysiert.

Die Kalibrierung des Spiegeltools ergab, dass die Oberfläche des Planspiegels aus der TBR-Ebene herausragt und zu dieser leicht geneigt ist. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass die Spiegeloberfläche plan ist. Es wurden mehrere Qualifizierungsmessungen des Spiegeltools mit der Koordinatenmessmaschine durchgeführt. Bei der ersten Messung hatte der Planspiegel einen Versatz zur TBR-Ebene in Richtung des Ebenennormalenvektors um  $40\ \mu\text{m}$  und eine Neigung zu dieser Ebene um  $30\ \mu\text{m/m}$  in X-Richtung und  $175\ \mu\text{m/m}$  in Y-Richtung. Die erste Nachmessung des Spiegeltools mit der Koordinatenmessmaschine zeigte

eine Veränderung der Spiegelneigung zur TBR-Ebene. In der X-Richtung hatte der Spiegel eine Neigung von  $149 \mu\text{m}/\text{m}$  und in der Y-Richtung  $103 \mu\text{m}/\text{m}$ . Nach einer Optimierung des Spiegeltools, in der die Supports mit Hülsen von hinten befestigt worden sind, wurde erneut eine Messung durchgeführt. Durch die Veränderung am Spiegeltool ist ein neuer Koordinatensatz erzeugt und für die weiteren Messungen benutzt worden. Der Spiegel hat nun einen Offset in Richtung des TBR-Ebenennormalenvektors von ca.  $57 \mu\text{m}$ . Die Neigung der Spiegelfläche zur TBR-Ebene ist in X-Richtung  $112 \mu\text{m}/\text{m}$  und in Y-Richtung  $35 \mu\text{m}/\text{m}$ . Nach mehreren Messungen mit dem Spiegeltool wurde überprüft, ob es eine Veränderung am Spiegeltool gegeben hat. Es wurde festgestellt, dass sich die Koordinaten der TBRs, im Gegensatz zum ersten Vergleich, nicht verändert haben. Die Neigung der Spiegelfläche zur TBR-Ebene ist auch annähernd unverändert. Die Neigung beträgt in X-Richtung  $106 \mu\text{m}/\text{m}$  und in Y-Richtung  $40 \mu\text{m}/\text{m}$ . Dadurch dass die Spiegelfläche aus der TBR-Ebene herausragt, müssen die Referenzdaten in die Spiegelebene transformiert werden. Hierzu wird in *AXYZ* mit den Spiegelflächenpunkten eine Best-Fit-Ebene erzeugt und als Koordinatensystem eingestellt. Der aus der Transformation entstandene Koordinatensatz der Kalibrierung wird als Referenzdatensatz verwendet.

Während einer Messung werden die Messwerte im Lasertracker-Koordinatensystem, dem sogenannten Base-Koordinatensystem, gemessen. Für die Auswertung werden in *AXYZ* die Daten der Kalibrierung eingelesen. Die Messwerte müssen für die Spiegelung an der Spiegelfläche in das Koordinatensystem der Spiegelebene transformiert werden. Für die Transformation werden die gemessenen Koordinaten der TBRs auf die Koordinaten der TBRs aus der Kalibrierung transformiert. In *AXYZ* müssen die Transformationspunkte gleichnamig sein. Durch diese Transformation wird ein neues Koordinatensystem, im weiteren Verlauf als Messkoordinatensystem bezeichnet, erzeugt. Dieses Koordinatensystem hat denselben Ursprung und die Koordinatenachsen wie das Spiegelkoordinatensystem der Kalibriermessung.

Nachdem alle Messungen, das heißt die Messungen je angezielten Punkt, in die Spiegelebene transformiert worden sind, wird das jeweilige



Messkoordinatensystem eingestellt. Da der Eintrittswinkel gleich dem Austrittswinkel und die Spiegelfläche plan ist, kann der Punkt an der Spiegelebene gespiegelt werden. Das heißt, dass die Z-Koordinate des Punktes negiert wird und somit der Punkt an der Stelle sich befindet, an der er liegen würde, wenn dieser direkt gemessen worden wäre. Damit die Messwerte nicht verändert werden, wird der Punkt kopiert, umbenannt und dann gespiegelt. Der gespiegelte Punkt wird in das Arbeitsverzeichnis zurückkopiert und entspricht, nach dem Einstellen des Ursprungs-koordinatensystems, dem einer Direktmessung.

#### 4.1. Theoretische Betrachtung der Auswertung

Die Software XYZ vollführt während einer Messung einige Schritte der Nacharbeit einer Messung. Mit dem Lasertracker werden Winkel und Strecken gemessen. Die angegebenen Messwerte eines Punktes ergeben sich aus einer mehrmaligen Bestimmung innerhalb einer Anzielung. Somit sind die Messwerte eines Punktes Mittelwerte. XYZ berechnet während einer Messung die Koordinaten eines gemessenen Punktes und die Standardabweichungen der Koordinaten. Außerdem wird eine Qualitätsangabe über die Messung mit dem RMS-Wert (Root Mean Square) gemacht. Der RMS-Wert ist die Wurzel des Quotienten aus der Summe der quadratischen Abweichungen zum Mittelwert durch die Anzahl der Messwerte einer Messung und wird nach folgender Formel berechnet:

$$RMS_{resid} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i^2}{N}}$$

Um eine geodätische strenge Aussage über die Genauigkeit einer Messung machen zu können, sollte anstatt durch die Anzahl der Messwerte N durch die Anzahl der Freiheitsgrade f geteilt werden. Somit erhält man die Standardabweichung eines Messwertes.

Für die Messung mit dem Spiegeltool werden Referenzmessungen je zu messenden Punkt durchgeführt. Die Referenzmessung wird für die Auto-Inspect-Messung verwendet. Beim Ausführen einer Auto-Inspect-Messung

werden die Standardabweichungen der Koordinaten von der Referenzmessung übernommen. Es wird lediglich der RMS-Wert neu berechnet und kann als Aussage über die Qualität der Auto-Inspect-Messung genutzt werden.

Für die Auswertung der Messungen mit dem Spiegeltool werden verschiedene Koordinatensysteme erzeugt. Um eine Aussage über die Genauigkeit einer Messung machen zu können, werden der gespiegelte und der direkt gemessene Punkt miteinander verglichen. Dies geschieht im Koordinatensystem des reflektierten Laserstrahls (Strahlenkoordinatensystem). Das Strahlenkoordinatensystem hat seinen Ursprung im Durchstoßungspunkt des Laserstrahls mit der Spiegelfläche und die Z-Achse durch den gespiegelten Punkt. Der Durchstoßungspunkt liegt in der XY-Ebene des Messkoordinatensystems, das bei der Transformation der Messung auf die Kalibrierdaten des Spiegeltools entsteht. In AXYZ ist es nicht möglich einen Schnittpunkt von einer Linie und einer Koordinatenebene zu berechnen. Daher muss im Messkoordinatensystem eine Ebene erzeugt werden, die der XY-Ebene des Messkoordinatensystems entspricht. Es wird eine Best-Fit-Fläche durch die Punkte der Spiegelfläche gelegt. Diese Fläche entspricht der XY-Ebene des Messkoordinatensystems. Zur Berechnung der Best-Fit-Fläche werden drei Startpunkte benötigt. Diese definieren das Koordinatensystem der Fläche. Dabei wird mit dem ersten Punkt der Koordinatenursprung und mit dem zweiten Punkt die X-Achse festgelegt. Die XY-Ebene wird durch den dritten Punkt definiert. Die Z-Achse steht senkrecht auf der XY-Ebene und vervollständigt das rechtwinklige mathematische Koordinatensystem.

Für die Erzeugung der Best-Fit-Fläche können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden. Es können die Anzahl der benutzten Punkte und die Wahl der Startpunkte verändert werden. Weiterhin können Rotationsparameter und Ursprungskoordinaten eingestellt werden. Im Folgenden wurden die einzelnen Möglichkeiten ausgetestet.

Ebene über alle Spiegelpunkte		i	j	k	Länge NV
Spiegelebene	Startpunkte	mm	mm	mm	mm
Test_1	Sp1 P2, 3, 5	0,00021011	0,00005405	0,99999998	1,00000000
Test_2	Sp1 P1, 2, 3	0,00021011	0,00005405	0,99999998	1,00000000
Test_3	Sp3 P1, 2, 3	0,00021011	0,00005405	0,99999998	1,00000000
Test_4	Sp1 P10, 11, 12	-0,00021011	-0,00005405	-0,99999998	1,00000000
Test_5	Sp2 P3, Sp1 P8, 3	0,00021011	0,00005405	0,99999998	1,00000000

**Tabelle 1: Best-Fit-Ebenen über 39 Spiegelpunkte mit unterschiedlichen Startpunkten**

Die Flächen der Tests 1 – 5 (Tabelle 1) sind mit unterschiedlichen Startpunkten aber gleichen Einstellungen bei den Parametern erzeugt worden.

Spiegelpunkte je Antastmessung		i	j	k	Länge NV
Spiegelebene	Startpunkte	mm	mm	mm	mm
Test_6	Sp1 P1, 2, 3	0,00020968	0,00004655	0,99999998	1,00000000
Test_7	Sp2 P1, 2, 3	0,00021272	0,00004670	0,99999998	1,00000000
Test_8	Sp3 P1, 2, 3	0,00020762	0,00006478	0,99999998	1,00000000
Mittelwert		0,00021001	0,00005268	0,99999998	

**Tabelle 2: Best-Fit-Ebenen je Antastmessung des Spiegels (13 Spiegelpunkte)**

In der Kalibrierung des Spiegeltools wurde die Spiegelfläche mit drei Messungen mit je 13 Antastpunkten bestimmt. Die Berechnungen der Best-Fit-Ebenen werden mit diesen drei Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Tests 6 – 8 (Tabelle 2) zeigen, dass die Einheitsvektoren der einzelnen Spiegelflächenmessungen sich unterscheiden. Die Mittelwerte der Eigenvektoren sind annähernd die Beträge der Eigenvektoren bei einer Best-Fit-Ebene mit allen Spiegelpunkten (39) wie in Tabelle 1. Beim Verringern der Anzahl der Punkte, die zur Erzeugung einer Best-Fit-Ebene verwendet werden, ändern sich die Eigenvektoren der Fläche.

Rotationswinkel fixiert		i	j	k	Länge NV
Spiegelebene	Startpunkte	mm	mm	mm	mm
Test_9	Sp1 P1, 2, 3	0,00000000	0,00000000	1,00000000	1,00000000

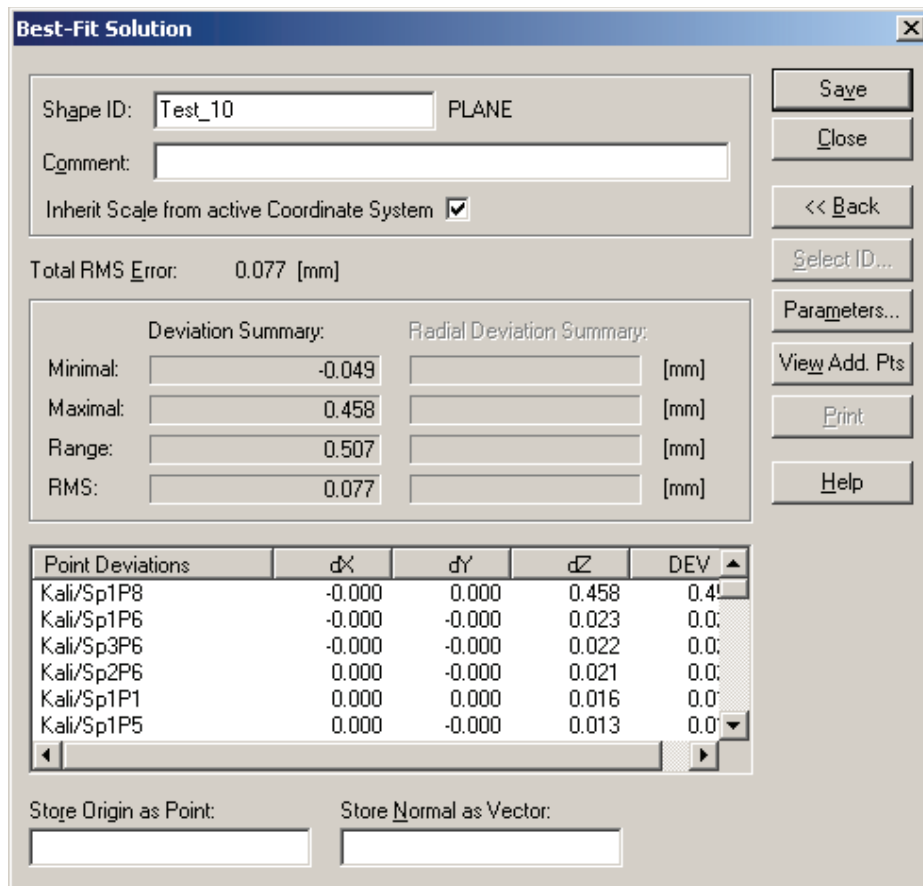
**Tabelle 3: Best-Fit-Ebene Rotationsparameter fixiert**

Beim Test 9 (Tabelle 3) sind die Rotationsparameter festgelegt worden. Bei der Best-Fit-Ebenenenerstellung müssen die drei Rotationsparameter festgelegt werden. Im Test 9 wurden die Drehwinkel um die X- und Y-Achse mit 0° und der Drehwinkel um die Z-Achse mit 180° festgelegt. Die Ebene liegt parallel zur XY-Ebene des eingestellten Koordinatensystems.

Punkt 8 in Z verschlechtert		i	j	k	Länge NV
Spiegelebene	Startpunkte	mm	mm	mm	mm
Test_10	Sp1 P1, 2, 3	-0,00112652	0,00128537	0,99999854	1,00000000
Test_11	Sp1 P8, 4, 3	0,00112652	-0,00128537	-0,99999854	1,00000000

**Tabelle 4: Best-Fit-Ebene mit einem Ausreißer in der Z-Koordinate (SP1 P8)**

Die Tests 10 und 11 sind mit einem stark veränderten Z-Wert im Punkt 8 der ersten Spiegelantastmessung erzeugt worden. Der Punkt hat einen 10fach veränderten Wert. Dadurch liegt die Ebene wiederum anders im Raum als mit den ursprünglichen Spiegelpunkten. Durch die Veränderung der Z-Koordinate bekommt der Punkt 8 in der Best-Fit-Ebenenerstellung die größte Verbesserung und Standardabweichung (Abbildung 20).



**Abbildung 20: Lösung der Best-Fit-Ebenenerstellung**

Werden die Ergebnisse verglichen, so ist ersichtlich, dass die Wahl der Startpunkte unwichtig ist. Die Beträge der Einheitsvektoren  $i$ ,  $j$  und  $k$  unterscheiden sich nicht. Die Normalenvektoren haben je nach Wahl der Punkte unterschiedliche Richtungen. Deshalb wurde bei der Auswertung der Messungen darauf geachtet, dass immer die gleichen Startpunkte

genommen worden sind. Weiterhin wurden die Spiegelflächen mit allen Punkten der Kalibrierung erstellt.

Mit der Festlegung der Parameter bei der Best-Fit-Flächenerzeugung, wird die Fläche in eine festgelegte Position geschoben oder gedreht. Das kann nützlich sein, wenn die Messergebnisse aus einer bestimmten Position aus betrachtet werden sollen.

Durch das Arbeiten mit einer Bediensoftware für Vermessungsinstrumente wie XYZ oder Metrolog werden einzelne Bearbeitungsschritte der Auswertung durch die Software erledigt. Die Berechnungen laufen im Hintergrund ab und die Ergebnisse sind sofort verfügbar. Dadurch werden die Messungen vereinfacht und die Nachbearbeitungszeit verkürzt.

Mit dem Lasertracker werden Winkel und Strecken gemessen. Mit diesen berechnet XYZ Koordinaten, die im eingestellten Koordinatensystem angezeigt werden. Durch Einstellen eines anderen Koordinatensystems werden diese Koordinaten in das neue Koordinatensystem mit transformiert. Es kann aber auch eine Best-Fit-Transformation auf einen Referenzdatensatz durchgeführt werden. Durch Angabe der Transformationspunkte werden die neuen Koordinaten berechnet und im neuen Koordinatensystem angezeigt.

Im Ursprungskordinatensystem werden die Koordinaten der TBRs einer Messung berechnet. Anschließend wird die Messung auf den Kalibrierdatensatz des Spiegeltools transformiert.

Die Berechnung der Genauigkeiten der Koordinaten wird mit dem Varianzfortpflanzungsgesetz durchgeführt, da genauso viele Unbekannte wie Beobachtungen vorhanden sind ( $f = n - u$ ;  $f = 0$ ). Es werden die Koordinaten mit den gemessenen Winkeln und der Strecke berechnet und mit dem Varianzfortpflanzungsgesetz kann eine Aussage über die Genauigkeit der Koordinaten gemacht werden.

Die Koordinaten werden nach folgenden Formeln berechnet:

$$X = D \cdot \sin Hz \cdot \sin V \qquad Y = D \cdot \cos Hz \cdot \sin V \qquad Z = D \cdot \cos V$$

Das Varianzfortpflanzungsgesetz lautet:  $\Sigma_{XX} = F \cdot \Sigma_{LL} \cdot F^T$

Die Funktionalmatrix F entsteht aus der Ableitung der Koordinaten nach den einzelnen Beobachtungen. Daraus ergeben sich folgende Differenzialquotienten der einzelnen Komponenten der Matrix:

$$\frac{\partial X}{\partial H_z} = D \cdot \cos H_z \cdot \sin V$$

$$\frac{\partial X}{\partial V} = D \cdot \sin H_z \cdot \cos V$$

$$\frac{\partial X}{\partial D} = \sin H_z \cdot \sin V$$

$$\frac{\partial Y}{\partial H_z} = -D \cdot \sin H_z \cdot \sin V$$

$$\frac{\partial Y}{\partial V} = D \cdot \cos H_z \cdot \cos V$$

$$\frac{\partial Y}{\partial D} = \cos H_z \cdot \sin V$$

$$\frac{\partial Z}{\partial H_z} = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial V} = -D \cdot \sin V$$

$$\frac{\partial Z}{\partial D} = \cos V$$

Für die Berechnung der 8 TBR-Koordinaten werden je Punkt 2 Winkel und eine Strecke benötigt. Daraus folgt, dass die Funktionalmatrix und die Kovarianzmatrix der Beobachtungen eine 24x24 Matrix sein muss. Durch Matrizenmultiplikation entsteht eine 24x24 Kovarianzmatrix der Koordinaten.

Beobachtungsvektor:

L =	HZ1	357.9769	°
	HZ2	358.7842	°
	HZ3	358.8050	°
	HZ4	357.9943	°
	HZ5	357.9855	°
	HZ6	358.3824	°
	HZ7	358.7946	°
	HZ8	358.4000	°
	V1	90.8361	°
	V2	90.9699	°
	V3	91.9109	°
	V4	91.7852	°
	V5	91.3097	°
	V6	90.9032	°
	V7	91.4395	°
	V8	91.7851	°
	D1	8753.896	mm
	D2	8835.918	mm
	D3	8796.712	mm
	D4	8714.290	mm
	D5	8733.791	mm
	D6	8794.673	mm
	D7	8816.015	mm
	D8	8757.815	mm

Standardabweichungen der Beobachtungen:

$$\begin{aligned}\sigma_{Hz} &= 0.0006 \text{ }^\circ \\ \sigma_v &= 0.0006 \text{ }^\circ \\ \sigma_D &= 0.0025 \text{ mm}\end{aligned}$$

Koordinaten der Punkte

	X	Y	Z
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
TBR1	-309.001	8747.508	-127.738
TBR2	-187.455	8832.663	-149.567
TBR3	-183.355	8789.908	-293.329
TBR4	-304.843	8704.724	-271.473
TBR5	-306.934	8726.113	-199.625
TBR6	-248.231	8790.076	-138.632
TBR7	-185.401	8811.282	-221.470
TBR8	-244.414	8750.152	-272.813

Standardabweichung der Koordinaten:

	X	Y	Z
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
TBR1	0,002	0,002	0,002
TBR2	0,002	0,002	0,002
TBR3	0,002	0,002	0,002
TBR4	0,002	0,002	0,002
TBR5	0,002	0,002	0,002
TBR6	0,002	0,002	0,002
TBR7	0,002	0,002	0,002
TBR8	0,002	0,002	0,002

Mit den erhaltenen Koordinaten und den dazugehörigen Standardabweichungen kann eine Best-Fit-Transformation auf einen Referenzdatensatz durchgeführt werden.

Die Transformation beinhaltet 3 Translationen, 3 Rotationen und eine maßstäblich Veränderung. Somit lautete die Formel zur Transformation aus einem Startkoordinatensystem in ein Zielkoordinatensystem:

$$\begin{bmatrix} X_Z \\ Y_Z \\ Z_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + m \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}$$

Die Rotationsmatrix R beinhaltet die Rotation um die drei Koordinatenachsen X, Y und Z.

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_1 & \sin \varepsilon_1 \\ 0 & -\sin \varepsilon_1 & \cos \varepsilon_1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_2 & 0 & -\sin \varepsilon_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon_2 & 0 & \cos \varepsilon_2 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_3 & \sin \varepsilon_3 & 0 \\ \sin \varepsilon_3 & \cos \varepsilon_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = R_3 \cdot R_2 \cdot R_1$$

Von den Punkten gibt es Koordinaten im Start- und im Zielkoordinatensystem. Die Transformationsparameter sind unbekannt und müssen vorab geschätzt oder näherungsweise berechnet werden.

Eine Berechnung der Drehwinkel kann über die Normalenvektoren zweier Ebenen und den eingeschlossenen Winkel erfolgen. Hierfür wird im Start- und im Zielsystem eine Ebene durch drei Punkte gelegt. Anschließend wird der Winkel zwischen beiden Normalenvektoren berechnet.

$$\cos \varepsilon = \frac{|\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2|}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2|}$$

Nach der Berechnung des ersten Drehwinkels werden die Koordinaten aus dem Startsystem um die X-Achse gedreht. Nun werden erneut Ebene im gedrehten System und im Zielsystem gebildet, der Drehwinkel berechnet und eine Drehung um die Y-Achse durchgeführt. Der letzte Drehwinkel wird wie die anderen Winkel berechnet. Nach der Drehung um die Z-Achse müssen die Komponenten des Verschiebungsvektors berechnet werden.

$$\Delta \vec{x} = \vec{X}_Z - \vec{X}_S$$



Berechnete Näherungswerte:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= 1,32152 \text{ rad} \\ \varepsilon_2 &= 0,62796 \text{ rad} \\ \varepsilon_3 &= 4,76112 \text{ rad} \\ \Delta x &= 1720,969 \text{ mm} \\ \Delta y &= -4913,553 \text{ mm} \\ \Delta z &= 7063,159 \text{ mm}\end{aligned}$$

Mit den Näherungswerten der Drehung und Verschiebung werden Näherungskordinaten berechnet.

Die Näherungen der Transformationsparameter werden in einer Ausgleichung verbessert. Die Ausgleichung wird nach vermittelnden Beobachtungen durchgeführt und beinhaltet folgende Formeln:

Elemente der Rotationsmatrix

$$x_s = (\cos \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3 \cdot (X_z - \Delta x)) + ((-\cos \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (Y_1 - \Delta y)) + (\sin \varepsilon_2 \cdot (Z_z - \Delta z))$$

$$\begin{aligned}y_s &= ((\cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_3 + \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x)) \\ &+ ((\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 - \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y)) \\ &+ ((-\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2) \cdot (Z_z - \Delta z))\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}z_s &= ((\sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_3 - \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x)) \\ &+ ((\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 + \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y)) \\ &+ ((\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2) \cdot (Z_z - \Delta z))\end{aligned}$$

Konfigurationsmatrix

$$A = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial X} \right)_{n,u} = \left( \begin{array}{ccc} \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial X_1} \right)_0 & \cdots & \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial X_u} \right)_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{\partial \Phi_n}{\partial X_1} \right)_0 & \cdots & \left( \frac{\partial \Phi_n}{\partial X_u} \right)_0 \end{array} \right)$$

Ableitungen der Elemente der Rotationsmatrix nach den jeweiligen Unbekannten:

$$\frac{\partial x_s}{\partial \varepsilon_1} = 0$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial \varepsilon_2} = -\sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3 \cdot X_z - \Delta x + \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3 \cdot Y_1 - \Delta y + \cos \varepsilon_2 \cdot Z_z - \Delta z$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial \varepsilon_3} = -\cos \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3 \cdot X_z - \Delta x - \cos \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3 \cdot Y_1 - \Delta y + 0$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial \Delta x} = -\cos \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial \Delta y} = \cos \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial \Delta z} = -\sin \varepsilon_2$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \varepsilon_1} = (-\sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_3 + \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x) + (-\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 - \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y) + (-\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2) \cdot (Z_z - \Delta z)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \varepsilon_2} = (\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x) + (-\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y) + (\sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2) \cdot (Z_z - \Delta z)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \varepsilon_3} = (\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 - \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x) + (-\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 - \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y) + 0$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \Delta x} = -(\cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_3 + \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \Delta y} = -(\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 - \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \Delta z} = \sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2$$

$$\frac{\partial z_s}{\partial \varepsilon_1} = (\cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_3 + \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x) + (\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 - \sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y) + (-\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2) \cdot (Z_z - \Delta z)$$

$$\frac{\partial z_s}{\partial \varepsilon_2} = (-\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x) + (\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y) + (-\cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2) \cdot (Z_z - \Delta z)$$

$$\frac{\partial z_s}{\partial \varepsilon_3} = (\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 + \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3) \cdot (X_z - \Delta x) + (-\sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_3 + \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3) \cdot (Y_z - \Delta y) + 0$$

$$\frac{\partial z_s}{\partial \Delta x} = -(\sin \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_3 - \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \cos \varepsilon_3)$$

$$\frac{\partial z_s}{\partial \Delta y} = -(\sin \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_3 + \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_3)$$

$$\frac{\partial z_s}{\partial \Delta z} = -\cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2$$

Bei der Ausgleichsrechnung werden die aus den Messwerten berechneten Koordinaten der TBRs als Beobachtungsvektor verwendet. Die genäherten Beobachtungen werden mit den Koordinaten der Kalibrierung, die als fehlerfrei gelten, und den Näherungswerten berechnet.

Kalibrierkoordinaten	X	Y	Z
	mm	mm	mm
TBR1	-75,947	-75,269	-0,077
TBR2	-76,248	74,741	-0,069
TBR3	73,750	75,047	-0,065
TBR4	74,042	-74,968	-0,043
TBR5	-0,957	-75,125	-0,054
TBR6	-76,097	-0,261	-0,060
TBR7	-1,241	74,898	-0,055
TBR8	63,901	0,007	-0,050

Daraus ergibt sich folgender Vektor der genäherten Beobachtungen  $L_0$ :

$$L_0 = \begin{pmatrix} -307,730 \\ 8742,131 \\ -127,894 \\ -186,489 \\ 8829,298 \\ -142,234 \\ -180,326 \\ 8796,671 \\ -288,511 \\ -301,554 \\ 8709,480 \\ -274,156 \\ -304,644 \\ 8725,798 \\ -201,019 \\ -247,099 \\ 8785,706 \\ -135,062 \\ -183,397 \\ 8812,975 \\ -215,379 \\ -241,358 \\ 8755,239 \\ -271,585 \end{pmatrix}$$

Weitere Berechnungen werden mit folgenden Formeln durchgeführt:

gekürzter Beobachtungsvektor

$$l = L - L_0$$

Kofaktormatrix der Beobachtungen

$$Q_{LL} = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma_{LL}$$

Gewichtsmatrix

$$P = Q_{LL}^{-1}$$

Absolutgliedvektor

$$n = A^T \cdot P \cdot l$$

Normalgleichungsmatrix

$$N = A^T \cdot P \cdot A$$

Inversion der Normalgleichungsmatrix

$$Q_{\hat{x}\hat{x}} = N^{-1}$$

Ausgeglichene gekürzte Unbekannte

$$\hat{x} = Q_{\hat{x}\hat{x}} \cdot n$$

Verbesserungsvektor

$$v = A \cdot \hat{x} - l$$

Varianz der Gewichtsmatrix

$$s_0^2 = \frac{v^T \cdot P \cdot v}{n - u}$$

Ausgeglichene Unbekannte

$$\hat{X} = X_0 + \hat{x}$$

Ausgeglichene Beobachtung

$$\hat{L} = L + v$$

Kofaktormatrix der ausgeglichenen Beobachtungen

$$Q_{\hat{L}\hat{L}} = A \cdot Q_{\hat{x}\hat{x}} \cdot A^T$$

Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Unbekannten

$$\Sigma_{\hat{x}\hat{x}} = s_0^2 \cdot Q_{\hat{x}\hat{x}}$$

Die Ausgleichsrechnung wird mehrmals durchgeführt. Hierbei wird  $L_0$  erneut mit dem Vektor der ausgeglichenen Unbekannten berechnet. Der ausgeglichene Vektor der Unbekannten wird zum Näherungsvektor der Unbekannten. Die Ausgleichung ist solange zu wiederholen bis  $v^T \cdot P \cdot v$  minimal ist. Nach 5 Durchläufen haben sich die Werte der Minimierung nicht signifikant verändert.

Die ausgeglichenen Parameter und Beobachtungen sind:

$$\hat{X} = \begin{array}{l|l} 1,26202 & \text{rad} = 72,3083^\circ \\ 0,62558 & \text{rad} = 35,8430^\circ \\ 4,74424 & \text{rad} = 271,8251^\circ \\ 2311,205 & \text{mm} \\ -4805,923 & \text{mm} \\ 6967,897 & \text{mm} \end{array}$$

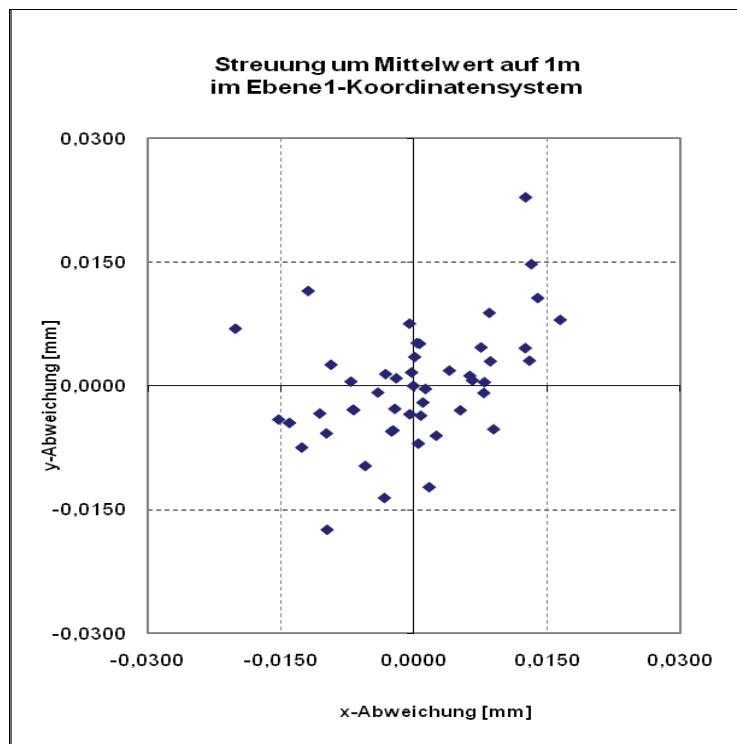
$\sigma_{\varepsilon 1} =$	0,0090	°
$\sigma_{\varepsilon 2} =$	0,0072	°
$\sigma_{\varepsilon 3} =$	0,0062	°
$\sigma_{\Delta x} =$	1,058	mm
$\sigma_{\Delta y} =$	0,967	mm
$\sigma_{\Delta z} =$	0,641	mm

$$\hat{L} = \begin{array}{l|l} -309,004 & \text{mm} \\ 8747,482 & \text{mm} \\ -127,751 & \text{mm} \\ -187,467 & \text{mm} \\ 8832,658 & \text{mm} \\ -149,590 & \text{mm} \\ -183,345 & \text{mm} \\ 8789,933 & \text{mm} \\ -293,315 & \text{mm} \\ -304,868 & \text{mm} \\ 8704,734 & \text{mm} \\ -271,460 & \text{mm} \\ -306,938 & \text{mm} \\ 8726,101 & \text{mm} \\ -199,599 & \text{mm} \\ -248,226 & \text{mm} \\ 8790,062 & \text{mm} \\ -138,668 & \text{mm} \\ -185,395 & \text{mm} \\ 8811,286 & \text{mm} \\ -221,458 & \text{mm} \\ -244,388 & \text{mm} \\ 8750,170 & \text{mm} \\ -272,808 & \text{mm} \end{array}$$

Mit den ausgeglichenen Koordinaten und der zugehörigen Kovarianzmatrix (siehe Anhang G) können beliebige Punkte vom Startkoordinatensystem in das Zielkoordinatensystem transformiert werden.

## 4.2. Analyse des Verhaltens des Ebenennormalenvektors während der Messung

Für die Analyse der Streuung des Ebenennormalenvektors während einer Messung wurden 49 Messungen durchgeführt (Kapitel 3.2). Diese Messungen müssen nun auf die Kalibrierung des Spiegeltools transformiert werden. Es entstehen daraus 49 Messkoordinatensysteme. Es ist von Vorteil, wenn die Transformationen im Base-Koordinatensystem durchgeführt werden. Nachdem die einzelnen Messkoordinatensysteme erzeugt worden sind, wird für die jeweilige Auswertung das dazugehörige Messkoordinatensystem eingestellt. Durch das Einstellen des Koordinatensystems werden andere Messwerte mit transformiert. In diesem Messkoordinatensystem wird eine Best-Fit-Ebene erzeugt, die durch die TBRs aufgespannt wird. Durch das Einstellen der Ebene1 als Koordinatensystem werden die Eigenvektoren des Normalenvektors der anderen TBR-Ebenen in XYZ angezeigt. Für die Darstellung der Streuung werden die Angaben der Einheitsvektoren  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  und  $\mathbf{k}$  auf einen Meter normiert. Bei der Betrachtung im Koordinatensystem der Ebene 1 werden die Abweichungen um den Mittelwert in X und Y des Normalenvektors der TBR-Ebene dargestellt. Wie im Diagramm 1 zu erkennen ist, kam als Ergebnis heraus, dass über den Zeitraum der 49 Messungen der Normalenvektor um  $\pm 0,015$  mm je Meter streut.

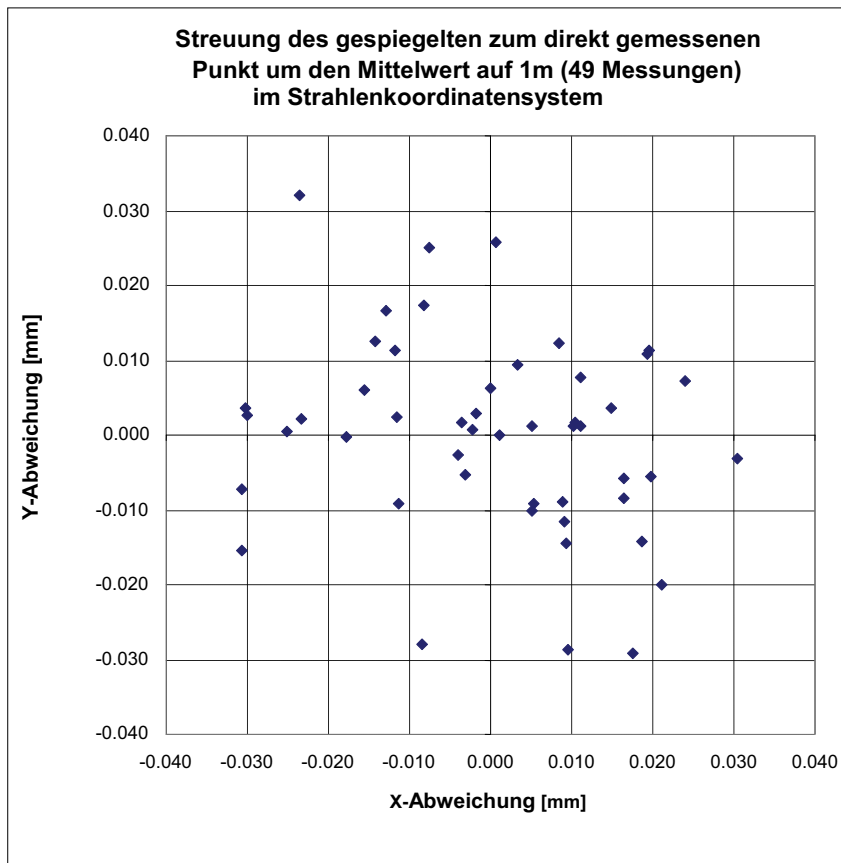


**Diagramm 1: Streuung der Normalenvektoren der Ebenen um den Mittelwert auf 1 m im Koordinatensystem der Ebene 1**

### 4.3. Direktvergleich des indirekt und direkt gemessenen Punktes

Mit denselben Messwerten dieser 49 Messungen soll gezeigt werden, inwiefern die indirekt gemessenen Punkte gegenüber den direkt gemessenen Punkten je Messung abweichen. Hierzu werden die Messungen im Koordinatensystem des reflektierten Laserstrahls (Strahlenkoordinatensystem) betrachtet. Um die Punkte vergleichen zu können, müssen die indirekt gemessenen Punkte an der Spiegelfläche gespiegelt werden. Durch Transformation der Messwerte in die jeweiligen Messkoordinatensysteme kann die Z-Koordinate des indirekt gemessenen Punktes negiert werden. Da die Längenmessung genauer als die Winkelmessung ist, ist der Unterschied in der Z-Koordinate minimal (0,002 mm/m), wenn die Abweichungen im reflektierten Strahl betrachtet werden. Der reflektierte Laserstrahl beginnt beim Durchstoßungspunkt des

Laserstrahl vom Lasertracker durch die Spiegelfläche und verläuft weiter zum gespiegelten Punkt. Der Durchstoßungspunkt wird im jeweiligen Messkoordinatensystem aus dem Schnitt der Spiegelfläche mit der Linie vom Lasertracker zum virtuellen Punkt berechnet. Das Strahlenkoordinatensystem hat die Z-Achse zum gespiegelten Punkt. Damit die Differenzen der Koordinaten zum direkt gemessenen Punkt vergleichbar sind, wird ein Axisalignment gemacht. Mit dem Axisalignment wird die positive X-Achse in Richtung des Lasertrackers ausgerichtet, das heißt, die XZ-Ebene des Koordinatensystems geht durch den Ursprung des Base-Koordinatensystems. Die Y-Achse ergibt sich demzufolge aus der Komplettierung des rechtwinkligen mathematischen Koordinaten-



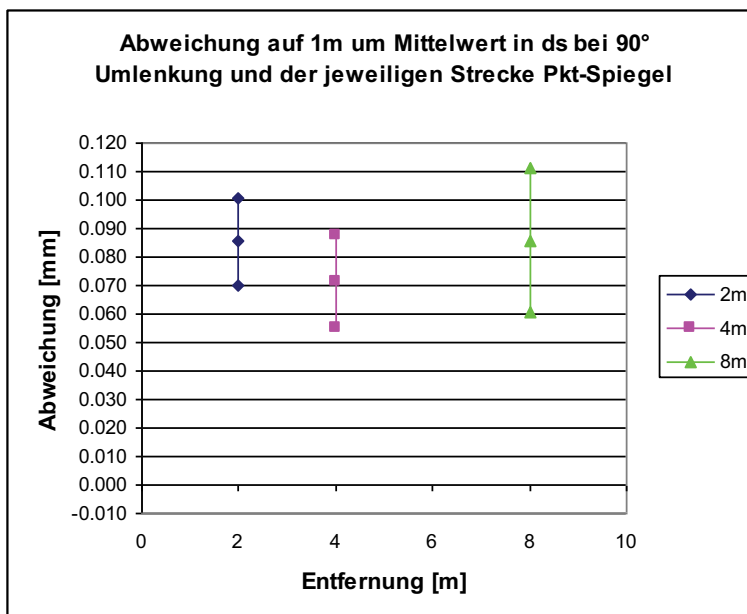
**Diagramm 2: Vergleich Direktmessung mit Indirektmessung um den Mittelwert auf 1m systems.** Die Auswertung der 49 Messungen in Bezug auf dem Vergleich der Messung über das Spiegeltool mit der Direktmessung zeigt im Diagramm 2, dass es maximale Abweichungen um  $\pm 0,03$  mm je Meter in der X- und Y-Richtungen gibt. In der Z-Richtung ist der Unterschied 0,002 mm/m Bezug nehmend auf die angestrebte Genauigkeit einer



Messung mit dem Spiegeltool, so kann gesagt werden, dass dies über einen längeren Zeitraum erfüllt ist.

#### 4.4. Analyse der Messungen bei unterschiedlicher Entfernung des Punktes zum Spiegeltool

Die Auswertung der Abhängigkeit der Messunsicherheit vom Abstand des Punktes zum Spiegeltool wurde im reflektierten Laserstrahl, dem Strahlenkoordinatensystem, betrachtet und auf einen Meter normiert. Durch Transformation der Messwerte in das Strahlenkoordinatensystem der jeweiligen Messung ist erkennbar, dass die Z-Koordinate minimal schwankt (Diagramm 3). Dies liegt innerhalb der Messunsicherheit bei der Streckenmessung des Lasertrackers. Zur Veranschaulichung der Messunsicherheit wurden die Querabweichungen in der XY-Ebene des Strahlenkoordinatensystems betrachtet. Die Querabweichung  $d_s$ , in die die X- und Y-Richtung gleich groß einfließt, ist erkennbar, dass sich die Standardabweichung mit der Erhöhung der Entfernung des Punktes vom



**Diagramm 3: Querabweichung  $d_s$  bei Punktentfernungsänderung**

Spiegeltool nicht stark verändert. Die Messungen streuen von ca. 0,015 bis 0,025 mm / m. Mit der aktuellen Kalibrierung des Spiegeltools werden beim Vergleich der Koordinaten des direkt gemessenen mit den des gespiegelten Punktes Genauigkeiten erreicht, die in der X- und Y-Richtung bei circa 0,06 mm / m liegt. Die Genauigkeit in Z-Richtung, was der

Streckenmessung entspricht, ist 0,007 mm/m (Diagramm 4). Durch eine Optimierung des Spiegeltools kann der Offset in der X- und Y- Richtung minimiert werden.

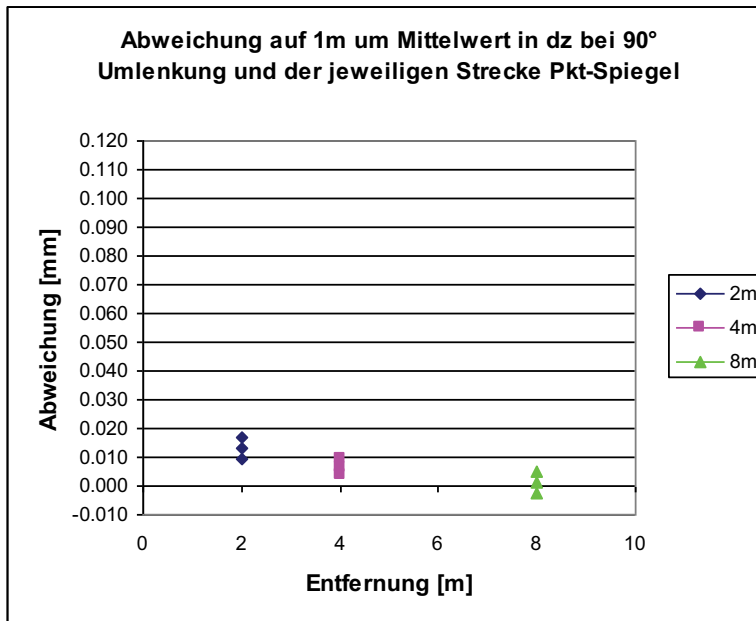


Diagramm 4: Abweichung in Z-Richtung bei Punktentfernungsänderung

## 4.5. Analyse der Messungen bei unterschiedlicher Entfernung des Lasertrackers zum Spiegeltool

Die Veränderung der Entfernung des Lasertrackers zum Spiegeltool zeigt annähernd die gleiche Auswirkung auf die Streuung der Messungen eines Punktes wie bei der Veränderung des Abstandes des Punktes zum Spiegeltool. Bei der Betrachtung der Koordinatenunterschiede im jeweiligen Strahlenkoordinatensystem wird ersichtlich, dass die Messungen bei der Abstandsvergrößerung zwischen Lasertracker und Spiegeltool genau so streuen wie bei der Änderung des Punktabstandes zum Spiegeltool. Im Diagramm 6 ist erkennbar, dass die Querabweichung der Koordinatenunterschiede insgesamt im Mittel um  $\pm 0,02$  mm / m streuen. Dagegen sind in der Z-Richtung kaum Unterschiede zwischen den direkt gemessenen und den gespiegelten Punkten erkennbar ( $\pm 0,005$  mm / m) (Diagramm 6). Die Querabweichung zeigt, dass je entfernter der Lasertracker vom Spiegel steht, desto ungenauer die Messung wird.

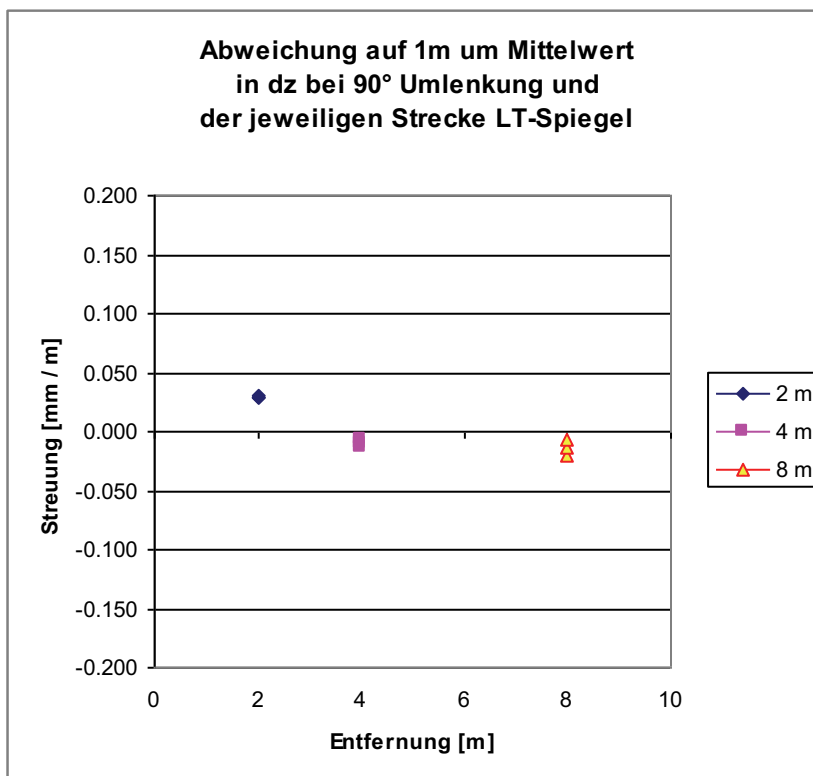


Diagramm 5: Z-Abweichung bei LT-Entfernungsänderung

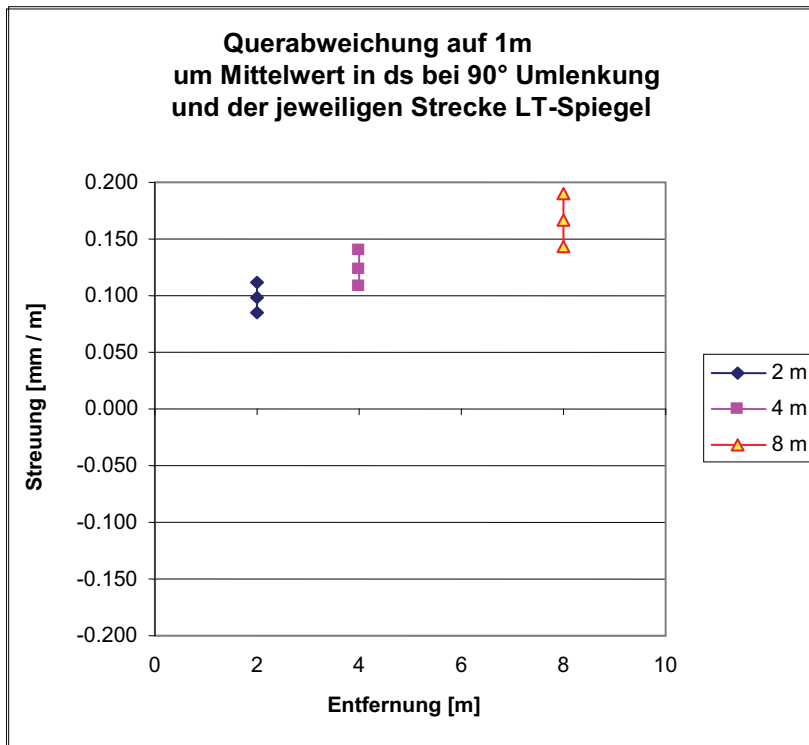
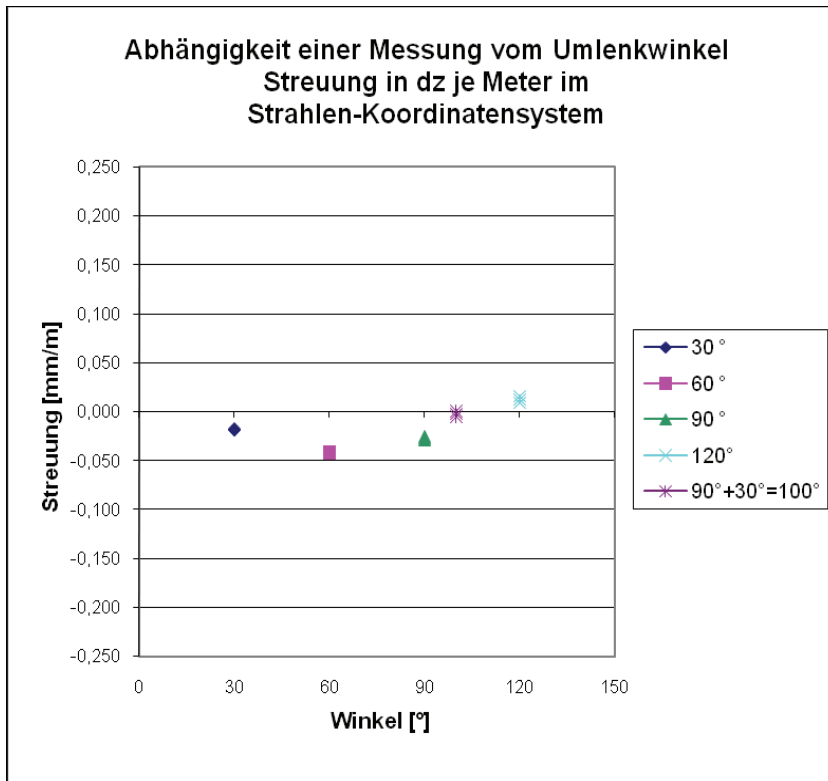


Diagramm 6: Querabweichung bei LT-Entfernungsänderung

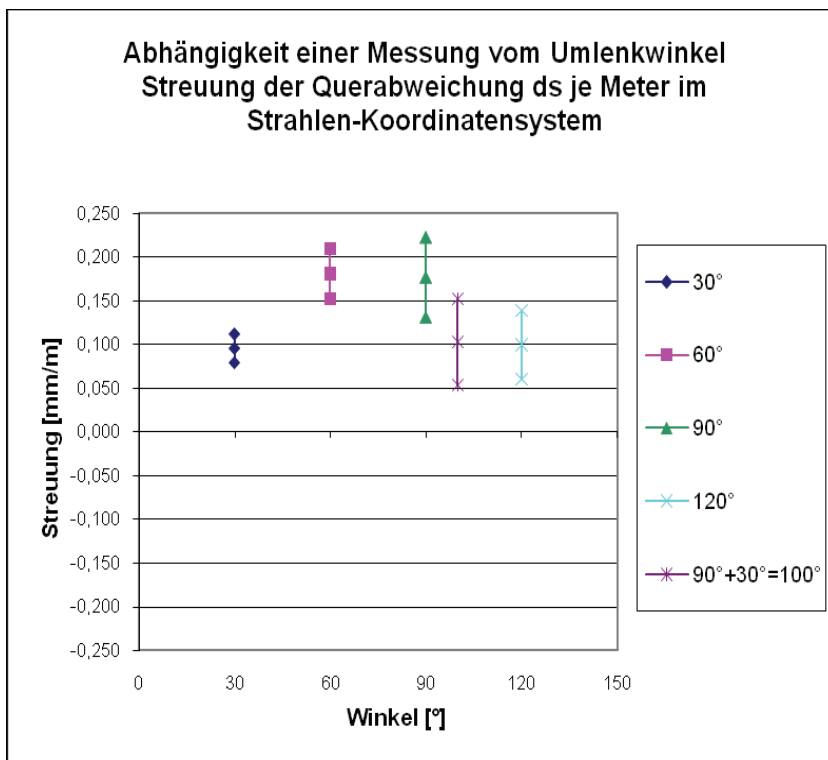
#### 4.6. Analyse der Messungen mit verschiedenen Neigungen des Spiegeltool zur Zielrichtung

Die Grundlage für diesen Test war die Annahme, dass die Messungen ungenauer werden, wenn der Spiegel immer mehr aus der Zielrichtung gedreht wird (Kapitel 3.4.). Trifft der Laserstrahl auf die Spiegelfläche, so entsteht im Idealfall, genau dann, wenn der Laserstrahl senkrecht auf die Spiegelfläche trifft, ein Kreis (Abbildung 16). Da der Lasertracker an einer Stelle stehen bleibt und dadurch sich die Richtung des Laserstrahls nicht ändert, so ändert sich der Auftreffpunkt bei einer Drehung des Spiegeltools von einem Kreis zu einer Ellipse. Der entstehende Durchstoßungspunkt des Laserstrahls durch die Spiegelfläche wird schleifender. Durch die Transformation der Messwerte in das Strahlenkoordinatensystem konnten die Koordinaten des gespiegelten Punktes mit den Koordinaten des Punktes von der Direktmessung verglichen werden.

Die Auswertung der 25 Messungen je Spiegelstellung (Diagramme 7 und 8) ergab, dass die Streuung in der Größenordnung von  $\pm 0,02$  bis  $\pm 0,05$  mm / m liegt.



**Diagramm 7: Z-Abweichung je Umlenkwinkel des Laserstrahls**



**Diagramm 8: Querabweichung ds je Umlenkwinkel des Laserstrahls**

## 4.7. Analyse der Messung mit wiederholter Einstellung des Spiegeltools

Ein weiterer Test sollte zeigen wie genau ein Punkt gemessen werden kann, wenn dieser nach jeder Messung erneut eingestellt wird. Das Diagramm 10 der Auswertung zeigt, dass die Messungen bei 25 Neueinstellungen stärker streuen als bei den 25 Messungen mit fest eingestelltem Spiegeltool. So streuen die Messungen in der Querabweichung ds um  $\pm 0,08$  mm / m und in Z-Richtung 0,003 mm / m. Dies bedeutet, dass in der Entfernungsmessung, entsprechend der Z-Achsenausrichtung des Strahlenkoordinatensystems, die geringste Einwirkung auf die Messung ist. Die Ungenauigkeit der Punktkoordinaten kommt durch die Winkelmessung die eine Abweichung in X- und Y-Richtung bewirkt.

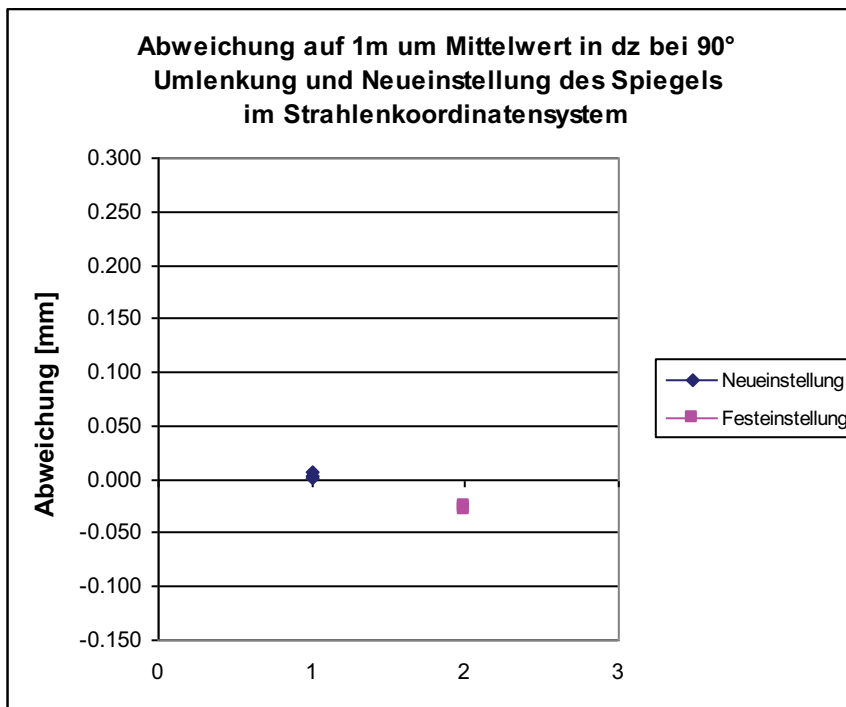
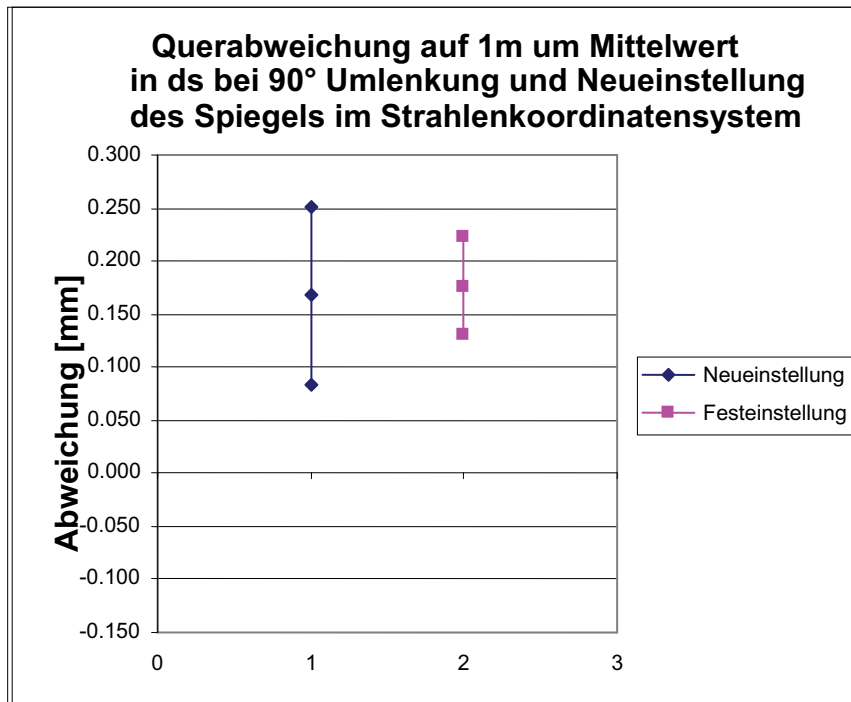


Diagramm 9: Z-Abweichung beim Vergleich Neueinstellung des Spiegels und feste Einstellung



**Diagramm 10: Querabweichung ds beim Vergleich Neueinstellung des Spiegels und feste Einstellung**

## 4.8. Auswertung der Plasmagefäßmessung

Mit der Plasmagefäßmessung soll gezeigt werden, dass eine Messung mit dem Spiegeltool im Montagebereich möglich ist.

Die Auswertung der Plasmagefäßmessung konzentriert sich auf die Betrachtung, wie genau die Messungen zu gegebenen Soll-Koordinaten sind. Es werden außerdem je zwei Messungen je Plasmagefäß miteinander verglichen. Aufgrund der Ergebnisse der Gefäßmessung am Modul 1 wurde eine weitere Gefäßmessung am Modul 4 durchgeführt. Die Auswertung dieser Gefäßmessung soll zeigen, ob äußere Einflüsse die erste Gefäßmessung beeinflusst haben.

### 4.8.1. Praxistestmessung 1

Die Soll-Koordinaten der Gefäßreferenzpunkte des Moduls 1 liegen im Koordinatensystem des Plasmagefäßes vor. Um die Messergebnisse mit den Soll-Koordinaten vergleichen zu können, muss zuerst eine

Transformation der gemessenen Gefäßreferenzpunkte in das Referenzkoordinatensystem des Plasmagefäßes durchgeführt werden. Mit einer Best-Fit-Transformation wird eine best angepasste Transformation gerechnet, die die Koordinaten der gemessenen Punkte in das Koordinatensystem des Plasmagefäßes mit transformiert. Es wurden die beiden Messungen am Modul 4 transformiert und ausgewertet. Der RMS-Fehler der Transformation ist bei der ersten Messung 0,173 mm und bei der zweiten Messung 0,182 mm. Diese Werte liegen innerhalb der angestrebten Transformationsgenauigkeit. Somit kann die Messung für die Auswertung weiter verwendet werden.

Aus beiden Messungen wurden die Messwerte der Spiegelpunkte miteinander verglichen. Die Punktbezeichnungen richten sich nach den jeweiligen Halbmodulen HM 10 und 11. Für die Auswertung der Messung mittels Spiegeltool müssen die einzelnen Datensätze der Punkte in das Koordinatensystem der Spiegeltoolkalibrierung transformiert werden. Die daraus entstandenen Messkoordinatensysteme werden nun eingestellt. In diesen wird der jeweilige gemessene Punkt in der Z-Koordinate negiert. Nach der Rücktransformation in das Koordinatensystem des Plasmagefäßes werden die nun erhaltenen Koordinaten mit den Soll-Koordinaten verglichen.

In den Tabellen 5 und 6 sind die Unterschiede zwischen den beiden Messungen dargestellt. Die Punkte in der Tabelle 5 sind für die Transformation direkt gemessen worden. Der Vergleich beider Messungen (Tabelle 5 und Tabelle 6) zeigt, dass die direkt gemessenen Punkte gut zueinander passen. Die in Tabelle 6 aufgeführten Punkte wurden mit dem Spiegeltool gemessen, was auch die höhere Ungenauigkeit erklärt. Die rot markierten Punkte in Tabelle 6 weisen eine sehr hohe bzw. eine über die angestrebten Genauigkeit hinwegführende Ungenauigkeit auf. Während der ersten Messung sind äußere Einflüsse wie Vibrationen aufgetreten, die bei den Messungen im Halbmodul 10 bei den Punkten HR102-1 und HR203-1 Fehler verursacht haben könnten. Die großen Differenzen bei den Punkten im Halbmodul 11 sind durch die Messwerte und den daraus berechneten Koordinaten nicht nachvollziehbar.



Transformationspunkte	Differenzen Messung 1 und 2			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
10-HR101-P2	0,113	0,034	-0,061	0,133
10-HR104-P2	-0,120	0,025	0,072	0,142
11-HR101-P2	0,062	0,044	-0,128	0,149
11-HR102-P2	0,002	-0,183	0,118	0,218
11-HR103-P2	-0,052	0,103	0,063	0,131
11-HR104-P2	-0,005	-0,022	-0,064	0,068

**Tabelle 5: Vergleich beider Messungen (Transformationspunkte)**

Spiegelpunkte	Differenzen Messung 1 und 2			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
10-HR102-1	2,219	1,753	0,521	2,875
10-HR201-1	0,507	-0,133	0,177	0,553
10-HR203-1	1,509	-1,652	-0,668	2,335
10-HR204-1	-0,232	0,023	0,163	0,284
10-101-1	-0,277	0,199	0,015	0,341
10-103I-1	-0,087	-0,061	0,243	0,265
10-107-1	0,141	-0,024	0,114	0,183
10-109-1	0,135	0,364	0,017	0,389
10-110-1	0,181	0,005	-0,283	0,336
10-111-1	0,428	-0,146	0,195	0,492
10-112-1	0,155	-0,266	0,525	0,609
11-HR203-1	-0,306	0,195	0,405	0,544
11-117I-1	-0,088	0,219	0,260	0,351
11-119I-1	0,122	-0,580	1,051	1,207
11-121I-1	-0,432	0,230	0,271	0,559
11-126-1	0,039	0,046	1,105	1,107

**Tabelle 6: Vergleich beider Messungen (Spiegelpunkte)**

Vergleicht man die einzelnen Messungen mit den Soll-Koordinaten, so sind geringe Koordinatenunterschiede bei den direkt gemessenen Transformationspunkten (Tabelle 7 und Tabelle 9) zu erkennen. Die Spiegelpunkte weisen eine höhere Messunsicherheit auf (Tabelle 8 und Tabelle 10). Wie schon beim Vergleich der beiden Messungen miteinander ersichtlich wurde, weichen die Punkte 10-HR102 und 10-HR203 stark von den Soll-Koordinaten ab. Die restlichen 1x-HRxxx Punkte (3 Stück) liegen

Transformationspunkte	Differenzen			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
10-HR101-P2	0,008	0,192	0,281	0,340
10-HR104-P2	-0,010	-0,251	-0,308	0,397
11-HR101-P2	0,041	0,059	-0,131	0,149
11-HR102-P2	0,070	-0,169	-0,099	0,208
11-HR103-P2	0,024	-0,106	-0,048	0,119
11-HR104-P2	-0,133	0,275	0,305	0,432

Tabelle 7: Vergleich Messung 1 mit Soll-Koordinaten (Transformationspunkte)

Spiegelpunkte	Differenzen			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
10-HR102-1	-1,353	-1,947	-0,205	2,380
10-HR201-1	-0,612	-0,021	0,481	0,779
10-HR203-1	-1,765	1,163	1,188	2,425
10-HR204-1	-0,238	-0,326	0,309	0,508
10-101-1	-1,794	1,481	2,549	3,451
10-103I-1	1,771	0,259	0,196	1,801
10-107-1	0,955	0,923	0,480	1,412
10-109-1	-1,439	0,291	1,385	2,018
10-110-1	-2,753	1,967	1,810	3,837
10-111-1	1,072	0,754	0,744	1,507
10-112-1	0,238	2,130	3,569	4,163
11-HR203-1	-0,091	-0,530	0,040	0,539
11-117I-1	-2,781	-0,591	-1,265	3,112
11-119I-1	2,086	-0,250	-0,313	2,124
11-121I-1	-3,124	-0,936	-0,745	3,345
11-126-1	-1,621	0,465	2,518	3,031

Tabelle 8: Vergleich Messung 1 mit Soll-Koordinaten (Spiegelpunkte)

innerhalb der angestrebten Messgenauigkeit. Die anderen Spiegelpunkte 1x-xxx weichen stark von den gegebenen Koordinaten ab. Die Ursache für diese hohen Abweichungen ist, dass die Punkte 1x-xxx (im Gegensatz zu den 1x-HRxxx-Punkten) nach dem Schweißen von zwei Plasmagefäßhalbmodulen noch nicht neu vermessen worden sind. Die Abweichungen liegen demzufolge innerhalb des Bereiches, in dem die Gefäßhälften während des Schweißens sich noch bewegen können.

Die Auswertung der zweiten Messung zeigt, dass in der ersten Messung der Punkt 10-HR203 fehlerhaft gemessen wurde. In den Tabellen 9 und 10 ist erkennbar, dass der Punkt 10-HR102 am ungenauesten gemessen wurde. Die anderen 1x-HRxxx-Punkte wurden mit einer Genauigkeit gemessen, die innerhalb der angestrebten Genauigkeitsgrenzen liegen.

Transformationspunkte	Differenzen			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
10-HR101-P2	0,121	0,226	0,220	0,338
10-HR104-P2	-0,130	-0,226	-0,236	0,352
11-HR101-P2	0,103	0,103	-0,259	0,297
11-HR102-P2	0,072	-0,352	0,019	0,360
11-HR103-P2	-0,028	-0,003	0,015	0,032
11-HR104-P2	-0,138	0,253	0,241	0,376

Tabelle 9: Vergleich Messung 2 mit Soll-Koordinaten (Transformationspunkte)

Spiegelpunkte	Differenzen			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
10-HR102-2	0,866	-0,194	0,316	0,942
10-HR201-2	-0,105	-0,154	0,658	0,684
10-HR203-2	-0,256	-0,489	0,520	0,758
10-HR204-2	-0,470	-0,303	0,472	0,732
10-101-2	-2,071	1,680	2,564	3,700
10-103I-2	1,684	0,198	0,439	1,752
10-107-2	1,096	0,899	0,594	1,537
10-109-2	-1,304	0,655	1,402	2,024
10-110-2	-2,572	1,972	1,527	3,583
10-111-2	1,500	0,608	0,939	1,871
10-112-2	0,393	1,864	4,094	4,515
11-HR203-2	-0,397	-0,335	0,445	0,684
11-117I-2	-2,869	-0,372	-1,005	3,063
11-119I-2	2,208	-0,830	0,738	2,471
11-121I-2	-3,556	-0,706	-0,474	3,656
11-126-2	-1,582	0,511	3,623	3,987

Tabelle 10: Vergleich Messung 2 mit Soll-Koordinaten (Spiegelpunkte)

Die Differenzen der Punkte 1x-xxx gegenüber den Soll-Koordinaten (Tabelle 10) weisen wie schon bei der Auswertung der ersten Messung (Tabelle 6) den möglichen Verzug durch das Schweißen auf.

## 4.8.2. Praxistestmessung 2

Die zweite Praxistestmessung wurde am Plasmagefäß des Moduls 4 durchgeführt. Bei der Direktmessung der Gefäßpunkte wurden 7 Punkte gemessen. Ein weiterer ausgesteckter Punkt konnte nicht gemessen werden. Die Spiegelpunkte (8 Stück) wurden in der Auswertung im jeweiligen Messkoordinatensystem an der Spiegelfläche gespiegelt. Anschließend wurde die Messung des Standpunktes 2 durch Transformation in das Koordinatensystem des ersten Standpunktes überführt. Die Transformation wurde mit 6 Wandpunkten durchgeführt und hat einen RMS-Wert von 0,065 mm.

Die Auswertung der zweiten Praxistestmessung erfolgte im Koordinatensystem des ersten Standpunktes. Der Vergleich der beiden Messungen zeigt, dass sich die Messungen in 6 von 8 Punkten um

Spiegelpunkte	Differenzen Messung 1 und 2			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
40-HR-201	0,055	0,338	0,089	0,354
40-HR-203	-0,096	-0,020	0,078	0,125
41-HR-202	0,034	-0,768	-0,441	0,886
HR-119i	0,044	-0,279	-0,197	0,344
HR-123i	0,562	1,436	1,026	1,852
HR-124i	-0,001	0,008	-0,015	0,017
HR-125i	0,120	-0,133	0,009	0,179
HR-128i	-0,060	0,081	0,053	0,114

**Tabelle 11: Vergleich beider Messung**

weniger als  $\pm 0,2$  mm in den Koordinaten unterscheiden. Die Punkte 41-HR-202 und HR-123i haben die größten Abweichungen in den Koordinaten (Tabelle 11). Der Vergleich der Messungen mit den erzeugten Soll-Koordinaten zeigt, dass in der ersten Messung der Punkt HR-123i ( $ds = 1,96$  mm) fehlerhaft sein muss (Tabelle 12 und Tabelle 13). Der Vergleich mit den Soll-Koordinaten zeigt, dass die Messungen mit dem Spiegeltool innerhalb der angestrebten Genauigkeit liegen.

Spiegelpunkte	Differenzen			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
40-HR-201	0,122	0,211	-0,072	0,254
41-HR-202	0,040	0,248	0,141	0,288
HR-119i	0,065	0,357	0,248	0,440
HR-123i	-0,217	-1,473	-1,271	1,958
HR-124i	0,081	-0,042	0,202	0,222
HR-125i	0,014	-0,130	0,254	0,286
HR-128i	0,289	-0,193	0,000	0,348

Tabelle 12: Vergleich Messung 1 mit Soll-Koordinaten

Spiegelpunkte	Differenzen			
	dx	dy	dz	ds
	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
40-HR-201	0,177	0,549	0,017	0,577
41-HR-202	0,074	-0,520	-0,300	0,605
HR-119i	0,109	0,078	0,051	0,143
HR-123i	0,345	-0,037	-0,245	0,425
HR-124i	0,080	-0,034	0,187	0,206
HR-125i	0,134	-0,263	0,263	0,395
HR-128i	0,229	-0,112	0,053	0,260

Tabelle 13: Vergleich Messung 2 mit Soll-Koordinaten

## 4.9. Fehlerbetrachtung

Fehlereinflüsse bei der Messung im Montagebereich kommen hauptsächlich durch andere Arbeiten. Dabei entstehen Fehlereinflüsse durch Luftverwirbelungen, wenn Personen durch die Zielrichtung gehen, Übertragung von Vibrationen auf das Umfeld und klimatische Veränderungen in den Hallen. Durch ein Absperren des Arbeitsbereiches oder Beobachtung der klimatischen Bedingungen können solche Fehlereinflüsse verringert werden. Andere Fehlereinflüsse treten im Zusammenhang mit dem Spiegeltool auf. Hierbei können durch eine Veränderung der Spiegeltoolgeometrie oder durch fehlerhaftes Arretieren bei der Ausrichtung Fehler auftreten. Durch eine regelmäßige Kontrolle des Spiegeltools können diese Fehler begrenzt werden.

## 5. Schlussfolgerung

Mit dieser Arbeit soll gezeigt werden, dass durch den Einsatz des Spiegeltools und des Lasertrackers ein effektiveres Messen bei annähernd gleich bleibender Genauigkeit möglich ist.

Die Messung mit dem Spiegeltool ist sinnvoll und es werden Ergebnisse bei Labormessungen und beim Praxistest erreicht, die innerhalb der angestrebten Genauigkeit von 0,3 – 0,5 mm liegen. Wie auch bei einer Direktmessung können durch äußere Einflüsse die Ergebnisse stärker abweichen. Es ist mit dem Spiegeltool möglich, Punkte zu messen, die sonst nicht messbar oder schwer zu erreichen sind. Auch durch die Verminderung der Anzahl der Lasertrackerstandpunkte wird eine Messung effektiver. Die Handhabung des Spiegeltools ist zurzeit noch nicht ganz einfach. Zur Optimierung des Spiegeltools könnte ein Griff an der Rückseite angebracht werden oder die Aluminiumplatte mit einer Kardanischen Aufhängung auf einen Standfuß befestigen (siehe Optimierungsskizzen im Anhang). Die Einstellung der Richtung erfolgt über einen Feintrieb, der die Drehung mit einem konischen Zahnrad auf die Drehachse überträgt. Eine erste Optimierung umfasste das Verbinden der Supports mit dem Spiegeltool. Hierfür wurden Kappen hergestellt, die die Supports von hinten mit Schrauben an die Aluminiumplatte festziehen. Nach dieser Veränderung sind nach mehreren Messungen keine größeren Veränderungen am Spiegeltool festgestellt worden.

Ich habe die Arbeit am Max-Planck-Institut sehr geschätzt. Durch die Arbeit habe ich einen praktischen Einblick in die Ingenieurvermessung erhalten, der durch die Hochschule so nicht vermittelt werden kann. Ich hoffe, die Ergebnisse meiner Messungen können für die folgenden Messungen verwendet werden und ermöglichen eine Vereinfachung der Vermessung am Projekt Wendelstein 7-X.

## 6. Begriffe und Abkürzungen

### Koordinatensysteme:

- Base-: Koordinatensystem des Lasertrackers
- Linien-: Koordinatensystem der Verbindung zwischen indirekt gemessenen und direkt gemessenen Punkt
- Mess-: Koordinatensystem nach der Transformation der Messung auf die Werte der Qualifizierung
- PG-: Koordinatensystem des Plasmagefäßes
- Spiegel-: Koordinatensystem der Qualifizierung mit der Spiegelfläche als XY-Ebene und der Z-Achse senkrecht dazu
- Strahlen-: Koordinatensystem bei der Betrachtung der Messwerte im reflektierten Laserstrahl vom Durchstoßungspunkt zum gespiegelten Punkt
- TBR-: Koordinatensystem der Qualifizierung mit der Koordinatenmessmaschine

### Messhilfsmittel:

- Reflektor: zur Signalisierung des zu messenden Punktes und Reflektierung des Laserstrahls
- Spiegel: oberflächenbeschichtete Reflektionsfläche mittig des Spiegeltools
- Spiegeltool: Messutensil zur Messung verdeckter Punkte
- Standpunkt: Position des Lasertrackers während der Messung
- Support: Halterung für die Reflektoren in den Bohrungen

## Abkürzungen:

ADM:	Absolute Distance Meter; Absolutdistanzmesser
BRR:	Break Resistant Reflector
CCR:	Corner Cube Reflector
IFM:	Interferometer; Laser-Interferometer
LT:	Laser Tracker; Lasertracker nur mit einem Interferometer
LTD:	Laser Tracker Distance; Lasertracker mit Absolutdistanzmesser
PSD:	Position Sensing Device; Zweiachsiger Photosensor auf dem der reflektierte Laserstrahl des Interferometers abgelenkt wird und zur Zielverfolgung genutzt wird
TBR:	Tooling Ball Reflector



## 7. Literaturverzeichnis

[1]

Foppe, Karl:

Repetitorium zur Fehlerlehre und Statistik und Ausgleichungsrechnung; 1.Auflage; GFG-Gesellschaft zur Förderung der Geodäsie an der HS NB e.V., 2009

[2]

Gruber, Franz Josef, Joeckel, Rainer:

Formelsammlung für das Vermessungswesen;  
13. Auflage; Teubner Verlag, 2007

[3]

Illemann, Jörg:

Hexagon Metrology GmbH  
[http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_forst\\_geo\\_und\\_hydrowissenschaften/fachrichtung\\_geowissenschaften/gi/ig/termine/papers/illemann.pdf](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/ig/termine/papers/illemann.pdf)

[4]

Leica Geosystems:

<http://www.leica-geosystems.com/de>  
Produktbeschreibung: LTD500; LTD500\_DE.pdf  
L2\_Laser\_Tracker.pdf

[5]

Leica Geosystems:

XYZ Trainingshandbuch für Lasertracker 1.4.0  
XYZ Mathematics for Users

[6]

Kahmen, Heribert:

Angewandte Geodäsie – Vermessungskunde;  
20. völlig neu bearbeitete Auflage, De Gruyter Verlag, 2005

[7]

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik:

<http://www.ipp.mpg.de/>

[8]

Niemeier, Wolfgang:

Ausgleichsrechnung – statistische Auswertemethoden;

2. Auflage; De Gruyter Verlag, 2008

[9]

Torge, Wolfgang:

Geodäsie

De Gruyter Verlag, 1975

[10]

[www.elcometech.com/Portable\\_CMM.htm](http://www.elcometech.com/Portable_CMM.htm)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fusion von Tritium und Deuterium [7] .....	11
Abbildung 2: Kryostat, Magnetspulen und Plasmagefäß von Wendelstein 7-X [7].....	13
Abbildung 3: Zusatzkomponenten T-Cam, T-Probe, T-Scan, T-Mac [3][10] ....	21
Abbildung 4: Aufbau eines Lasertrackers [4].....	22
Abbildung 5: Koordinatensystem und Messelemente des Lasertrackers [4] ....	25
Abbildung 6: Break Resistant Reflector (BRR).....	26
Abbildung 7: Koordinatensystem der Kalibrierung .....	27
Abbildung 8: Spiegeltool mit Halterung; Alu-Platte zum Aufbau.....	27
Abbildung 9: Halterung Spiegeltool im Labor und im Plasmagefäß .....	27
Abbildung 10: Messungsaufbau .....	29
Abbildung 11: CCD-Kameraansicht der Reflektoren .....	30
Abbildung 12: Auswahl von Auto-Inspect-Punkten.....	31
Abbildung 13: Aufbauschema zur Analyse des Normalenvektors .....	32
Abbildung 14: Veränderung Abstand Punkt zum Spiegeltool.....	33
Abbildung 15: Veränderung Abstand Lasertracker zum Spiegeltool .....	34
Abbildung 16: Auftreffpunkt bei unterschiedlicher Zielrichtung des LT auf den Spiegel.....	35
Abbildung 17: Plasmagefäßreferenzpunkt .....	37
Abbildung 18: Einbau im Plasmagefäß .....	37
Abbildung 19: Spiegeltool mit eigenem Referenzpunkt.....	38
Abbildung 20: Lösung der Best-Fit-Ebenenerstellung .....	44
Abbildung 21: Transformation Messung 1 ins PG .....	92
Abbildung 22: Transformation Messung 2 ins PG .....	93
Abbildung 23: Transformation Standpunkt 2 auf Standpunkt 1 .....	93
Abbildung 24: Messansicht in XYZ bei einer Auto-Inspect-Messung.....	94

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Best-Fit-Ebenen über 39 Spiegelpunkte mit unterschiedlichen Startpunkten .....	43
Tabelle 2: Best-Fit-Ebenen je Antastmessung des Spiegels (13 Spiegelpunkte) .....	43
Tabelle 3: Best-Fit-Ebene Rotationsparameter fixiert .....	43
Tabelle 4: Best-Fit-Ebene mit einem Ausreißer in der Z-Koordinate (SP1 P8).....	44
Tabelle 5: Vergleich beider Messungen (Transformationspunkte).....	65
Tabelle 6: Vergleich beider Messungen (Spiegelpunkte) .....	65
Tabelle 7: Vergleich Messung 1 mit Soll-Koordinaten (Transformationspunkte) .....	66
Tabelle 8: Vergleich Messung 1 mit Soll-Koordinaten (Spiegelpunkte) .....	66
Tabelle 9: Vergleich Messung 2 mit Soll-Koordinaten (Transformationspunkte) .....	67
Tabelle 10: Vergleich Messung 2 mit Soll-Koordinaten (Spiegelpunkte) .....	67
Tabelle 11: Vergleich beider Messung .....	68
Tabelle 12: Vergleich Messung 1 mit Soll-Koordinaten .....	69
Tabelle 13: Vergleich Messung 2 mit Soll-Koordinaten .....	69
Tabelle 14: Wertetabelle Normalenvektor um den Mittelwert im Koordinatensystem der Ebene 1 .....	77
Tabelle 15: Wertetabelle Direktvergleich gespiegelter und gemessener Punkt .....	78
Tabelle 16: Wertetabelle Abstand Punkt - Spiegel 2m .....	79
Tabelle 17: Wertetabelle Abstand Punkt - Spiegel 4m .....	80
Tabelle 18: Wertetabelle Abstand Punkt - Spiegel 8m .....	81
Tabelle 19: Wertetabelle Abstand LT - Spiegel 2m .....	82
Tabelle 20: Wertetabelle Abstand LT - Spiegel 4m .....	83
Tabelle 21: Wertetabelle Abstand LT - Spiegel 8m .....	84
Tabelle 22: Wertetabelle Umlenkwinkel 30° .....	85
Tabelle 23: Wertetabelle Umlenkwinkel 60° .....	86
Tabelle 24: Wertetabelle Umlenkwinkel 90° .....	87
Tabelle 25: Wertetabelle Umlenkwinkel 120° .....	88
Tabelle 26: Wertetabelle 90° horizontale und 30° vertikale Umlenkung = 100° .....	89
Tabelle 27: Wertetabelle mehrmalige Neueinstellung des Punktes bei 90° Umlenkwinkel .....	90
Tabelle 28: Submatrizen der Kovarianzmatrix aus dem Varianzfortpflanzungsgesetz .....	91
Tabelle 29: Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Unbekannten .....	92

# Anhang

## A. Wertetabelle Verhalten des Normalenvektors

	di	dj	dk		di	dj	dk
	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]		[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]
ebene1	0,013	0,023	0,000	ebene26	0,001	-0,002	0,000
ebene2	0,013	0,015	0,000	ebene27	0,002	-0,012	0,000
ebene3	0,014	0,011	0,000	ebene28	0,000	0,003	0,000
ebene4	0,016	0,008	0,000	ebene29	0,002	-0,006	0,000
ebene5	0,009	0,003	0,000	ebene30	0,008	0,009	0,000
ebene6	0,013	0,005	0,000	ebene31	0,000	0,002	0,000
ebene7	0,007	0,001	0,000	ebene32	-0,002	-0,003	0,000
ebene8	-0,001	0,008	0,000	ebene33	0,001	0,000	0,000
ebene9	0,009	-0,005	0,000	ebene34	-0,015	-0,004	0,000
ebene10	0,000	0,005	0,000	ebene35	0,000	-0,003	0,000
ebene11	-0,007	0,000	0,000	ebene36	-0,010	-0,017	0,000
ebene12	0,000	0,000	0,000	ebene37	-0,007	-0,003	0,000
ebene13	0,008	-0,001	0,000	ebene38	-0,004	-0,001	0,000
ebene14	0,006	0,001	0,000	ebene39	-0,007	-0,003	0,000
ebene15	0,001	-0,004	0,000	ebene40	-0,006	-0,010	0,000
ebene16	0,004	0,002	0,000	ebene41	-0,010	-0,006	0,000
ebene17	0,008	0,005	0,000	ebene42	-0,003	-0,006	0,000
ebene18	0,008	0,000	0,000	ebene43	-0,011	-0,003	0,000
ebene19	0,000	-0,007	0,000	ebene44	-0,014	-0,005	0,000
ebene20	-0,009	0,003	0,000	ebene45	-0,003	0,001	0,000
ebene21	-0,002	0,001	0,000	ebene46	-0,002	-0,005	0,000
ebene22	0,005	-0,003	0,000	ebene47	-0,012	0,011	0,000
ebene23	0,001	0,005	0,000	ebene48	-0,013	-0,007	0,000
ebene24	-0,003	-0,014	0,000	ebene49	-0,020	0,007	0,000
ebene25	0,013	0,003	0,000				

Tabelle 14: Wertetabelle Normalenvektor um den Mittelwert im Koordinatensystem der Ebene 1

## B. Wertetabelle Direktvergleich

	dx	dy	dz	ds		dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]					[ mm / m ]			
P1	0,018	-0,029	-0,001	0,022	P26	0,003	0,009	0,000	-0,009
P2	0,010	-0,029	-0,001	0,025	P27	-0,008	0,025	-0,001	-0,022
P3	0,021	-0,020	-0,001	0,013	P28	0,016	-0,008	0,000	0,004
P4	0,009	-0,015	-0,001	0,013	P29	0,019	0,011	0,000	-0,015
P5	0,000	0,006	-0,001	-0,005	P30	0,019	-0,014	0,000	0,009
P6	0,020	-0,006	-0,001	0,000	P31	0,005	-0,009	0,000	0,009
P7	0,011	0,001	0,000	-0,003	P32	0,005	0,001	0,000	-0,001
P8	-0,011	-0,009	-0,001	0,012	P33	-0,004	0,002	0,000	0,000
P9	0,020	0,011	0,000	-0,015	P34	-0,030	0,003	0,000	0,001
P10	0,009	-0,009	-0,001	0,007	P35	0,024	0,007	0,001	-0,013
P11	-0,023	0,002	0,000	0,002	P36	-0,024	0,032	0,001	-0,028
P12	-0,016	0,006	0,000	-0,002	P37	-0,002	0,001	0,000	0,001
P13	0,015	0,004	-0,001	-0,006	P38	0,016	-0,006	0,001	0,002
P14	0,010	0,001	0,000	-0,002	P39	-0,018	0,000	0,001	0,004
P15	-0,011	0,002	0,000	0,001	P40	-0,013	0,017	0,001	-0,013
P16	-0,002	0,003	0,000	-0,001	P41	-0,014	0,013	0,001	-0,009
P17	-0,003	-0,005	-0,001	0,007	P42	0,008	0,012	0,001	-0,013
P18	0,001	0,000	-0,001	0,001	P43	-0,030	0,004	0,002	0,000
P19	-0,008	0,017	0,000	-0,014	P44	-0,025	0,000	0,001	0,003
P20	-0,031	-0,007	0,000	0,011	P45	0,005	-0,010	0,001	0,010
P21	-0,004	-0,003	0,000	0,005	P46	0,011	0,008	0,001	-0,009
P22	0,011	0,002	0,000	-0,003	P47	-0,008	-0,028	0,001	0,030
P23	0,009	-0,012	0,000	0,010	P48	-0,012	0,011	0,001	-0,008
P24	0,001	0,026	0,000	-0,024	P49	-0,031	-0,015	0,002	0,019
P25	0,030	-0,003	-0,002	-0,007					

Tabelle 15: Wertetabelle Direktvergleich gespiegelter und gemessener Punkt

### C. Wertetabellen Entfernungsänderung Punkt Spiegel

	dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	0,075	0,057	0,021	0,096
P2	0,055	0,021	0,020	0,062
P3	0,067	0,046	0,019	0,083
P4	0,045	0,065	0,015	0,080
P5	0,069	0,042	0,015	0,082
P6	0,072	0,043	0,016	0,085
P7	0,055	0,079	0,016	0,098
P8	0,068	0,049	0,014	0,085
P9	0,056	0,030	0,014	0,065
P10	0,041	0,055	0,016	0,070
P11	0,044	0,076	0,014	0,089
P12	0,061	0,018	0,013	0,064
P13	0,063	0,059	0,013	0,088
P14	0,107	0,048	0,014	0,118
P15	0,085	0,013	0,012	0,087
P16	0,077	0,043	0,013	0,089
P17	0,060	0,056	0,012	0,083
P18	0,099	0,070	0,010	0,122
P19	0,051	0,034	0,010	0,062
P20	0,077	0,049	0,011	0,092
P21	0,053	0,047	0,010	0,071
P22	0,069	0,064	0,010	0,095
P23	0,077	0,018	0,008	0,080
P24	0,087	0,002	0,007	0,087
P25	0,085	0,055	0,007	0,101
Mittel	0,068	0,046	0,013	0,085
Stabw s	0,017	0,020	0,004	0,015

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	0,051	0,026	0,010	0,070
$\mu$	0,068	0,046	0,013	0,085
$\mu$ +s	0,085	0,065	0,017	0,101

Tabelle 16: Wertetabelle Abstand Punkt - Spiegel 2m

	dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	0,022	0,049	0,013	0,055
P2	0,045	0,070	0,011	0,084
P3	0,076	0,025	0,012	0,081
P4	0,011	0,045	0,010	0,048
P5	0,039	0,056	0,010	0,069
P6	0,061	0,046	0,009	0,076
P7	0,023	0,048	0,008	0,054
P8	0,040	0,021	0,007	0,046
P9	0,066	0,028	0,007	0,072
P10	0,037	0,050	0,007	0,063
P11	0,061	0,055	0,007	0,082
P12	0,021	0,025	0,007	0,034
P13	0,015	0,057	0,006	0,060
P14	0,062	0,032	0,007	0,070
P15	0,078	0,054	0,006	0,095
P16	0,045	0,092	0,006	0,103
P17	0,055	0,074	0,004	0,092
P18	0,046	0,064	0,005	0,079
P19	0,051	0,060	0,004	0,078
P20	0,029	0,076	0,004	0,081
P21	0,056	0,065	0,003	0,085
P22	0,059	0,033	0,003	0,068
P23	0,049	0,041	0,003	0,064
P24	0,061	0,036	0,002	0,071
P25	0,052	0,054	0,002	0,075
Mittel	0,046	0,050	0,007	0,071
Stabw s	0,018	0,018	0,003	0,016

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	0,028	0,033	0,004	0,055
$\mu$	0,046	0,050	0,007	0,071
$\mu$ +s	0,065	0,068	0,010	0,088

Tabelle 17: Wertetabelle Abstand Punkt - Spiegel 4m



	dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	0,053	0,031	0,008	0,062
P2	0,029	0,083	0,007	0,088
P3	0,034	0,047	0,006	0,059
P4	0,041	0,043	0,006	0,060
P5	0,034	0,035	0,005	0,049
P6	0,073	0,094	0,005	0,119
P7	0,038	0,044	0,004	0,058
P8	0,048	0,054	0,004	0,073
P9	0,068	0,034	0,003	0,076
P10	0,058	0,036	0,002	0,068
P11	0,032	0,049	0,001	0,058
P12	0,078	0,081	0,001	0,112
P13	0,070	0,079	0,000	0,106
P14	0,046	0,052	0,000	0,069
P15	0,045	0,079	0,000	0,091
P16	0,041	0,078	-0,001	0,088
P17	0,047	0,072	-0,001	0,086
P18	0,086	0,085	-0,001	0,121
P19	0,025	0,084	-0,002	0,088
P20	0,052	0,086	-0,002	0,100
P21	0,029	0,044	-0,002	0,053
P22	0,063	0,069	-0,003	0,094
P23	0,057	0,127	-0,003	0,139
P24	0,039	0,092	-0,003	0,100
P25	0,066	0,108	-0,003	0,127
Mittel	0,050	0,067	0,001	0,086
Stabw s	0,017	0,026	0,004	0,025

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	0,033	0,042	-0,002	0,061
$\mu$	0,050	0,067	0,001	0,086
$\mu$ +s	0,067	0,093	0,005	0,111

Tabelle 18: Wertetabelle Abstand Punkt - Spiegel 8m

## D. Wertetabellen Entfernungsänderung LT-Spiegel

	dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	-0,004	0,076	0,029	0,081
P2	-0,020	0,076	0,025	0,082
P3	-0,042	0,079	0,026	0,093
P4	-0,006	0,083	0,027	0,088
P5	-0,017	0,103	0,029	0,108
P6	-0,044	0,090	0,028	0,104
P7	-0,032	0,078	0,030	0,089
P8	-0,021	0,108	0,030	0,114
P9	-0,056	0,102	0,030	0,120
P10	-0,016	0,076	0,030	0,084
P11	-0,042	0,088	0,029	0,102
P12	-0,030	0,076	0,029	0,087
P13	-0,019	0,076	0,032	0,085
P14	-0,032	0,100	0,030	0,109
P15	-0,036	0,073	0,030	0,087
P16	-0,027	0,080	0,030	0,090
P17	-0,063	0,086	0,030	0,111
P18	-0,043	0,092	0,030	0,106
P19	-0,030	0,088	0,031	0,098
P20	-0,023	0,087	0,030	0,095
P21	-0,029	0,097	0,031	0,106
P22	-0,020	0,091	0,029	0,098
P23	-0,022	0,109	0,030	0,115
P24	-0,019	0,076	0,031	0,084
P25	-0,019	0,116	0,031	0,122
Mittelwert $\mu$	-0,029	0,088	0,030	0,098
Stabw s	0,014	0,012	0,001	0,013

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	-0,043	0,076	0,028	0,086
$\mu$	-0,029	0,088	0,030	0,098
$\mu$ +s	-0,014	0,101	0,031	0,111

Tabelle 19: Wertetabelle Abstand LT - Spiegel 2m

	dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	0,076	-0,086	-0,015	0,116
P2	0,044	-0,101	-0,015	0,111
P3	0,060	-0,102	-0,015	0,120
P4	0,091	-0,096	-0,016	0,133
P5	0,027	-0,106	-0,013	0,110
P6	0,063	-0,099	-0,012	0,118
P7	0,054	-0,130	-0,012	0,142
P8	0,048	-0,093	-0,012	0,105
P9	0,106	-0,099	-0,011	0,145
P10	0,061	-0,099	-0,010	0,117
P11	0,060	-0,106	-0,011	0,123
P12	0,073	-0,126	-0,009	0,146
P13	0,096	-0,036	-0,008	0,103
P14	0,105	-0,109	-0,008	0,151
P15	0,054	-0,123	-0,008	0,134
P16	0,092	-0,123	-0,006	0,153
P17	0,083	-0,093	-0,007	0,125
P18	0,086	-0,087	-0,008	0,122
P19	0,079	-0,094	-0,007	0,123
P20	0,073	-0,090	-0,006	0,116
P21	0,095	-0,080	-0,006	0,124
P22	0,059	-0,095	-0,005	0,112
P23	0,094	-0,100	-0,005	0,137
P24	0,105	-0,042	-0,005	0,114
P25	0,046	-0,086	-0,005	0,098
Mittelwert $\mu$	0,073	-0,096	-0,010	0,124
Stabw s	0,022	0,022	0,004	0,015

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	0,052	-0,118	-0,013	0,109
$\mu$	0,073	-0,096	-0,010	0,124
$\mu$ +s	0,095	-0,075	-0,006	0,139

Tabelle 20: Wertetabelle Abstand LT - Spiegel 4m

	dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	-0,125	-0,148	-0,004	0,194
P2	-0,127	-0,132	-0,003	0,183
P3	-0,143	-0,139	-0,002	0,199
P4	-0,176	-0,114	-0,003	0,210
P5	-0,150	-0,117	-0,003	0,190
P6	-0,109	-0,089	-0,005	0,140
P7	-0,143	-0,068	-0,009	0,158
P8	-0,145	-0,100	-0,011	0,177
P9	-0,125	-0,065	-0,014	0,141
P10	-0,128	-0,092	-0,015	0,159
P11	-0,129	-0,086	-0,016	0,156
P12	-0,137	-0,064	-0,017	0,152
P13	-0,158	-0,076	-0,018	0,177
P14	-0,145	-0,084	-0,019	0,168
P15	-0,164	-0,070	-0,019	0,179
P16	-0,145	-0,048	-0,019	0,154
P17	-0,138	-0,044	-0,017	0,146
P18	-0,129	-0,048	-0,021	0,139
P19	-0,154	-0,017	-0,018	0,156
P20	-0,164	-0,084	-0,019	0,185
P21	-0,122	-0,092	-0,018	0,154
P22	-0,176	-0,068	-0,018	0,189
P23	-0,183	-0,067	-0,019	0,196
P24	-0,126	-0,059	-0,019	0,140
P25	-0,081	-0,080	-0,020	0,116
Mittelwert $\mu$	-0,141	-0,082	-0,014	0,166
Stabw s	0,023	0,031	0,007	0,024

	dx	dy	dz	ds
$\mu-s$	-0,163	-0,113	-0,020	0,143
$\mu$	-0,141	-0,082	-0,014	0,166
$\mu+s$	-0,118	-0,051	-0,007	0,190

Tabelle 21: Wertetabelle Abstand LT - Spiegel 8m

## E. Wertetabellen Änderung des Umlenk winkels

	dX	dY	dZ	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	-0,035	-0,057	-0,019	0,070
P2	-0,048	-0,074	-0,019	0,090
P3	-0,047	-0,091	-0,019	0,104
P4	-0,046	-0,067	-0,018	0,084
P5	-0,039	-0,069	-0,019	0,082
P6	-0,034	-0,087	-0,019	0,095
P7	-0,063	-0,078	-0,018	0,102
P8	-0,057	-0,074	-0,018	0,095
P9	-0,039	-0,107	-0,018	0,115
P10	-0,043	-0,116	-0,018	0,124
P11	-0,061	-0,079	-0,017	0,101
P12	-0,067	-0,085	-0,019	0,110
P13	-0,035	-0,082	-0,018	0,091
P14	-0,024	-0,076	-0,019	0,082
P15	-0,050	-0,076	-0,018	0,093
P16	-0,073	-0,070	-0,018	0,102
P17	-0,052	-0,126	-0,018	0,138
P18	-0,069	-0,071	-0,018	0,101
P19	-0,047	-0,081	-0,018	0,095
P20	-0,029	-0,080	-0,018	0,087
P21	-0,040	-0,046	-0,018	0,064
P22	-0,063	-0,084	-0,018	0,107
P23	-0,049	-0,061	-0,018	0,080
P24	-0,050	-0,055	-0,018	0,077
P25	-0,042	-0,084	-0,018	0,096
Mittel $\mu$	-0,048	-0,079	-0,018	0,095
Stabw s	0,013	0,018	0,001	0,016

	dx	dy	dz	ds
$\mu-s$	-0,061	-0,097	-0,019	0,079
$\mu$	-0,048	-0,079	-0,018	0,095
$\mu+s$	-0,035	-0,061	-0,018	0,112

Tabelle 22: Wertetabelle Umlenk Winkel 30°

	dX	dY	dZ	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	-0,158	-0,076	-0,040	0,180
P2	-0,163	-0,052	-0,041	0,176
P3	-0,116	-0,020	-0,041	0,124
P4	-0,193	-0,023	-0,043	0,199
P5	-0,141	-0,082	-0,041	0,168
P6	-0,165	-0,069	-0,042	0,183
P7	-0,198	-0,044	-0,042	0,208
P8	-0,185	-0,038	-0,042	0,193
P9	-0,148	-0,011	-0,041	0,154
P10	-0,203	0,016	-0,039	0,207
P11	-0,169	-0,022	-0,042	0,175
P12	-0,179	-0,017	-0,042	0,185
P13	-0,149	-0,047	-0,042	0,162
P14	-0,147	-0,047	-0,042	0,160
P15	-0,110	-0,103	-0,042	0,157
P16	-0,246	-0,058	-0,042	0,257
P17	-0,177	-0,065	-0,040	0,193
P18	-0,162	-0,075	-0,042	0,184
P19	-0,204	-0,086	-0,042	0,225
P20	-0,144	-0,060	-0,043	0,162
P21	-0,189	-0,074	-0,044	0,208
P22	-0,189	-0,043	-0,042	0,198
P23	-0,164	0,027	-0,042	0,172
P24	-0,135	-0,048	-0,043	0,150
P25	-0,117	-0,066	-0,040	0,140
Mittel $\mu$	-0,166	-0,047	-0,042	0,181
Stabw s	0,032	0,031	0,001	0,028

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	-0,198	-0,079	-0,043	0,152
$\mu$	-0,166	-0,047	-0,042	0,181
$\mu$ +s	-0,134	-0,016	-0,041	0,209

Tabelle 23: Wertetabelle Umlenkwinkel 60°

	dX	dY	dZ	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	0,175	-0,049	-0,028	0,184
P2	0,189	-0,026	-0,029	0,193
P3	0,129	-0,026	-0,027	0,135
P4	0,145	-0,026	-0,030	0,150
P5	0,151	-0,005	-0,029	0,154
P6	0,103	-0,024	-0,029	0,110
P7	0,171	-0,117	-0,028	0,209
P8	0,176	0,021	-0,028	0,179
P9	0,237	-0,075	-0,026	0,250
P10	0,196	-0,028	-0,028	0,200
P11	0,117	-0,011	-0,029	0,121
P12	0,121	-0,020	-0,027	0,125
P13	0,167	-0,020	-0,026	0,170
P14	0,151	-0,073	-0,028	0,170
P15	0,123	-0,034	-0,027	0,130
P16	0,153	-0,073	-0,025	0,172
P17	0,126	-0,033	-0,027	0,133
P18	0,147	-0,043	-0,026	0,156
P19	0,142	-0,038	-0,027	0,150
P20	0,143	-0,091	-0,025	0,171
P21	0,170	-0,094	-0,026	0,196
P22	0,301	-0,037	-0,025	0,304
P23	0,174	-0,009	-0,025	0,176
P24	0,232	-0,115	-0,024	0,260
P25	0,193	-0,088	-0,023	0,214
Mittel $\mu$	0,165	-0,045	-0,027	0,176
Stabw s	0,044	0,036	0,002	0,046

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	0,122	-0,081	-0,029	0,130
$\mu$	0,165	-0,045	-0,027	0,176
$\mu$ +s	0,209	-0,010	-0,025	0,222

Tabelle 24: Wertetabelle Umlenkwinkel 90°

	dX	dY	dZ	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	-0,046	0,107	0,006	0,117
P2	-0,071	0,103	0,005	0,125
P3	-0,046	0,122	0,007	0,130
P4	-0,062	0,089	0,008	0,109
P5	-0,012	0,066	0,010	0,068
P6	-0,102	0,093	0,011	0,139
P7	0,013	0,081	0,012	0,083
P8	-0,020	0,094	0,014	0,097
P9	-0,081	0,053	0,013	0,097
P10	-0,103	0,076	0,012	0,128
P11	-0,016	0,098	0,012	0,100
P12	-0,048	0,021	0,012	0,054
P13	-0,077	0,036	0,014	0,086
P14	-0,088	0,098	0,015	0,133
P15	-0,063	0,028	0,013	0,070
P16	-0,004	0,048	0,013	0,050
P17	0,006	0,065	0,014	0,067
P18	-0,010	0,038	0,015	0,042
P19	0,000	0,057	0,014	0,059
P20	-0,078	0,041	0,015	0,089
P21	-0,096	0,065	0,016	0,117
P22	-0,106	0,051	0,015	0,118
P23	-0,225	0,022	0,016	0,226
P24	-0,053	0,043	0,016	0,070
P25	-0,087	0,071	0,015	0,113
Mittel $\mu$	-0,059	0,067	0,013	0,100
Stabw s	0,051	0,029	0,003	0,039

	dx	dy	dz	ds
$\mu-s$	-0,110	0,038	0,009	0,061
$\mu$	-0,059	0,067	0,013	0,100
$\mu+s$	-0,008	0,095	0,016	0,138

Tabelle 25: Wertetabelle Umlenkwinkel 120°



	dx	dy	dz	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	0,065	-0,033	-0,008	0,073
P2	0,009	-0,124	-0,008	0,124
P3	0,144	-0,055	-0,006	0,155
P4	0,058	-0,037	-0,008	0,069
P5	0,029	0,002	-0,006	0,030
P6	0,094	-0,127	-0,003	0,158
P7	0,099	-0,052	-0,003	0,112
P8	0,082	-0,027	-0,002	0,087
P9	-0,071	-0,126	-0,004	0,145
P10	0,083	-0,128	-0,003	0,153
P11	0,042	-0,037	-0,002	0,056
P12	0,178	-0,030	0,002	0,180
P13	0,170	-0,060	0,001	0,180
P14	-0,016	-0,005	0,001	0,016
P15	-0,028	-0,074	0,001	0,079
P16	0,044	-0,037	0,000	0,058
P17	0,032	-0,090	-0,001	0,096
P18	0,084	-0,105	-0,002	0,135
P19	0,036	-0,028	0,001	0,045
P20	0,086	0,000	0,001	0,086
P21	0,047	0,029	-0,002	0,056
P22	0,075	-0,021	-0,003	0,078
P23	0,057	-0,053	0,002	0,078
P24	0,186	-0,039	0,001	0,190
P25	0,068	-0,096	0,001	0,118
Mittel $\mu$	0,066	-0,054	-0,002	0,102
Stabw s	0,061	0,044	0,003	0,049

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	0,005	-0,098	-0,005	0,053
$\mu$	0,066	-0,054	-0,002	0,102
$\mu$ +s	0,127	-0,010	0,001	0,151

Tabelle 26: Wertetabelle 90° horizontale und 30° vertikale Umlenkung = 100°

## F. Wertetabelle wiederholter Einstellung des Spiegeltools

	dX	dY	dZ	ds
	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]	[ mm / m ]
P1	-0,218	0,109	0,000	0,243
P2	-0,053	0,045	0,002	0,070
P3	0,053	0,059	0,004	0,080
P4	-0,106	0,100	0,004	0,145
P5	0,062	0,071	0,009	0,095
P6	-0,243	0,179	0,005	0,302
P7	0,211	0,104	-0,002	0,235
P8	0,091	0,062	0,002	0,110
P9	-0,056	0,161	0,005	0,171
P10	-0,164	0,207	0,011	0,264
P11	0,016	0,085	0,007	0,087
P12	0,098	-0,034	0,002	0,104
P13	-0,179	0,057	0,004	0,188
P14	0,202	0,039	0,007	0,206
P15	0,055	0,089	0,008	0,105
P16	-0,011	0,173	0,007	0,174
P17	-0,147	0,188	0,006	0,238
P18	0,271	0,123	0,001	0,297
P19	0,011	0,116	0,004	0,116
P20	0,031	0,039	0,002	0,050
P21	-0,075	0,124	0,007	0,145
P22	-0,056	0,113	0,000	0,126
P23	0,357	0,102	0,003	0,371
P24	-0,045	0,059	0,003	0,074
P25	0,005	0,188	0,000	0,188
Mittel $\mu$	0,004	0,102	0,004	0,167
Stabw s	0,149	0,058	0,003	0,085

	dx	dy	dz	ds
$\mu$ -s	-0,144	0,045	0,001	0,083
$\mu$	0,004	0,102	0,004	0,167
$\mu$ +s	0,153	0,160	0,007	0,252

Tabelle 27: Wertetabelle mehrmalige Neueinstellung des Punktes bei 90° Umlenkwinkel

G. Berechnete Genauigkeiten der Koordinatenberechnung und der Ausgleichsrechnung der Transformationsparameter

Submatrix TBR1:

2,564E-06	-1,302E-07	1,901E-09
-1,302E-07	6,245E-06	-5,381E-08
1,901E-09	-5,381E-08	2,561E-06

Submatrix TBR 2:

2,609E-06	-7,725E-08	1,308E-09
-7,725E-08	6,247E-06	-6,163E-08
1,308E-09	-6,163E-08	2,609E-06

Submatrix TBR 3:

2,584E-06	-7,639E-08	2,547E-09
-7,639E-08	6,244E-06	-1,221E-07
2,547E-09	-1,221E-07	2,589E-06

Submatrix TBR 4:

2,539E-06	-1,298E-07	4,047E-09
-1,298E-07	6,242E-06	-1,156E-07
4,047E-09	-1,156E-07	2,540E-06

Submatrix TBR 5:

2,551E-06	-1,300E-07	2,974E-09
-1,300E-07	6,243E-06	-8,454E-08
2,974E-09	-8,454E-08	2,550E-06

Submatrix TBR 6:

2,586E-06	-1,034E-07	1,631E-09
-1,034E-07	6,246E-06	-5,776E-08
1,631E-09	-5,776E-08	2,585E-06

Submatrix TBR 7:

2,596E-06	-7,683E-08	1,930E-09
-7,683E-08	6,246E-06	-9,174E-08
1,930E-09	-9,174E-08	2,599E-06

Submatrix TBR 8:

2,563E-06	-1,029E-07	3,206E-09
-1,029E-07	6,244E-06	-1,148E-07
3,206E-09	-1,148E-07	2,566E-06

Tabelle 28: Submatrizen der Kovarianzmatrix aus dem Varianzfortpflanzungsgesetz

$$\Sigma_{\Delta x \Delta x} =$$

2,5E-08	-1,2E-09	-1,2E-08	-1,6E-04	1,7E-05	4,2E-05
-1,2E-09	1,6E-08	2,7E-09	-4,9E-06	-1,2E-04	-7,5E-05
-1,2E-08	2,7E-09	1,2E-08	4,9E-05	-4,1E-05	-2,3E-05
-1,6E-04	-4,9E-06	4,9E-05	1,1E+00	6,3E-02	-2,3E-01
1,7E-05	-1,2E-04	-4,1E-05	6,3E-02	9,4E-01	5,5E-01
4,2E-05	-7,5E-05	-2,3E-05	-2,3E-01	5,5E-01	4,1E-01

Tabelle 29: Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Unbekannten

## H. Screenshot der Transformationen der Praxistestmessung 1

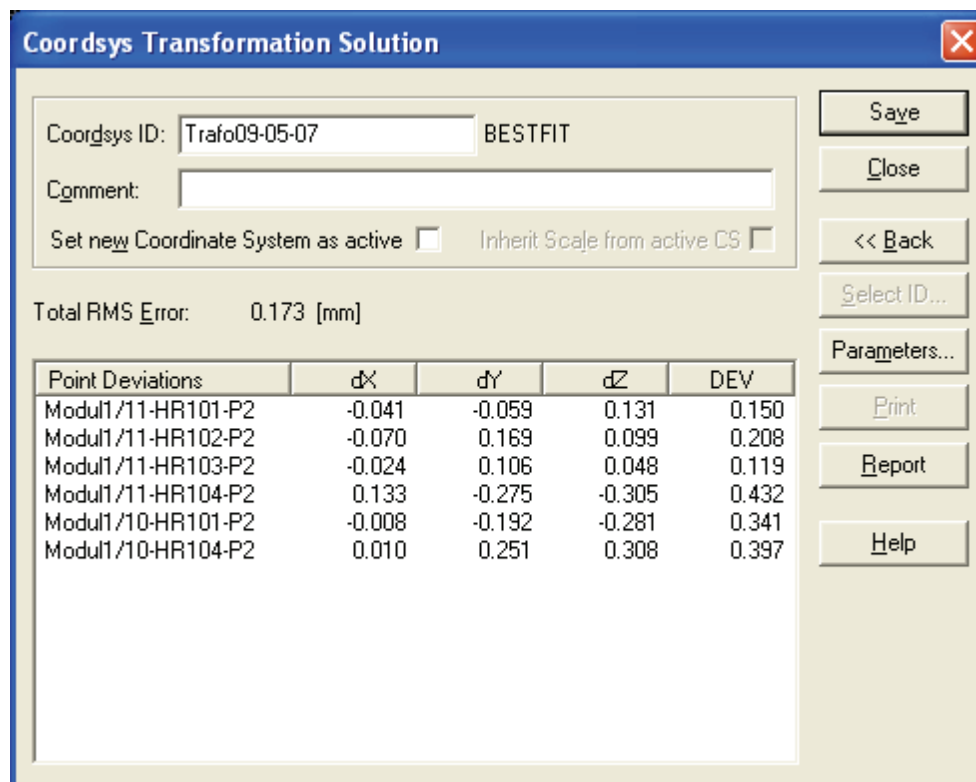


Abbildung 21: Transformation Messung 1 ins PG

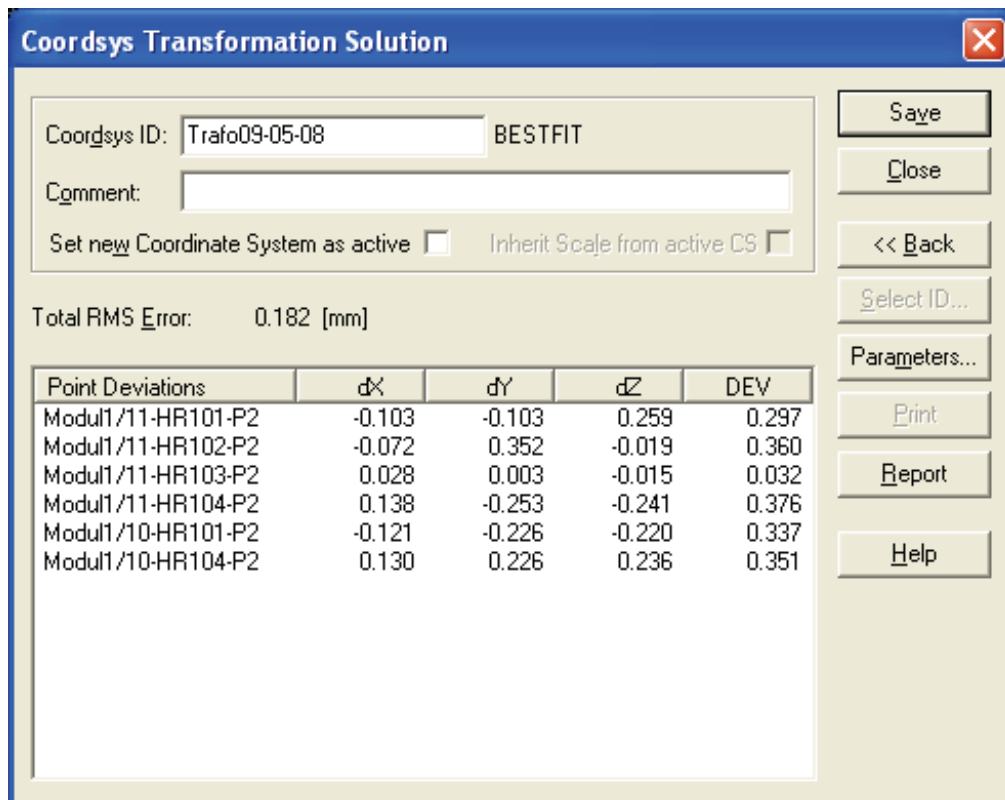


Abbildung 22: Transformation Messung 2 ins PG

I. Screenshot der Transformation der Praxismessung 2

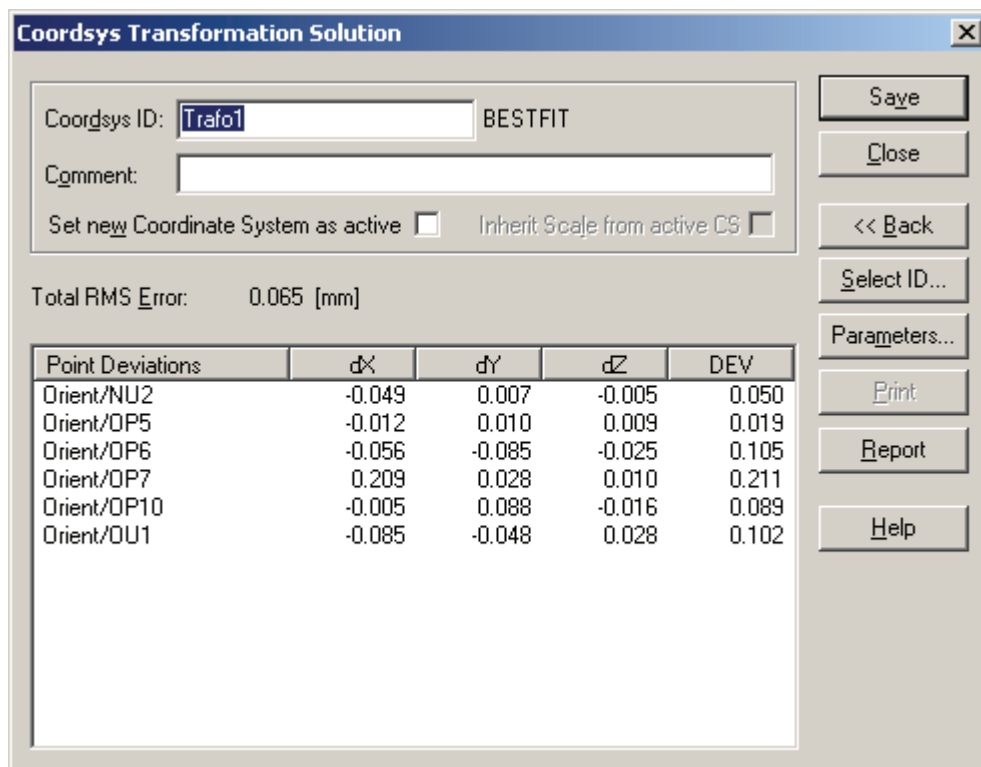


Abbildung 23: Transformation Standpunkt 2 auf Standpunkt 1

## J. Auto-Inspect-Messdarstellung

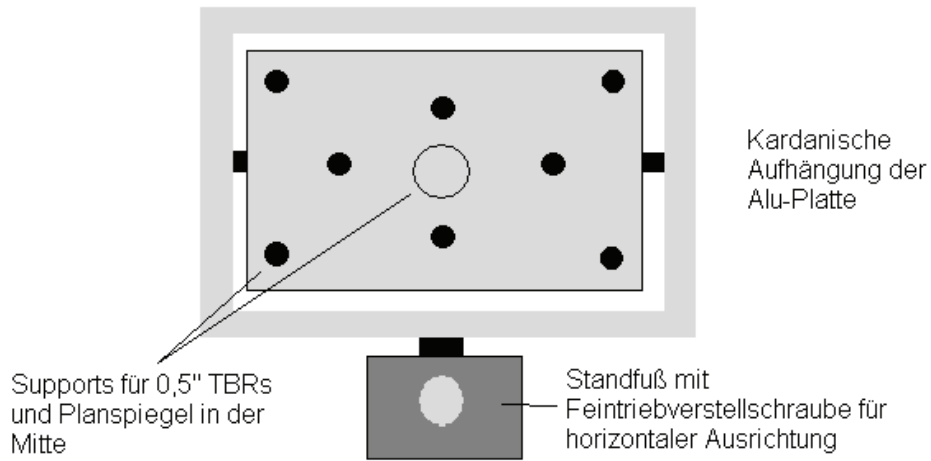
The screenshot displays the Leica Asyz LTM software interface for an auto-inspect measurement. The main window is titled 'Leica Asyz LTM - 090713\_LT\_SP\_2m.Axyz'. The interface is divided into several sections:

- Stationsstatus:** Shows the current station 'D 01' and its status. The sensor type is 'LTD800 LTCplus', the tracker number is 'SN01178', and the current reflector is 'TBR-0.5in'. The distance to the Bird Bath is '155.898 [mm]'. The laser status is 'Laser bereit' and the tracking status is 'Reflektor NICHT'. The next ID is 'Mess2/TBR9'.
- Reflektor suchen:** A search panel for finding reflectors. It includes fields for 'Station Nr.' (set to 1), 'Suchkreis' (100 mm), and 'Genäherte Distanz in [mm]' (6000). There are buttons for 'Find', 'Video On', 'Schliessen', and 'Hilfe'.
- Tracker bewegen:** A control panel for moving the tracker. It includes a 'Geschwindigkeit' checkbox (checked), 'Verz.' (0), 'Hz.' (0), and a 'Hz-Richtung umkehren' checkbox. There are also directional arrow buttons and a 'Motoren entkoppeln' button.
- Mess2/TBR1 Data:** A table showing measured values and deviations for the X, Y, and Z axes. The measured values are 319.185 mm for X, 2016.705 mm for Y, and -161.138 mm for Z. The deviations (Ref.-Akt.=Abw.) are 0.009 mm for X, 0.007 mm for Y, and -0.003 mm for Z.
- Stationen:** Shows the current station '1' and the target station 'DEFAULT/BASE'.
- Durchgang:** Shows the current pass '1'.

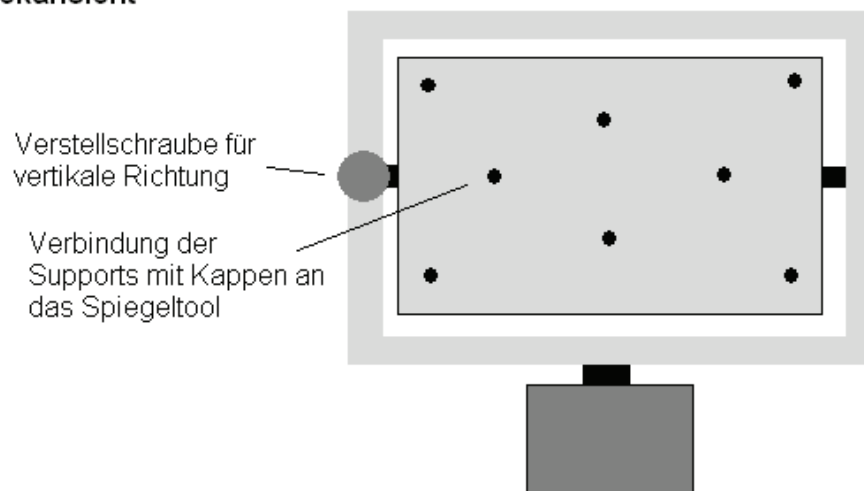
Abbildung 24: Messansicht in XYZ bei einer Auto-Inspect-Messung

## K. Optimierungsskizzen des Spiegeltools

Frontansicht



Rückansicht



Draufsicht

